

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Topologie klíčových komponentů pro studentský projekt elektrické
čtyřkolky

Autor práce: **Bc. Vojtěch Procházka**
Vedoucí práce: **Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch PROCHÁZKA**
Osobní číslo: **E21N0052P**
Studijní program: **N0714A060013 Elektronika a informační technologie**
Specializace: **Výkonová elektronika**
Téma práce: **Topologie klíčových komponentů pro studentský projekt elektrické čtyřkolky**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte řešerži stávajících pravidel Formule SAE a zvažte jejich aplikaci do projektu elektrické čtyřkolky.
2. Definujte klíčové komponenty elektrické čtyřkolky a jejich komunikace.
3. Navrhněte topologii splňující bezpečnostní požadavky vycházející z pravidel Formule SAE.



[Faint signature and text, likely a stamp or official mark, partially obscured by the seal and bleed-through.]


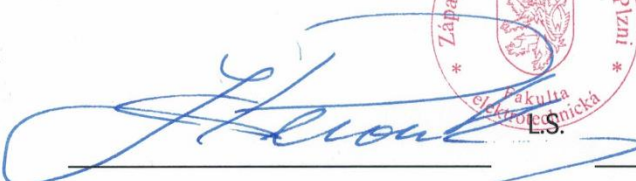
Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. Formula SAE [online]. 2022 Dostupné z: <https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je navrhnout topologii klíčových komponentů elektrické čtyřkolky splňující bezpečnostní požadavky vycházející z pravidel Formula SAE. Elektrická čtyřkolka je jedním ze studentských projektů, které v současné době probíhají na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. První kapitola této práce je věnována rešerši stávajících pravidel Formula SAE, kterých je nutné se držet při následných rozvahách a návrhu samotné topologie. Dále jsou na základě znalostí pravidel Formula SAE definovány a vybrány klíčové komponenty, kterými bude čtyřkolka osazena. Je také proveden návrh komunikace těchto komponentů a jednotlivých řídicích jednotek v rámci celého systému. Práce obsahuje také základní analýzu poruch a jejich následků, tzv. FMEA analýzu. Uvedeny jsou možné poruchové stavy, které mohou při provozu čtyřkolky nastat, jejich možné důsledky a způsoby, jakými je nutné tyto stavy řešit. Na základě těchto dílčích kroků je v poslední části práce navržena topologie klíčových komponentů elektrické čtyřkolky, která splňuje základní bezpečnostní požadavky dané pravidly Formula SAE a zároveň zohledňuje vlastnosti, jimiž čtyřkolka disponuje, a další specifické nároky, které byly na projekt čtyřkolky kladeny. Předkládaná diplomová práce je jednou z prvních dvou prací, které v rámci projektu elektrické čtyřkolky vznikly. V následujících letech tedy bude nutné na tuto práci dále navázat konkrétními návrhy a realizacemi jednotlivých částí elektrické čtyřkolky.

Klíčová slova

Topologie, klíčové komponenty, komunikace, elektrické vozidlo, elektrická čtyřkolka

Abstract

The aim of this diploma thesis is to design the topology of the key components of an electric quad that meets the safety requirements based on the Formula SAE rules. The electric quad is one of the student projects which are currently in progress at the Faculty of Electrical Engineering of the University of West Bohemia. The first chapter of this thesis is dedicated to the researching of the current Formula SAE rules, which must be respected during subsequent considerations and the design of the topology itself. Furthermore, on the basis of knowledge of the Formula SAE rules, the key components which the quad will be equipped are defined and selected. The design of the communication of these components and control units within the entire system is also performed. The thesis also contains a basic analysis of faults and their consequences, the so-called FMEA analysis. Possible fault conditions that may occur during the operation of the quad, their possible consequences and the ways how to solve these conditions are listed. Based on these partial steps, the topology of the key components of the electric quad is designed in the last part of the thesis. The topology meets basic safety requirements given by the Formula SAE rules and at the same time takes into account further specific requirements on the project of the electric quad and further features which the quad has. The presented diploma thesis is one of the first two theses which is created as part of the electric quad project. In the following years, it will be necessary to follow up on this diploma thesis with specific designs and realizations of individual parts of the electric quad.

Key Words

Topology, key components, communication, electric vehicle, electric quad

Poděkování

Tato diplomová práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu No. SGS-2021-021.

Dále bych tímto rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Štěpánkovi, Ph.D. za cenné rady, praktické připomínky a ochotu, s jakou se mnou konzultoval veškeré kroky, které vedly ke vzniku této práce.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Pravidla Formula SAE a jejich aplikace do projektu elektrické čtyřkolky	- 3 -
1.1 Elektrická omezení	- 3 -
1.1.1 Výkon a napětí.....	- 3 -
1.1.2 Energy meter.....	- 4 -
1.2 Komponenty.....	- 4 -
1.2.1 Motor a měnič.....	- 4 -
1.2.2 Akumulátorový kontejner.....	- 5 -
1.2.3 Uzemněný systém nízkého napětí (GLVS)	- 5 -
1.2.4 Baterie nízkého napětí	- 6 -
1.2.5 Snímač pozice plynového pedálu (APPS).....	- 6 -
1.2.6 Snímač brzdového systému (BSE)	- 7 -
1.2.7 APPS/kontrola brzdového pedálu.....	- 8 -
1.3 Úložiště energie	- 8 -
1.3.1 Akumulátor.....	- 8 -
1.3.2 Elektrické požadavky	- 9 -
1.3.3 Údržbové zástrčky	- 10 -
1.3.4 Izolační stykače akumulátoru (AIR).....	- 10 -
1.3.5 Odpojovač vysokého napětí (HVD)	- 10 -
1.3.6 Přednabíjecí a vybíjecí obvody.....	- 11 -
1.3.7 Indikátor napětí.....	- 11 -
1.3.8 Měřicí body trakčního systému (TSMP)	- 11 -
1.3.9 Indikátor trakčního systému (TSAL).....	- 13 -
1.4 Elektrický systém.....	- 13 -
1.4.1 Kryty.....	- 13 -
1.4.2 Izolace.....	- 13 -
1.4.3 Elektroinstalace	- 14 -
1.4.4 Propojení.....	- 14 -
1.4.5 Oddělení napětí.....	- 15 -
1.4.6 Nadproudová ochrana.....	- 16 -

1.4.7	Uzemnění.....	- 16 -
1.5	Vypínací systém.....	- 16 -
1.5.1	Vypínací obvod	- 16 -
1.5.2	Funkce vypínacího obvodu.....	- 18 -
1.5.3	Battery Management System (BMS).....	- 18 -
1.5.4	Napětí akumulátoru	- 19 -
1.5.5	Teplota akumulátoru.....	- 19 -
1.5.6	Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD).....	- 20 -
1.5.7	Zařízení pro kontrolu plauzibility brzdového systému (BSPD)	- 20 -
1.5.8	Hlavní vypínače	- 20 -
1.5.9	Vypínací tlačítka.....	- 21 -
1.5.10	Bezpečnostní spínač brzdění (BOTS).....	- 22 -
1.5.11	Setrvačný spínač	- 22 -
1.6	Požadavky na nabíječky.....	- 23 -
1.6.1	Vlastnosti nabíječky	- 23 -
1.6.2	Vypínací obvod nabíjení.....	- 23 -
1.6.3	Funkce vypínacího obvodu nabíjení.....	- 24 -
1.7	Operace s vozidlem.....	- 24 -
1.7.1	Vysazení z činnosti (Lockout).....	- 24 -
1.7.2	Aktivační sekvence.....	- 24 -
2	Definice klíčových komponentů elektrické čtyřkolky.....	- 26 -
2.1	Hlavní řídicí jednotka	- 26 -
2.1.1	Snímač pozice plynového pedálu (APPS).....	- 27 -
2.1.2	Akcelerometr a gyroskop.....	- 29 -
2.1.3	Snímače rychlosti předních kol	- 30 -
2.1.4	Systém pro měření tlaku v pneumatikách (TPMS)	- 31 -
2.2	Vypínací obvod a trakční systém.....	- 32 -
2.2.1	Hlavní vypínače GLVMS, TSMS a palubní baterie.....	- 32 -
2.2.2	Vypínací tlačítko	- 33 -
2.2.3	Systém BMS	- 33 -
2.2.4	Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD).....	- 34 -

2.2.5	Odpojovač vysokého napětí (HVD)	- 36 -
2.2.6	Izolační stykače akumulátoru (AIR).....	- 37 -
2.2.7	Přednabíjecí a vybíjecí obvody.....	- 38 -
2.2.8	Trakční akumulátor.....	- 40 -
2.2.9	Elektromotor.....	- 41 -
2.2.10	Výkonový měnič	- 43 -
3	Návrh komunikace a připojení klíčových komponentů čtyřkolky	- 44 -
3.1	Sběrnice CAN (CAN bus)	- 44 -
3.2	Digitální komunikace – CAN 1	- 46 -
3.3	Digitální komunikace – CAN 2	- 49 -
3.4	Komunikace SPI	- 52 -
3.5	Komunikace Bluetooth	- 52 -
3.6	Připojení komponentů.....	- 53 -
3.7	Analýza možných poruch a jejich následků.....	- 57 -
4	Návrh topologie klíčových komponentů čtyřkolky	- 61 -
4.1	Legenda použitých spojů	- 61 -
4.2	Blok řídicíků	- 62 -
4.3	Přední náprava	- 64 -
4.4	Blok elektrického pohonu	- 65 -
4.5	Servisní panel.....	- 66 -
4.6	Akumulátorový kontejner	- 68 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 71 -
	Seznam obrázků.....	- 73 -
	Seznam tabulek.....	- 74 -
	Literatura	- 75 -
	Příloha A.....	I
	Příloha B.....	II

Seznam symbolů a zkratek

Obecné

Označení	Jednotka	Celý název
$C_{\text{čl}}$	Ah	Kapacita jediného článku baterie
E_{bat}	kWh	Energie trakčního akumulátoru
$I_{\text{bat_max}}$	A	Maximální proud odebíraný z baterie
$I_{\text{bat_nom}}$	A	Jmenovitý proud odebíraný z baterie
$P_{\text{max_U_min}}$	W	Špičkový výkon motoru při nejnižším možném napětí baterie
P_{mot}	W	Nejvyšší trvalý výkon motoru
$P_{\text{mot_max}}$	W	Špičkový výkon motoru
R_{TSMP}	Ω	Omezující rezistor proudu měřicích bodů trakčního systému
$U_{\text{čl}}$	V	Napětí jediného článku baterie
$U_{\text{bat_max}}$	V	Maximální napětí akumulátoru
$U_{\text{bat_min}}$	V	Minimální napětí akumulátoru
$U_{\text{bat_nom}}$	V	Jmenovité napětí akumulátoru
U_{diff}	V	Diferenční napětí na sběrnici CAN
U_{fout}	V	Efektivní hodnota fázového napětí zátěže
U_{max}	V	Maximální napětí trakčního systému
U_{sout}	V	Efektivní hodnota sdruženého napětí
k_{U_n}	V/(1 ot./min)	Konstanta motoru pro přepočet ef. h. sdruž. napětí na otáčky
n_{U_min}	ot./min	Otáčky dosažitelné při nejnižším možném napětí baterie
<i>BMS</i>		Battery Management System
<i>CAN</i>		Controller Area Network
<i>DoD</i>		Depth of Discharge
<i>ETC</i>		Electronic Throttle Control
<i>FMEA</i>		Failure Mode and Effect Analysis
<i>GPIO</i>		General-purpose input/output
<i>NC</i>		Normally Closed
<i>NO</i>		Normally Open
<i>OEM</i>		Original Equipment Manufacturer
<i>PWM</i>		Pulse Width Modulation
<i>SAE</i>		Society of Automotive Engineers
<i>SENT</i>		Single Edge Nibble Transmission
<i>SPI</i>		Serial Peripheral Interface
<i>SoC</i>		State of Charge
<i>TPMS</i>		Tire Pressure Monitoring System

Zkratky komponentů a systémů vycházející z pravidel Formula SAE

<i>Označení</i>	<i>Celý název</i>
<i>AIR</i>	Accumulator Isolation Relay
<i>APPS</i>	Accelerator Pedal Position Sensor
<i>BOTS</i>	Brake Over-Travel Switch
<i>BSE</i>	Brake System Encoder
<i>BSPD</i>	Brake System Plausibility Device
<i>GLV</i>	Grounded Low Voltage
<i>GLVMP</i>	Grounded Low Voltage Measuring Point
<i>GLVMS</i>	Grounded Low Voltage Master Switch
<i>GLVS</i>	Grounded Low Voltage System
<i>HVD</i>	High Voltage Disconnect
<i>IMD</i>	Insulation Monitoring Device
<i>TSAL</i>	Tractive System Active Light
<i>TSMP</i>	Tractive System Measuring Points
<i>TSMS</i>	Tractive System Master Switch

Úvod

Na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni v současné době probíhá několik projektů, které se zabývají návrhem a realizací různých typů elektrických bateriových vozidel. Z kategorie studentských projektů se pak jedná především o projekty elektrické formule pro soutěž Formula SAE, elektrické motokáry a elektrické čtyřkolky. Práce na jednotlivých projektech jsou mezi sebou do jisté míry provázány a dochází tak například ke společnému řešení některých problémů, či přímo k přebírání některých hotových funkčních celků. Projekt elektrické čtyřkolky je prozatím ve svém počátku, čemuž odpovídá i téma a zadání této diplomové práce, která je tohoto projektu součástí. Cílem práce je navrhnout topologii klíčových komponentů čtyřkolky, jejíž návrh vychází z oficiálních pravidel studentské soutěže Formula SAE. Dodržení těchto pravidel při návrhu vede k určité záruce spolehlivé funkce systémů a bezpečnosti provozu vozidla. Pravidla Formula SAE jsou v rámci práce prostudována a přehledně shrnuta. Projekt elektrické čtyřkolky má však přirozeně určitá specifika a v některých případech vyžaduje odlišný přístup k návrhu určitých částí systému, než je tomu v případě elektrické formule. Tyto specifické požadavky a změny v návrhovém přístupu jsou v průběhu práce popisovány a jsou předkládána vhodná alternativní řešení. Návrh však stále probíhá s ohledem na maximální možnou bezpečnost provozu vozidla.

Aby mohl ucelený topologický návrh vůbec vzniknout, je zapotřebí klíčové komponenty definovat, určit jejich požadované vlastnosti, funkce a parametry a vytipovat vhodné produkty dostupné na trhu, které požadavky kladené na náš projekt splňují. Neméně důležité je pak definovat, jaká data budeme muset být schopni z použitých komponentů získávat, jakým způsobem je zpracovávat a dále navrhnout způsob komunikace mezi těmito komponenty a použitými řídicími jednotkami. Podstatná část této práce je věnována právě konkrétnímu výběru klíčových komponentů a následnému návrhu jejich komunikace. V příloze je pak uveden i objednávkový list vybraných komponentů, kterými bude nutné čtyřkolku osadit.

Práce je dělena do čtyř částí, které na sebe navazují v pořadí, v jakém bylo zadání diplomové práce řešeno. V první části jsou shrnuta pravidla Formula SAE, která je zapotřebí v našem projektu zohlednit. Zároveň je zde stručně komentováno, zda se daným pravidlem budeme

řídít beze změny, zda bude nutné pravidlo pro naše účely modifikovat nebo se jím z nějakých důvodů nebudeme řídit vůbec. V druhé části se věnuji definici klíčových komponentů čtyřkolky a jejich konkrétnímu výběru. Jsou zde uvedeny důvody, které k výběru daného komponentu vedly, a vždy je odkázáno na příslušný katalogový list výrobce. Třetí část je věnována návrhu komunikací klíčových komponentů v rámci celého systému vozidla. Je zde uvedeno, jaká data bude nutné snímat, vypočítávat, jakou podobu a obsah budou mít zprávy vysílané po sběrnících a jakým způsobem na ně bude nutné reagovat. V jedné z podkapitol této části se věnuji i základní analýze poruch a jejich následků (FMEA – Failure Mode and Effect Analysis). Poslední, tedy čtvrtá část této diplomové práce, již obsahuje ucelený topologický návrh elektrické čtyřkolky, který vznikl na základě pravidel Formula SAE a činností popsaných v předchozích kapitolách.

Jak již bylo v úvodu zmíněno, projekt elektrické čtyřkolky je teprve ve svém počátku. Vzniklý topologický návrh stojí na pomyslném vrcholu hierarchie projektu a dále bude sloužit jako podklad pro konkrétní návrh a realizaci jak hardwarových, tak softwarových částí celého systému. Paralelně s touto diplomovou prací byla v tomto akademickém roce zpracována i diplomová práce zabývající se návrhem třífázového střídače, který bude na čtyřkolce použit. Je tedy zřejmé, že na tuto práci lze v dalších letech navázat konkrétními návrhy a realizacemi jednotlivých částí elektrické čtyřkolky.

1 Pravidla Formula SAE a jejich aplikace do projektu elektrické čtyřkolky

Veškeré formule, které se účastní závodů Formula SAE, musí bezpodmínečně splňovat předepsaná pravidla týkající se jejich konstrukce, technických parametrů, použitých komponentů a jejich vlastností, umístění nebo zapojení. Dále jsou samozřejmě podrobně definována pravidla platná pro použité bezpečnostní systémy a komponenty, které plní bezpečnostní funkce. Každé závodní vozidlo prochází před závodem technickou inspekcí a při nesplnění předepsaných pravidel nemůže být daný tým připuštěn do závodu. Jsou předepsána pravidla platná jak pro formule se spalovacím motorem, tak pro formule s pohonem elektrickým. Pro naše účely se zaměříme na pravidla pro elektrická vozidla, jejich komponenty, zapojení těchto komponentů, jejich předepsanou funkci a technické parametry, které musí splňovat. Následující výčet nejdůležitějších pravidel byl nastudován a přeložen ze zdroje [1].

Tato pravidla jsou výborným východiskem i pro náš projekt elektrické čtyřkolky, neboť jejich znalost nám dává přehled o důležitých komponentech, které je nutné při konstrukci čtyřkolky použít, a o jejich funkcích, které jsou potřebné nejen ke splnění důležitých bezpečnostních kritérií. V neposlední řadě z těchto pravidel také vyplývá, jakým způsobem je nutné jednotlivé komponenty zapojit a kam je umístit. Jednotlivá pravidla budou v této kapitole postupně uvedena a zároveň bude posouzena a zdůvodněna vhodnost či nevhodnost použití některých přesně definovaných řešení dle pravidel Formula SAE. U některých pravidel a požadavků budou taktéž popsána jiná či alternativní použitá řešení vycházející z našich specifických potřeb nebo z rozdílných vlastností, které čtyřkolka oproti formuli přirozeně má.

1.1 Elektrická omezení

1.1.1 Výkon a napětí

- Maximální výkon odebíraný z akumulátoru nesmí překročit 80 kW.
- Maximální povolené napětí mezi dvěma libovolnými body je 600V DC.
- Rekuperace energie je povolena a neomezená, pokud je rychlost vozidla > 5 km/h.
- Napájení motoru pro jízdu vozidla vzad je zakázáno. [1]

Omezení výkonem a napětím není pro náš projekt nijak závazné. Pro čtyřkolku je však vybrán elektromotor Emrax 188, který má dle katalogového listu výrobce [2] při 6000 otáčkách a při použití vodního chlazení stálý výkon P_{mot} až 30 kW. Špičkový výkon P_{mot_max} je pak krátkodobě až 70 kW. Požadavek na maximální výkon odebíraný z akumulátoru tedy bude v našem případě vždy splněn. Emrax 188 se vyrábí ve třech napěťových provedeních. Motor pro náš projekt je proveden ve střední napěťové variantě, což znamená maximální napětí baterie, respektive stejnosměrného meziobvodu, 270 V DC. Jak bude v jedné z dalších částí této kapitoly ukázáno, napětí ve stejnosměrném meziobvodu v našem případě této hodnoty nedosahuje. Požadavek na maximální dovolené napětí mezi dvěma body je tedy přirozeně splněn. Nižší hodnota napětí ve stejnosměrném meziobvodu má za následek skutečnost, že nikdy nebudeme schopni motor výkonově plně využít. Čtyřkolka bude disponovat možností rekuperace elektrické energie a na rozdíl od formule bude možné reverzovat chod motoru. Se čtyřkolkou tedy bude možné couvat.

1.1.2 Energy meter

Toto pravidlo říká, že všechna závodní elektrická vozidla musí jezdit s měřičem energie, tzv. Energy meterem, který dodá pořadatel závodu [1]. Energie odebraná z baterie se počítá jako časově integrovaná hodnota měřeného napětí vynásobená hodnotou měřeného proudu [1]. Jedná se tedy o časový integrál výkonu odebíraného z baterie. Jelikož měření napětí ve stejnosměrném meziobvodu a měření odebíraného proudu motorem je nezbytné pro celou řadu dalších funkcí, bylo by teoreticky možné tyto hodnoty použít i pro výpočet odebrané energie z akumulátoru. V našem případě budeme ovšem získávat tyto údaje ze systému BMS, který bude schopen určovat potřebné parametry pro výpočet odebrané, resp. zbývající energie v baterii, tedy parametry SoC (State of Charge) a DoD (Depth of Discharge). Díky tomu budeme schopni stanovit míru vybití akumulátoru a množství odebrané energie, a na základě těchto údajů určovat například zbývající dojezd čtyřkolky.

1.2 Komponenty

1.2.1 Motor a měnič

Zde se nenachází žádné požadavky, které by pro nás byly nějakým způsobem významné a bylo by nutné je striktně dodržet. V rámci našeho projektu se tedy budeme řídit našimi potřebami, co se týče umístění těchto komponentů, jejich připojení či použitého řízení měniče.

1.2.2 Akumulátorový kontejner

- Akumulátorový kontejner musí být vyjmutelný z vozidla.
- Kontejner musí být vždy zcela uzavřen (při montáži na vozidlo i při demontáži z vozidla) bez nutnosti instalace dalších ochranných krytů.
- Akumulátorový kontejner smí obsahovat otvory, kterými smí procházet pouze kabelový svazek, ventilace, chlazení a upevňovací prvky kontejneru.
- Pokud jsou použity akumulátory, které mohou uvolňovat výbušný plyn, musí mít kontejner ventilační systém nebo tlakový pojistný ventil, který zabrání tomu, aby plyn dosáhl výbušné koncentrace.
- Kompletně utěsněné kontejnery musí mít přetlakový ventil.
- Dále dle pravidel musí být kontejner označen symbolem dle ISO 7010-W012 (trojúhelník s černým bleskem na žlutém pozadí), textem „Always Energized“ a textem „High Voltage“, pokud je napětí akumulátoru větší než 60 V DC nebo 25V AC RMS. [1]

Tato pravidla jsou poměrně obecná a odrážejí běžné požadavky na konstrukci akumulátorových kontejnerů pro různé typy elektrických vozidel. Bude proto vhodné se jich při návrhu a konstrukci čtyřkolky držet. Zde je však nutné uvést, že pro projekt čtyřkolky bude kompletně celý akumulátorový kontejner, včetně veškerých komponentů v něm uložených, převzat z jiného projektu, který na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni v současné době probíhá. Konkrétně se jedná o projekt elektrické motokáry, která bude využívat dva tyto akumulátory, respektive celé akumulátorové kontejnery, zapojené v sérii. Pro čtyřkolku bude převzat jeden tento akumulátorový kontejner, z čehož mimo jiné vyplývá, že bude mít oproti motokáře poloviční napětí stejnosměrného meziobvodu a bude mít k dispozici pouze poloviční množství energie uložené v baterii.

1.2.3 Uzemněný systém nízkého napětí (GLVS)

- GLVS musí být nízkonapěťový systém, který je uzemněn k šasi. Jeho napětí musí být rovné nebo nižší než 60 V DC nebo 25 V AC RMS.
- Tento systém musí obsahovat hlavní vypínač (GLVMS).
- Musí být instalován měřicí bod GLV (GLVMP) připojený k zemi GLVS, tedy k šasi vozidla. Tento měřicí bod musí být realizován pomocí 4 mm banánkového

konektoru, musí mít černou barvu a musí být označen štítkem „GND“. Dále je tento měřicí bod umístěn vedle měřicích bodů trakčního systému (TSMP). [1]

1.2.4 Baterie nízkého napětí

- Všechny nízkonapěťové baterie a palubní napájecí zdroje musí být bezpečně připojeny k šasi.
- Nízkonapěťové baterie musí mít nadproudovou ochranu, která vybaví při maximálním nebo menším proudu, než je maximální specifikovaný vybíjecí proud baterie.
- Kladný pól baterie musí být izolován.
- Jakákoli baterie s mokkými články umístěná v prostoru řidiče musí být umístěná v nevodivém kontejneru (marine type) nebo jeho ekvivalentu.
- Baterie na bázi lithia musí mít buď pevné, robustní pouzdro z nehořlavého materiálu nebo se musí jednat o komerčně dostupnou baterii navrženou ve stylu OEM. [1]

1.2.5 Snímač pozice plynového pedálu (APPS)

- Snímač APPS snímá polohu plynového pedálu, neboli procento sešlápnutí pedálu, kdy 0 % je nesešlápnutý pedál a 100 % je plně sešlápnutý pedál.
- Jako APPS musí být použity minimálně dva snímače, které jsou na sobě nezávislé. Každý snímač musí mít odlišnou přenosovou funkci (buď má každý senzor kladný sklon s různými gradienty a/nebo offsety nebo mají senzory opačné sklony).
- Nepravděpodobnost je definována jako situace, kdy odchylka mezi procentem sešlápnutí měřeným jedním snímačem a procentem sešlápnutí měřeným druhým snímačem je větší než 10 %.
- Pokud stav nepravděpodobnosti trvá déle než 100 ms, musí být okamžitě přerušeno napájení elektromotoru. Není nutné vypínat bezpečnostní okruh, motor stačí zastavit pomocí měniče.
- Jsou-li použity tři senzory APPS a jeden z nich selže, pak mohou být zbylé dva senzory APPS, které měří zdvih pedálu s vzájemnou odchylkou do 10 %, použity k řízení točivého momentu na kolech, zatímco třetí snímač bude ignorován.
- Signály z APPS musí být odesílány přímo do řídicí jednotky pomocí analogového signálu nebo pomocí digitální datové sběrnice jako je např. CAN nebo FlexRay.

- Jakákoli porucha senzorů APPS nebo kabeláže APPS musí být detekovatelná a musí být vyhodnocena jako stav nepravděpodobnosti. Musí se tedy zastavit řízení elektromotoru.
- Při použití analogového signálu budou signály APPS považovány za chybné, pokud dojde k rozpojení obvodu, zkratu nebo jiné anomálii, která vygeneruje signál, který neodpovídá danému provoznímu rozsahu, např. $< 0,5 \text{ V}$ nebo $> 4,5 \text{ V}$. [1]

Snímač pozice plynového pedálu nelze již z principu věci vynechat, jelikož řídicí jednotka motoru, potažmo měniče, potřebuje dostávat informaci o poloze plynového pedálu. Měření a převod jeho polohy na elektrický signál pomocí vhodného snímače a převodníku jsou tedy nezbytné. Z důvodu bezpečnosti je také nutné použít snímač s redundantním výstupem. Snímač tedy bude mít výstupy dva, každý s jinou přenosovou funkcí. Stav nepravděpodobnosti pak způsobí zastavení motoru pomocí měniče. V neposlední řadě je důležité i monitorování poruch snímače nebo kabeláže. V takovém případě je opět nezbytné zastavit motor pomocí měniče. Všemi těmito funkcemi a vlastnostmi bude disponovat i snímač APPS použitý na čtyřkolce. Čtyřkolky mívají standardně plynový pedál proveden v podobě páčky, kterou jezdec ovládá palcem pravé ruky. Bude pro nás výhodné, aby část dráhy plynové páčky zajišťovala funkci rekuperační brzdy a jezdec tak mohl brzdit pouhým uvolněním této páčky. Plynová páčka bude mechanicky spojena s otočnou hřídelí snímače APPS pomocí lanka. Určitý interval úhlu natočení snímače bude vyhrazen pro rekuperační brzdu a zbylý interval bude již sloužit pro akceleraci. Podrobnější popis použitého snímače, jeho funkce a komunikace s řídicí jednotkou motoru bude uveden v samostatné kapitole.

1.2.6 Snímač brzdového systému (BSE)

- Snímač brzdového systému BSE nebo spínač pro měření polohy brzdového pedálu nebo tlaku v brzdovém systému musí být aplikován pro kontrolu správné funkce brzdového systému.
- Signály BSE musí být odesílány přímo do řídicí jednotky pomocí analogového signálu nebo prostřednictvím digitální sběrnice pro přenos dat, jako např. CAN nebo FlexRay. Jakékoli selhání BSE nebo kabeláže BSE, které přetrvává déle než 100 ms, musí být detekovatelné a musí být vyhodnoceno jako nepravděpodobný stav. Musí tedy být okamžitě přerušena tok energie do motorů.

- Pokud je použit analogový signál, je považován za chybný, pokud dojde k rozpojení obvodu nebo k jiné anomálii, která vygeneruje signál, který neodpovídá pracovnímu rozsahu. [1]

Tento snímač nebude na čtyřkolce použit. Brzdy budou řešeny jako klasická ruční páka (přední brzda) a brzdový pedál (zadní brzda), které budou mechanicky ovládat hydraulickou pumpu brzdového systému. Signály, které budou indikovat stisknutí brzdové páky nebo pedálu, budou mít pouze binární podobu (stisknuto/nestisknuto). Signály z obou brzd se budou následně vyhodnocovat v hlavní řídicí jednotce.

1.2.7 APPS/kontrola brzdového pedálu

- Pokud jsou současně aktivovány mechanické brzdy a APPS signalizuje stlačení plynového pedálu o více než 25 %, musí dojít k přerušení toku energie do motorů.
- Motory musí zůstat vypnuté tak dlouho, dokud APPS nesignalizuje stlačení pedálu méně než 5 % bez ohledu na to, jestli jsou brzdy aktivní nebo ne. [1]

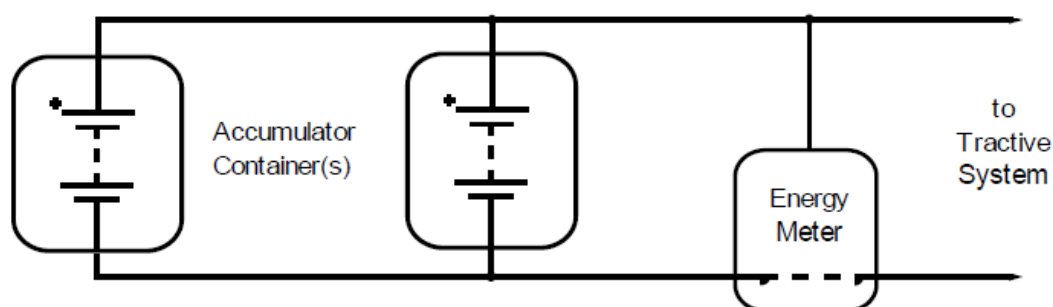
V našem projektu bude zamezení současnému brzdění a zadávání požadavku na točivý moment pomocí plynové páčky řešeno jiným způsobem. V případě stisknutí páky či pedálu ovládajících přední či zadní mechanické brzdy, bude okamžitě zajištěno, aby motor nemohl vytvářet kladný točivý moment a zbytečně tak nepůsobil proti působící brzdě síle. Jinými slovy, použití mechanických brzd vygeneruje požadavek na nulový moment motoru. V případě přední brzdy může být volitelně zachována možnost akcelerace pomocí plynové páky. Tuto možnost by mohl jezdec využít například k manévru pro otočení čtyřkolky, kdy by pomocí brzdění přední brzdou, vhodným přenesením tělesné váhy a zvýšením točivého momentu na zadních kolech dokázal čtyřkolku otočit téměř kolem osy řídítek. V takovém případě by však musel být deaktivován i systém bránící prokluzu zadních kol. Primární funkcí tak zůstává požadavek na nulový moment motoru při brzdění mechanickými brzdami.

1.3 Úložiště energie

1.3.1 Akumulátor

- Všechny bateriové články nebo superkondenzátory, ve kterých je ukládána energie pro trakční systém, jsou sestaveny do bateriových segmentů a musí být uzavřeny v akumulátorovém kontejneru.
- Maximální napětí každého bateriového segmentu je 120 V DC a jeho maximální energie je 6 MJ.

- Za Energy Meterem již nejsou povoleny žádné další zdroje energie s výjimkou kondenzátorů napěťového meziobvodu. [1]



Obr. 1: Zapojení akumulátorů, Energy Meteru (převzato z [1]).

Jak již bylo zmíněno, akumulátor budeme kompletně přebírat z projektu elektrické motokáry a jeho základnímu popisu bude věnována samostatná podkapitola v rámci popisu jednotlivých komponentů. Detailní řešení požadavků na akumulátorový kontejner tak není obsahem této práce.

1.3.2 Elektrické požadavky

- Všechny součásti trakčního systému musí být dimenzovány na maximální napětí trakčního systému.
- Pokud je akumulátorový kontejner vyroben z elektricky vodivého materiálu, póly segmentů akumulátoru a/nebo článků akumulátoru musí být izolovány od vnitřku akumulátorového kontejneru izolačním materiálem, který je dimenzován na maximální napětí trakčního systému. Dále musí být všechny vodivé povrchy na vnější straně akumulátorového kontejneru připojeny k uzemněnému systému GLV. Toto propojení musí mít co nejmenší odpor.
- Každý bateriový segment musí být elektricky izolován vhodnou nehořlavou látkou. Tento izolant se nachází mezi jednotlivými segmenty a na jejich horní straně tak, aby nedocházelo k obloukovým výbojům způsobeným mezisegmentovým zkratem. Vzduch není dostatečným izolantem.
- Pájené elektrické spoje v silové cestě jsou zakázány.
- Každý vodič použitý v akumulátorovém kontejneru musí být dimenzován na maximální napětí trakčního systému, ať už je tento vodič součástí trakčního systému nebo systému GLV. [1]

1.3.3 Údržbové zástrčky

- Údržbové zástrčky musí umožňovat elektrické oddělení jednotlivých segmentů akumulátoru. Oddělení musí proběhnout na obou pólech segmentu.
- Použití stykačů a spínačů jako údržbové zástrčky není přípustné. Údržbové zástrčky musí být navrženy tak, aby došlo k fyzickému odstranění zástrčky. Není možné je zapojit jinak, než v navržené konfiguraci. K rozpojení se nevyžadují žádné nástroje.
- Dojde-li k otevření akumulátorového kontejneru nebo vyjmutí segmentů baterie kvůli údržbě, musí dojít k oddělení segmentů pomocí údržbových zástrček. [1]

1.3.4 Izolační stykače akumulátoru (AIR)

- Každý akumulátorový kontejner musí obsahovat minimálně jednu pojistku a dva nebo více izolačních stykačů akumulátoru AIR.
- Izolační stykače akumulátoru musí být typu NO (Normally Open) a musí odepnout oba póly akumulátoru.
- Pokud jsou izolační stykače akumulátoru rozepnuté, nesmí být na vnější straně akumulátorového kontejneru naměřeno vysoké napětí (napětí vyšší než 60 V DC nebo 25 V AC RMS).
- Izolační stykače a pojistky musí být odděleny od zbytku akumulátoru nehořlavým izolačním materiálem.
- Může být použit kondenzátor, který udrží AIR sepnuté až po dobu 250 ms po rozepnutí vypínacího obvodu. Funkce vypínacího obvodu bude vysvětlena v samostatné podkapitole. [1]

1.3.5 Odpojovač vysokého napětí (HVD)

- Zařízení HVD musí být instalováno pro rychlé odpojení jednoho nebo obou pólů trakčního akumulátoru.
- Musí se jednat o přímo přístupný prvek, pojistku nebo stykač. Musí být přístupný bez odstranění jakékoli části karoserie, krytu nebo použití nástroje.
- Musí být přímo ovladatelný, není povoleno dálkové ovládání pomocí dlouhé rukojeti, lana či kabelu.
- Musí být jasně označen nápisem „HVD“.
- HVD taktéž musí rozpojit vypínací obvod. Při rozpojení HVD dojde tedy k rozepnutí izolačních stykačů baterie (AIR). [1]

Odpojovač vysokého napětí je prvkem vhodným pro bezpečné a trvalé odpojení trakčního systému bez možnosti jeho nechtěného sepnutí. Využití tak najde například při provádění servisních prací. Tento prvek bude na čtyřkolce použit. Jeho vlastnostem a výběru bude věnována jedna z dalších podkapitol.

1.3.6 Přednabíjecí a vybíjecí obvody

- Akumulátor musí obsahovat přednabíjecí obvod. Ten musí být schopen nabít meziobvod minimálně na 90 % napětí akumulátoru před sepnutím druhého izolačního stykače akumulátoru (AIR). Dále musí být napájen z vypínacího obvodu a nesmí být jištěn.
- Přednabíjecí relé musí být mechanického typu.
- Trakční systém musí taktéž obsahovat vybíjecí obvod. Ten musí být zapojen tak, aby byl aktivní vždy, když je rozepnut vypínací obvod, musí být schopný vybit kondenzátory v meziobvodu, pokud by byl rozepnutý odpojovač vysokého napětí (HVD), nesmí být jištěn a musí být navržen tak, aby dokázal pracovat s maximálním vybíjecím proudem po dobu minimálně 15 sekund. [1]

1.3.7 Indikátor napětí

- Každý akumulátorový kontejner musí mít zřetelný indikátor vysokého napětí (napětí větší než 60 V DC nebo 25 V AC RMS).
- Indikátor musí být vždy funkční, i v případě, kdy je akumulátorový kontejner odpojen nebo odebrán.
- Řídící signál, který spíná izolační stykače akumulátoru (AIR) nesmí ovlivňovat indikátor napětí.
- Indikátor napětí musí být umístěn na takovém místě, které je dobře viditelné při připojování akumulátorového kontejneru k trakčnímu systému nebo naopak při jeho odpojování a musí být označen nápisem „High Voltage Present“ („přítomno vysoké napětí“). [1]

1.3.8 Měřicí body trakčního systému (TSMP)

- Na vozidle musí být instalovány měřicí body trakčního systému TSMP, které jsou připojeny ke kladnému a zápornému pólu vedení napájecího trakční měnič.
- Měřicí body jsou umístěny vedle hlavních vypínačů (GLVMS a TSMS).

- Měřicí body musí být chráněny nevodivým krytem, který je možné otevřít bez použití nástrojů a po jeho otevření musí být měřicí body chráněny před dotykem holýma rukama nebo prsty.
- Dva měřicí body TSMP musí být instalovány také v nabíječce a musí být připojeny ke kladnému a k zápornému pólu výstupního vedení z nabíječky. Zároveň musí být k dispozici během nabíjení jakéhokoli akumulátoru.
- TSMP musí být realizovány jako 4 mm banánkové konektory dimenzované na vhodnou úroveň napětí, musí mít červenou barvu a musí být označeny štítky „HV+“ a „HV-“.
- Každý měřicí bod TSMP musí být zabezpečen rezistorem omezujícím proud. Hodnota rezistoru je dána podle napětí trakčního akumulátoru. Při technické inspekci musí být umožněno přímé měření hodnoty tohoto odporu.
- Žádný TSMP nesmí obsahovat dodatečnou nadproudovou ochranu. [1]

Tabulka 1: Hodnoty omezovacích rezistorů (převzato z [1]).

Maximální napětí trakčního systému (U_{max})	Hodnota rezistoru
$U_{max} \leq 200$ V DC	5 k Ω
200 V DC < $U_{max} \leq 400$ V DC	10 k Ω
400 V DC < $U_{max} \leq 600$ V DC	15 k Ω

Měřicí body trakčního systému TSMP budou na čtyřkolce taktéž instalovány. Je tedy nutné provést výpočet velikosti omezujícího rezistoru R_{TSMP} . Potřebujeme tedy znát velikost napětí v trakčním systému U_{max} , které zde uvažujeme rovné jmenovitému (nominálnímu) napětí akumulátoru U_{bat_nom} . Akumulátor, který bude na čtyřkolce osazen, má 3 bateriové segmenty spojené do série, přičemž každý segment obsahuje 21 článků sériově a 9 článků paralelně. Jeden segment se tedy skládá celkem ze 189 článků. Napětí jediného článku je 3,6 V. Napětí trakčního systému U_{max} , resp. U_{bat_nom} , lze pak vypočítat jako:

$$\begin{aligned}
 U_{bat_nom} &= \text{počet čl. v sérii} \cdot U_{\text{čl}} \cdot \text{počet segmentů akumulátoru} \\
 &= 21 \cdot 3,6 \cdot 3 = 226,8 \text{ V},
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

kde $U_{\text{čl}}$ (V) je napětí jednoho článku baterie. Z výše uvedené tabulky (Tabulka 1) je tedy zřejmé, že bude potřeba použít omezovací odpor R_{TSMP} o velikosti 10 k Ω . Pokud bychom chtěli vypočítat skutečně maximální napětí akumulátoru U_{bat_max} , museli bychom ve výpočtu uvažovat maximální napětí článků, které při plném nabití činí 4,2 V. Hodnota U_{bat_max} potom vyjde 264,6 V a je tedy vidět, že omezovací rezistor 10 k Ω je stále odpovídající.

1.3.9 Indikátor trakčního systému (TSAL)

- Vozidlo musí obsahovat světelný indikátor trakčního systému TSAL, který se musí rozsvítit, když je systém GLV pod napětím, aby tak indikoval stav trakčního systému. Indikátor musí být řízen přímo napětím trakčního systému, není povoleno softwarové ovládání.
- Pokud napětí vně akumulátorového kontejneru překročí hranici vysokého napětí, tedy hodnotu napětí vyšší než 60 V DC nebo 25 V AC RMS, musí indikátor blikat červenou barvou frekvencí 2 až 5 Hz.
- Pokud je napětí vně akumulátorového kontejneru nižší, než je hranice vysokého napětí, indikátor musí trvale svítit zelenou barvou. [1]

Indikátor trakčního systému je důležitým vizuálním bezpečnostním prvkem, který okamžitě na první pohled indikuje stav trakčního systému. Bude proto vhodné použití tohoto prvku zachovat.

1.4 Elektrický systém

1.4.1 Kryty

- Nevodivé materiály nebo kryty musí zabránit neúmyslnému kontaktu s jakoukoli částí trakčního systému. Kryty musí být bezpečné a dostatečně pevné. Odnímatelná karoserie není vhodná k uzavření spojů trakčního systému.
- Kontakt jakéhokoli spoje trakčního systému se 100 mm dlouhou izolovanou testovací sondou o průměru 6 mm nesmí být možný, pokud jsou kryty trakčního systému umístěny na svých pozicích.
- Komponenty trakčního systému a akumulátorového kontejneru musí být chráněny proti vlhkosti, dešti nebo stojící vodě. Doporučuje se stupeň krytí IP65. [1]

1.4.2 Izolace

- Izolační materiál musí být schopen přizpůsobit se očekávaným okolním teplotám a musí mít minimální teplotní třídu 90 °C.
- Izolační páska nebo barva mohou být součástí izolace, nesmí však být jedinou izolací. [1]

1.4.3 Elektroinstalace

- Všechny vodiče, svorky a další části pro vedení elektrické energie použité v trakčním systému musí být dimenzovány na hodnotu nepřetržitého proudu, který povedou.
- Veškerá kabeláž trakčního systému musí být označena průřezem vodiče a jeho teplotní a napěťovou třídou. Dále musí být dimenzována na teplotu vyšší nebo rovnou 90 °C.
- Dimenzování vodičů na nepřetržitý proud trakčního systému může být provedeno s uvažováním efektivní nebo střední hodnoty tohoto proudu nebo na základě předpokládané doby trvání průchodu maximálního proudu.
- Kabeláž trakčního systému musí být provedena dle profesionálních standardů s dostatečným odlehčením v tahu. Musí být chráněna před uvolněním v důsledku vibrací, a stejně tak musí být chráněna proti poškození rotujícími nebo pohyblivými díly. Nesmí se nacházet v místě, kde by mohla být zachycena nebo poškozena.
- Jakékoli vedení trakčního systému vedoucí mimo elektrické skříně musí být buď uzavřené v samostatné oranžové nevodivé trubce, nebo musí být provedeno pomocí oranžového stíněného kabelu. Zároveň musí buď procházet plně uzavřeným kontejnerem (karoserie se za kryt nepovažuje) nebo musí být trubka či stíněný vodič na každém svém konci bezpečně ukotvena tak, aby odolala působící síle o velikosti 200 N bez namáhání koncovky kabelu. Jakýkoli stíněný kabel musí mít toto stínění uzemněné.
- Kabeláž, která není součástí trakčního systému, nesmí používat oranžové kabely nebo trubky. [1]

1.4.4 Propojení

- Veškerá propojení trakčního systému musí být navržena tak, aby využívala záměrné vodivé cesty skrze vodiče. Ocelové šrouby se jako primární vodiče nevyužívají.
- Pokud jsou použity externí neizolované chladiče, musí být řádně uzemněny k zemi systému GLV.
- Všechna elektrická spojení včetně šroubů, matic a jiného spojovacího materiálu v cestě proudu trakčního systému musí být zajištěna proti neúmyslnému uvolnění pomocí uzamykacího mechanismu (závlačky, samojistné matice apod.) vhodného pro vysoké teploty. [1]

1.4.5 Oddělení napětí

- Trakční systém a systém uzemněného nízkého napětí (GLVS) musí být galvanicky zcela odděleny. Hranicí mezi trakčním systémem a systémem GLV je galvanická izolace mezi nimi. Některé komponenty, jako například trakční měnič, proto mohou být součástí obou těchto systémů.
- Nesmí existovat žádné spojení mezi šasi vozidla (nebo jinou vodivou částí, které by se mohla neúmyslně dotknout osoba) a jakoukoli částí trakčního systému.
- Součásti připojené k systému GLV, s výjimkou izolačních stykačů baterie (AIR), částí přednabíjecích a vybíjecích obvodů, DC/DC měničů, BMS, zařízení IMD, částí zařízení TSAL, energy meteru a ventilátorů, nesmí být umístěny uvnitř akumulátorového kontejneru.
- Pokud jsou trakční systém i systém GLV společně pod jedním krytem, musí být odděleny izolačními bariérami (navíc k izolaci vodičů) odolnými proti vlhkosti a dimenzované alespoň na 150 °C nebo musí být mezi vodiči dodrženy rozestupy uvedené v následující tabulce (Tabulka 2).

Tabulka 2: Vzdálenosti vodičů trakčního systému a systému GLV (převzato z [1]).

$U < 100 \text{ V DC}$	10 mm
$100 \text{ V DC} < U < 200 \text{ V DC}$	20 mm
$U > 200 \text{ V DC}$	30 mm

- Pokud jsou trakční systém a systém GLV na jedné desce plošného spoje, musí být na oddělených, jasně definovaných a jasně označených oblastech desky. [1]
Požadované rozestupy mezi vodivými cestami/oblastmi jsou následující:

Tabulka 3: Vzdálenosti mezi vodivými cestami/oblastmi na DPS s trakčním i GLV systémem (převzato z [1]).

Napětí	Vzdálenost		
	po povrchu	vzduchem	pod vrstvou „conformal coating“
0-50 V DC	1,6 mm	1,6 mm	1 mm
50-150 V DC	6,4 mm	3,2 mm	2 mm
150-300 V DC	9,5 mm	6,4 mm	3 mm
300-600 V DC	12,7 mm	9,5 mm	4 mm

1.4.6 Nadproudová ochrana

- Všechny napěťové systémy (s nízkým i vysokým napětím) musí mít odpovídající nadproudovou ochranu nebo pojistku.
- Není-li uvedeno jinak, všechna zařízení nadproudové ochrany musí být dimenzována na nejvyšší napětí, které se v chráněném systému vyskytuje. Nadproudové ochrany používané pro stejnosměrné systémy musí být pro tyto systémy přímo určeny a musí být dimenzovány na napětí rovné nebo vyšší než je napětí chráněného systému. Dále musí mít trvalý jmenovitý proud menší, než je jmenovitý trvalý proud, na který je dimenzováno chráněné zařízení, a musí být dimenzována na vyšší přerušovací proud, než je teoretický zkratový proud chráněného systému.
- Každý paralelní prvek paralelně řazených bateriových článků, kondenzátorů nebo vodičů musí mít svoji vlastní nadproudovou ochranu.
- Vodič, který následně vede proud celé této paralelní sady, musí být buď dimenzován na celkový proud, který je schopen jednotlivými nadproudovými ochranami projít nebo musí obsahovat dodatečnou nadproudovou ochranu.
- Články s vnitřní nadproudovou ochranou mohou být použity bez vnější nadproudové ochrany, pokud je vnitřní nadproudová ochrana správně dimenzována. [1]

1.4.7 Uzemnění

- Části vozidla, které jsou vzdálené 100 mm a méně od jakékoli části trakčního systému, musí mít izolační odpor vůči zemi systému GLV nižší než:
 - Elektricky vodivé části – 300 m Ω
 - Části, které se mohou stát elektricky vodivými (např. díly z uhlíkových vláken) – 5 Ω . [1]

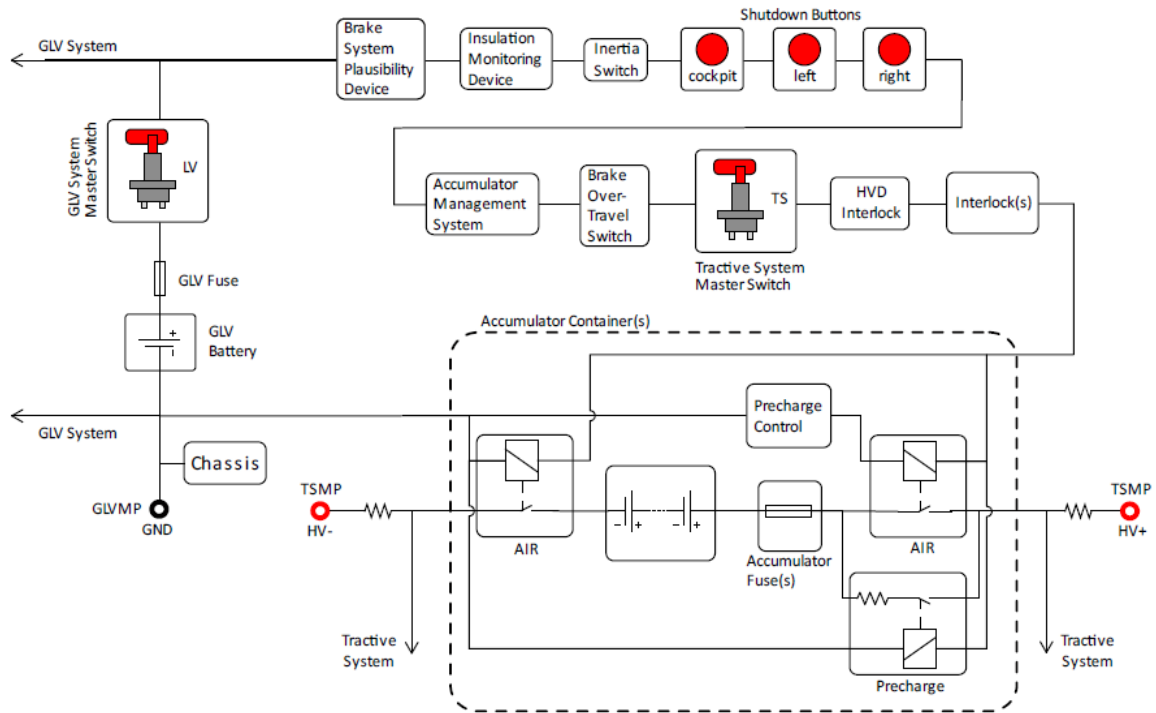
1.5 Vypínací systém

1.5.1 Vypínací obvod

- Vypínací obvod se skládá z několika komponentů zapojených do série. Jedná se o následující komponenty:
 - Battery Management System (BMS)
 - Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD)
 - Zařízení pro kontrolu plausibility (věrohodnosti) brzdového systému (BSPD)

- Blokování (dle potřeby)
 - Hlavní vypínače (GLVMS a TSMS)
 - Vypínací (nouzová) tlačítka
 - Bezpečnostní spínač brzdění (BOTS)
 - Setrvačný spínač
- Vypínacím obvodem prochází proud, který přímo napájí izolační stykače akumulátoru (AIR) a relé přednabíjecího obvodu.
 - Komponenty BMS, IMD a BSPD musí být kontakty typu NO (Normally Open). Dále musí mít zcela nezávislé obvody a jejich konstrukce musí být vyřešena tak, aby při poruše nemohla být elektrická energie přiváděna zpět do vypínacího obvodu.
 - Nouzové spínače, BOTS, TSMS, GLVMS a blokování musí přímým způsobem provést rozpojení vypínacího obvodu. [1]

Topologie vypínacího obvodu dle pravidel Formula SAE je velmi dobrým východiskem pro návrh vypínacího obvodu čtyřkolky, který bude vypadat obdobně a bude plnit v zásadě stejnou bezpečnostní funkci. Oproti formuli v něm však budou provedeny určité úpravy, které vychází z našich specifických potřeb pro tento projekt. O těchto úpravách bude řeč v následujících podkapitolách.



Obr. 2: Zapojení vypínacího obvodu dle pravidel Formula SAE (převzato z [1]).

1.5.2 Funkce vypínacího obvodu

- Vypínací obvod se musí otevřít, pokud nastane některá z následujících situací:
 - Zaúčinkuje kterákoli součást obsažená ve vypínacím obvodu
 - Jakékoli vypnutí systému uzemněného nízkého napětí (GLVS)
- Pokud se vypínací obvod otevře, musí se vypnout trakční systém a veškerý tok energie z akumulátoru se musí zastavit. Napětí v trakčním systému musí poklesnout pod úroveň nízkého napětí (napětí 60 V DC nebo 25 V AC RMS nebo nižší) a to maximálně do 5 sekund od rozpojení vypínacího obvodu. Dále se motory musí volně otáčet, nesmí na ně působit žádný točivý moment.
- Pokud je vypínací obvod otevřen z důvodu vybavení BMS, IMD nebo BSPD, trakční systém musí zůstat deaktivován, dokud nebude ručně vyresetován. [1]

1.5.3 Battery Management System (BMS)

- BMS musí monitorovat napětí akumulátoru a jeho teplotu, jednak pokud je trakční systém aktivní a jednak pokud je akumulátor připojen k nabíječce.
- BMS musí mít galvanické oddělení od jednotlivých segmentů akumulátoru.
- Pokud je vypínací obvod otevřený, je zakázáno balancování článků.

- BMS musí zaznamenávat hodnoty napětí a teploty mimo povolený rozsah, chybějící nebo přerušené měření napětí nebo teploty a musí detekovat chyby ve své vlastní funkci.
- Pokud BMS detekuje některou z uvedených chyb, musí rozpojit vypínací obvod a zapnout kontrolku BMS.
- Kontrolka BMS musí mít červenou barvu, musí být pro řidiče jasně viditelná i na přímém slunci a musí být označena nápisem „BMS“. [1]

System BMS bude přímo součástí akumulátorového kontejneru, který budeme přebírat z projektu elektrické motokáry. Jeho hlavní funkce budou pochopitelně zachovány, samotné měření napětí a teploty článků se však může od přesně definovaných pravidel lehce odchylovat. Informace o použitém systému BMS jsou stručně shrnuty v samostatné podkapitole (podkapitola 2.2.3)

1.5.4 Napětí akumulátoru

- BMS musí měřit napětí každého jednotlivého článku (pokud jsou jednotlivé články zapojeny paralelně, stačí pouze jedno měření).
- Napětí článků musí zůstat v povolených mezích uvedených v produktovém katalogu.
- Všechny vodiče sloužící ke snímání napětí musí mít buď nadproudovou ochranu, nebo musí být splněny následující podmínky – BMS je distribuovaný systém (měření jednoho článku na desku), délka snímacího vodiče je < 25 mm a deska BMS je vybavena nadproudovou ochranou. [1]

1.5.5 Teplota akumulátoru

- BMS musí měřit teplotu kritických bodů akumulátoru.
- Teplota musí zůstat nižší, než je teplotní limit uvedený výrobcem, v každém případě však nesmí přesáhnout 60 °C.
- Teploty článků se musí měřit na záporném pólu příslušného článku, přičemž snímač teploty musí být připojen buď přímo na záporném pólu, nebo na přípojnicí záporného pólu, maximálně však 10 mm od pólu článku.
- U akumulátorů na bázi lithia musí být teplota monitorována minimálně u 20 % článků, monitorované články by měly být v akumulátorovém kontejneru rozmístěny co nejrovnoměrněji. [1]

1.5.6 Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD)

- Vozidlo musí být vybaveno zařízením pro sledování izolačního stavu IMD umístěným v trakčním systému.
- IMD musí být Bender ISOMETER® IR155-3203 nebo IR155-3204 nebo ekvivalentní IMD schválené pro použití v automobilech.
- Hodnota odezvy IMD musí být nastavena na 500 Ω/V nebo vyšší v závislosti na maximálním provozním napětí trakčního systému.
- V případě selhání izolace nebo poruchy IMD musí IMD rozpojit vypínací obvod a rozsvítit kontrolku. Tato kontrolka musí mít červenou barvu, musí být pro řidiče viditelná i na přímém slunci a musí být označena nápisem „IMD“. [1]

1.5.7 Zařízení pro kontrolu plauzibility brzdového systému (BSPD)

- Vozidlo musí mít samostatný neprogramovatelný obvod BSPD pro kontrolu současného prudkého brzdění a toku energie ze střídače do motoru.
- BSPD musí být použito navíc k systému APPS/kontrola brzdového pedálu.
- BSPD musí rozpojit vypínací obvod při prudkém brzdění (bez zablokování kol) a při současném dodávání výkonu o mezní hodnotě 5 kW ze stejnosměrného meziobvodu do motorů při jmenovitém napětí baterie.
- Vypínací obvod může být rozpojen se zpožděním 0,5 s, aby se zabránilo chybným vyhodnocením a nechtěným rozpojením vypínacího obvodu.
- BSPD musí rozpojit vypínací obvod také v případě přerušení nebo zkratu vstupu od senzorů. [1]

Vzhledem k tomu, že čtyřkolka bude mít oddělenou přední a zadní mechanickou brzdu, přičemž při stlačení kterékoli z nich bude generován požadavek na nulový moment motoru (viz. podkapitola 1.2.7), je zřejmé, že systém BSPD by v našem případě neplnil požadovanou funkci. Navíc při použití žádné z brzd nechceme rozpojovat vypínací obvod. Systém BSPD tedy nebude na čtyřkolce implementován.

1.5.8 Hlavní vypínače

- Každé vozidlo musí být vybaveno dvěma hlavními vypínači (GLVMS a TSMS), které musí pracovat přímo, nikoli přes relé nebo jiný logický obvod.

- Hlavní vypínač uzemněného systému nízkého napětí (GLVMS) musí úplně vypnout veškeré napájení systému GLV. Vypínač musí být umístěn uprostřed červené kruhové oblasti o průměru minimálně 50 mm a musí být označen nápisem „LV“.
- Hlavní vypínač trakčního systému (TSMS) musí rozpojovat vypínací obvod v pozici OFF. Ve vypínacím obvodu musí být umístěn jako poslední součást před izolačními stykači akumulátoru (AIR), kromě přednabíjecích obvodů a blokování. Musí být umístěn uprostřed oranžové kruhové oblasti o průměru minimálně 50 mm, musí být označen nápisem „TS“ a symbolem dle ISO 7010-W012 (trojúhelník s černým bleskem na žlutém pozadí). Taktéž musí být vybaven funkcí uzamčení v poloze OFF.

[1]

Jelikož hlavní vypínače plní v rámci systému vozidla důležitou funkci, budou v každém případě osazeny i na čtyřkolce, přičemž zůstanou zachovány veškeré požadavky na ně kladené.

1.5.9 Vypínací tlačítka

- Na vozidle musí být nainstalována tři nouzová vypínací tlačítka.
- Jedná se o nouzové spínače typu „push-pull“ nebo „push-rotate“.
- První dvě tlačítka se nacházejí na obou stranách vozidla a jsou umístěna za kokpitem řidiče přibližně na úrovni jeho hlavy. Musí mít minimálně 40 mm v průměru a nesmí být snadno demontovatelná nebo umístěna na odnímatelné části karoserie.
- Třetí vypínací tlačítko je umístěno přímo v kokpitu v blízkosti volantu tak, aby bylo pro řidiče dobře dosažitelné. Minimální průměr je 24 mm.
- Každé vypínací tlačítko musí být označeno mezinárodním symbolem pro nouzové odpojení baterie – červený blesk na modrém trojúhelníku s bílým okrajem.
- Stisknutím libovolného vypínacího tlačítka se rozpojí vypínací obvod. [1]

Pro naše účely si můžeme dovolit vynechat obě postranní vypínací tlačítka. Tato tlačítka na formuli slouží pro případ havárie, kdy by řidič zůstal zaklíněn v kokpitu a postranní vypínací tlačítka tak mohla být stále stisknuta jinou osobou zvenku. Vzhledem k tomu, že na čtyřkolce nesedí jezdec v žádném uzavřeném kokpitu a riziko zaklínění je nízké, bude dostačující použít pouze jedno vypínací tlačítko umístěné přímo na řídítkách.

1.5.10 Bezpečnostní spínač brzdění (BOTS)

- Vozidlo musí být vybaveno bezpečnostním spínačem brzdění BOTS. Pokud dojde k selhání brzdového systému a brzdový pedál přesáhne normální rozsah sešlápnutí, aktivuje se spínač BOTS.
- BOTS musí být mechanický jednopólový dvupolohový spínač typu Push-Pull nebo typu Flip.
- Stisknutím BOTS se spínač dostane do vypnuté polohy (OFF) a musí rozpojit vypínací obvod.
- Opakované spínání BOTS nesmí obnovit tok energie v trakčním systému vozidla.
- Řidič nesmí být schopen resetovat BOTS.
- Spínač musí být implementován s analogovými komponenty a nesmí používat žádný programovatelný logický kontrolér, řídicí jednotku pohonu nebo podobné digitální kontroléry. [1]

V případě našeho projektu spínač BOTS vynecháme. Pákovou brzdu lze za použití větší síly přitáhnout až k rukojeti řídítek, kde její dráha nutně musí skončit, avšak se nejedná o přesáhnutí normálního rozsahu brzdy. Bude však muset být implementován jiný způsob pro kontrolu správné funkce brzd, který například v případě ztráty signálu od některé z nich zajistí bezpečné zastavení vozidla a znemožní pokračování v jízdě.

1.5.11 Setrvačný spínač

- Musí se jednat konkrétně o „Sensata Resetable Crash Sensor“ nebo jeho ekvivalent.
- Musí být pevně mechanicky připevněn k vozidlu, přičemž musí být odnímatelný pro účely testování.
- Spínač musí rozepnout při nárazovém zatížení, které vozidlo zpomalí přetížením 8 až 11 g v závislosti na době zpomalování (charakteristika uvedena v produktovém katalogu Sensata).
- Setrvačný spínač musí při svém zapůsobení rozpojit vypínací obvod.
- Musí zůstat rozpojený, dokud není manuálně resetován.
- Může být resetován řidičem přímo z kokpitu. [1]

Setrvačný spínač je poměrně důležitý bezpečnostní prvek, jelikož při prudkém nárazu vozidla musí být bezpodmínečně odpojen jeho trakční systém. Pro čtyřkolku však bude provedena určitá modifikace této funkce. Namísto setrvačného spínače bude použit

akcelerometr a gyroskop, které jsou integrovány společně v jednom pouzdře. Akcelerometr se uplatní především v případě prudkého nárazu, kdy zaznamená velké přetížení v dané ose a na základě toho se rozpojí vypínací obvod tak, jak by tomu bylo i v případě setrvačného spínače. Gyroskop pak bude plnit důležitou funkci při měření náklonu čtyřkolky, ať už kvůli detekci převrácení na bok nebo pro určení úhlu náklonu při prudkém zrychlování, kdy by čtyřkolka měla tendenci stavět se na zadní kola. Gyroskop bude komunikovat s hlavní řídicí jednotkou, která bude dále komunikovat s řídicí jednotkou motoru po sběrnici CAN a v případě nepřipustného náklonu dozadu upraví požadavek na točivý moment tak, aby nedošlo k převrácení vozidla. V případě převrácení na bok může být taktéž rozpojen vypínací obvod.

1.6 Požadavky na nabíječky

1.6.1 Vlastnosti nabíječky

- Nabíječka musí mít galvanicky oddělený vstup (AC) od výstupu (DC).
- Pokud je pouzdro nabíječky vodivé, musí být připojeno k uzemnění AC vstupu.
- Všechna připojení nabíječky musí být izolována a zakryta.
- Konektory nabíječky musí plnit funkci, která zajistí, aby byl konektor pod napětím, pouze pokud je správně připojen k akumulátoru.
- Vysokonapěťové nabíjecí kabely musí být oranžové.
- Nabíječka musí mít instalované dva měřicí body trakčního systému (TSMP).
- Nabíječka musí obsahovat vypínací tlačítko, které je řešeno jako nouzový spínač typu „push-pull“ nebo „push-rotate“, minimální průměr je 25 mm a je označeno mezinárodním symbolem – červeným bleskem na modrém trojúhelníku s bílým okrajem. [1]

1.6.2 Vypínací obvod nabíjení

- Vypínací obvod nabíjení se skládá z vypínacího tlačítka nabíječky, systému BMS a zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD).
- BMS a IMD musí fungovat jako kontakty typu NO (Normally Open) a mají zcela nezávislé obvody. Jejich konstrukce musí být vyřešena tak, aby při poruše nemohla být elektrická energie přiváděna zpět do vypínacího obvodu nabíjení. [1]

1.6.3 Funkce vypínacího obvodu nabíjení

- Při nabíjení musí být funkční systémy BMS a IMD, které sledují akumulátor. Pokud je zjištěna porucha nebo překročení mezních hodnot, rozpojí se vypínací obvod nabíjení.
- V případě rozpojení vypínacího obvodu nabíjení musí být okamžitě zastavena dodávka energie do akumulátoru, do 5 s musí klesnout napětí v trakčním systému minimálně na hodnotu nízkého napětí (60 V DC nebo 25 V AC RMS), nabíječka se musí vypnout a v neaktivním stavu setrvá, dokud nebude manuálně vyresetována. [1]

1.7 Operace s vozidlem

1.7.1 Vysazení z činnosti (Lockout)

- Při jakýchkoli pracích na vozidle musí být hlavní vypínač trakčního systému (TSMS) uzamčen v poloze OFF. [1]

1.7.2 Aktivační sekvence

- Nejprve se musí aktivovat systém uzemněného nízkého napětí (GLVS). Až poté, co je GLVS pod napětím, může být uzavřen vypínací obvod.
- Poté dojde k aktivaci trakčního systému, což je definováno tak, že je vysoké napětí přítomno mimo akumulátorový kontejner. Trakční systém nesmí být aktivní, dokud:
 - systém GLV není pod napětím
 - není uzavřen vypínací obvod
- Následuje fáze „připraveno k jízdě“. Ta je definována tak, že motory vytvářejí odezvu na signál ze snímače pozice plynového pedálu (APPS). Sešlápnutím plynového pedálu je již tedy řízen trakční měnič. Fáze „připraveno k jízdě“ nesmí nastat, dokud:
 - trakční systém není aktivní
 - není sešlápnut brzdový pedál a tím nedošlo k aktivaci mechanických brzd
 - řidič nestiskl inicializační tlačítko pro připravenost k jízdě
- Po dosažení fáze „připraveno k jízdě“ se z vozidla ozve charakteristický zvuk, který jednoznačně signalizuje připravenost k jízdě. [1]

Tato aktivační sekvence bude u naší čtyřkolky dodržena, jelikož se jedná o logickou funkční návaznost jednotlivých systémů. Důležitým bezpečnostním prvkem celé sekvence je podmínka sešlápnutí brzdového pedálu/páky a aktivace mechanických brzd k dosažení fáze „připraveno k jízdě“. Tento krok je podmínkou pro uvedení vozidla do pohybu, přičemž zajišťuje bezpečné zabrzdění vozidla ve chvíli, kdy motory již mohou reagovat na požadavek na točivý moment zadávaný plynovou pákou. Z tohoto důvodu bude tato podmínka implementována.

2 Definice klíčových komponentů elektrické čtyřkolky

V této kapitole budou podrobněji specifikovány klíčové komponenty, kterými bude čtyřkolka postupně osazena. U jednotlivých komponentů se zaměřím na jejich funkci, parametry a důvody, které vedly k jejich výběru a použití. Bude taktéž definován jejich způsob komunikace v rámci celého systému. Kapitola je rozdělena do dvou částí, kdy každá část zahrnuje komponenty, které jsou v rámci systému připojeny k dané řídicí jednotce nebo jsou součástí některého funkčního celku. Všechny zde popsané komponenty jsou součástí výsledného topologického schématu, které je uvedeno a blíže popsáno v kapitole 4. V příloze A je pak k nalezení i sestavený kusovník pro objednávku vybraných klíčových komponentů.

2.1 Hlavní řídicí jednotka

Hlavní řídicí jednotka bude osazena v přední části čtyřkolky a bude sloužit pro sběr dat a signálů z jejích ovládacích, bezpečnostních a měřicích prvků. Na tuto řídicí jednotku bude připojen zejména snímač pozice plynového pedálu, resp. páky, akcelerometr a gyroskop, signály z páky a pedálu ovládajících mechanické brzdy, senzory rychlosti předních kol a ovladač světel. Prostřednictvím Bluetooth bude hlavní řídicí jednotka také získávat hodnoty tlaku v jednotlivých pneumatikách z bezdrátových senzorů v podobě ventilků. Řídicí jednotka bude data a signály ze zmíněných komponentů zpracovávat a dále komunikovat s dalšími jednotkami prostřednictvím dvojice sběrnic CAN – CAN 1 a CAN 2. Po rychlé sběrnici CAN 1 bude probíhat výhradně komunikace s řídicí jednotkou motoru. Po sběrnici CAN 2 pak bude probíhat komunikace s kontroléry předních a zadních světel a přenos informací na displej. Na displej se bude přenášet údaj o aktuální rychlosti získaný a vypočítaný na základě signálů ze senzorů rychlosti předních kol, s tím související vypočítaná ujetá vzdálenost a také naměřené hodnoty tlaku v jednotlivých pneumatikách. Hlavní řídicí jednotka bude navíc schopna zaznamenávat a ukládat definované časové úseky důležitých hodnot, které získá z připojených komponentů. Na sběrnici CAN 2 bude připojen diagnostický konektor, jehož prostřednictvím bude možné tato zaznamenávaná data z řídicí jednotky vyčíst. Tato funkce se uplatní především při budoucím ožívování čtyřkolky nebo v případě poruchových stavů, kdy bude nutné zjistit, co této poruše předcházelo. Z tohoto popisu je zřejmé, že po sběrnici CAN 1 budou vysílána prioritní data přímo související s řízením pohonu čtyřkolky, zatímco sběrnice CAN 2 bude obsahovat zprávy spíše

informativního charakteru či povely pro ovládání méně důležitých komponentů. Podrobný popis komunikací je obsahem příští kapitoly této práce.

Co se týče požadavků na hlavní řídicí jednotku, je zřejmé, že jejím nezbytným vybavením musí být 2x rozhraní CAN, sériové rozhraní SPI, kvadrurní enkodér pro zpracování signálů ze snímačů otáček předních kol a pochopitelně dostatečný počet digitálních vstupů a výstupů (GPIO). V následujících podkapitolách budou blíže specifikovány komponenty připojené k této řídicí jednotce.

2.1.1 Snímač pozice plynového pedálu (APPS)

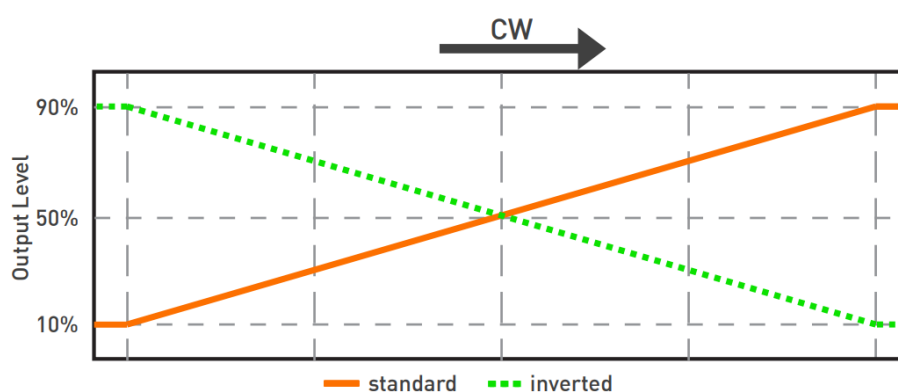
V minulosti byl u vozidel se spalovacím motorem plynový pedál mechanicky spojen se škrticí klapkou, pomocí které se řídilo množství směsi nasávané do motoru. První systém elektronického ovládání plynu (ETC – Electronic Throttle Control) byl představen v 90. letech 20. století [3]. Tento systém zahrnoval senzor pozice plynového pedálu (APPS), senzor pozice škrticí klapky, aktuátor pohybující škrticí klapkou a pochopitelně řídicí jednotku tohoto systému [3]. Zavedení systému ETC umožnilo implementaci pokročilých funkcí, jako je například tempomat [3]. V případě vozidel s elektrickým pohonem tento systém zahrnuje pouze snímač APPS a řídicí jednotku motoru. Snímač APPS pracuje samozřejmě zcela stejně. Na APPS je kladena celá řada nároků, mezi nimi například požadavek na vysokou linearitu, nízkou hysterezi, malý offset a nízkou změnu citlivosti v závislosti na teplotě a čase [3]. Mezi hlavní bezpečnostní požadavky na snímač APPS potom patří typicky detekce zkratu či přerušení vodiče a redundantní výstup [3]. Existují 3 hlavní typy snímačů APPS – odporové, magnetické a indukční. Magnetické snímače APPS pracují na principu Hallova jevu a stejně tak jako snímače indukční umožňují bezkontaktní snímání, což je nesporná výhoda. Kontaktní odporové snímače, které jsou náchylné na otřesy, vlhkost a postupem času dochází k degradaci jejich odporové dráhy, jsou vhodné skutečně pouze do těch nejjednodušších a nejlevnějších aplikací.

Jako vhodný snímač pozice plynového pedálu pro projekt čtyřkolky byl vybrán rotační senzor PST-360 od firmy Piher sensing systems. Tento snímač je založen na Hallově efektu, což splňuje požadavek na bezkontaktní snímání. Dle katalogu výrobce [4] je možné snímat úhel natočení v rozsahu 360°, přičemž linearita senzoru je v rozsahu ± 1 %. Výstup ze snímače může být realizován analogově, pomocí PWM, sériového protokolu SPI nebo prostřednictvím protokolu CAN SAE J1939. Důležitá je také možnost využití redundantního

výstupu, což nám z bezpečnostních důvodů přímo ukládají návrhová pravidla uvedená v první kapitole. Senzor má dle výrobce životnost až 50 milionů cyklů a disponuje krytím IP67. Vybrána je tedy varianta s napájecím napětím 5 V a analogovým redundantním výstupem v rozsahu 0,5 – 4,5 V, v závislosti na natočení snímače.



Obr. 3: Snímač pozice plynového pedálu PST-360 (převzato z [4]).



Obr. 4: Ukázka redundantního výstupu snímače (převzato z [4]).

Snímač APPS nebude na čtyřkolce plnit pouze funkci snímače plynového pedálu, tedy zadávat požadavek na kladný točivý moment motoru, ale bude sloužit i pro funkci rekuperační brzdy. V určitém počátečním rozsahu úhlů natočení snímače (např. 0° - 90°) bude signál ze senzoru řídit požadavek na rekuperaci energie. Tok energie tedy bude v tomto režimu směřovat z motoru do trakčního akumulátoru a ten se tak bude dobíjet. V případě jeho plného nabití tato funkce nebude možná a jezdec bude nucen použít brzdy mechanické. Ve zbylém rozsahu úhlů natočení již bude senzor vysílat požadavek na kladnou hodnotu točivého momentu motoru. Tímto řešením plynového pedálu budeme schopni dosáhnout podobného chování vozidla jako je tomu u vozidel se spalovacím motorem. Po ubrání plynu tedy bude čtyřkolka automaticky „brzdit motorem“, jak jsme zvyklí právě ze spalovacích vozidel.

Co se týče samotného požadavku na rekuperaci, existují v zásadě dvě možnosti. Požadavek může být buď momentový, jako je tomu při akceleraci, nebo otáčkový. Momentový požadavek by spočíval v zadávání požadované hodnoty momentu. Tento požadavek by pak při rekuperačním brzdění klesal po definované rampě. Druhou možností je zadávat při rekuperačním brzdě požadavek na otáčky motoru, který by se v průběhu brzdění plynule snižoval až na nulovou hodnotu. Poloha plynové páky v oblasti pro rekuperační brzdu by určovala strmost poklesu hodnoty tohoto požadavku. Použití požadavku na otáčky je nevhodné pro akceleraci, jelikož následkem takového řízení jsou velké špičky točivého momentu, což je speciálně u vozidel nežádoucí. V případě rekuperační brzdy se však toto řešení jeví jako vyhovující a prozatím se počítá s jeho implementací.

Snímač APPS bude pomocí lanka mechanicky spojen s plynovou páčkou na palec umístěnou na říditkách. Snímač bude vysílat analogové signály (hlavní a redundantní) do hlavní řídicí jednotky, která bude následně komunikovat s řídicí jednotkou motoru prostřednictvím sběrnice CAN 1.

2.1.2 Akcelerometr a gyroskop

Akcelerometr a gyroskop budou integrovány ve společném pouzdře integrovaného obvodu. Tento obvod bude umístěn na desce (Interface deska) společně s hlavní řídicí jednotkou a dalšími potřebnými obvody, ze které bude napájen napětím 3,3 V. S hlavní řídicí jednotkou bude komunikovat pomocí sériové sběrnice SPI. Akcelerometr bude nahrazovat setrvačný spínač, který je vyžadován pravidly Formula SAE. Pokud akcelerometr zaznamená prudký náraz, tedy skokový nárůst přetížení v dané ose, bude iniciovat rozpojení vypínacího obvodu. Velikost přetížení, které způsobí rozpojení vypínacího obvodu, bude nastavena na hodnotu 3 g. Takovéto hodnoty přetížení již není možné dosáhnout ani prudkou akcelerací, ani prudkým brzděním. Takové přetížení může skutečně nastat jen při nestandardní situaci, jakou je právě náraz. Proto v takovém případě vždy raději automaticky odpojíme trakční systém. Gyroskop pak bude využit k měření náklonu čtyřkolky kolem osy Y, což je případ, kdy se čtyřkolka staví na zadní kola. Údaje o velikosti úhlu tohoto náklonu budou z hlavní řídicí jednotky posílány po sběrnici CAN 1 do řídicí jednotky motoru. Ta pak bude schopna upravit požadavek na moment motoru v případě, že by náklon dosáhl definované mezní hodnoty. Pomocí gyroskopu budeme také schopni detekovat převrácení čtyřkolky. V takovém případě gyroskop taktéž zajistí rozpojení vypínacího obvodu, tedy odpojení trakčního systému.

Vhodným integrovaným obvodem, který v sobě kombinuje akcelerometr s gyroskopem, může být například obvod ASM330LHH od firmy STMicroelectronics, který je přímo určen pro oblast automotive, kde může sloužit například právě pro detekci nárazu. Katalog výrobce [15] je uveden v seznamu literatury.

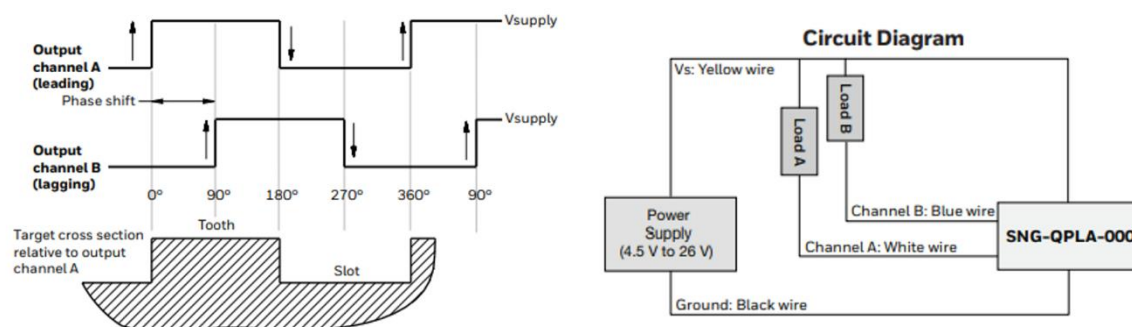
2.1.3 Snímače rychlosti předních kol

Obě přední kola čtyřkolky budou osazena snímači rychlosti jejich otáčení. Otáčky zadních kol budou vyhodnocovány pomocí zpětné vazby od otáček rotoru, která musí být zavedena kvůli řízení pohonu, a známého převodového poměru, který bude v našem případě konstantní. Převod bude pochopitelně do pomala, měřené otáčky rotoru se tedy budou muset převodovým poměrem dělit. Zadní náprava je pevná, kola se tedy nemohou otáčet nezávisle na sobě. Díky znalosti rychlosti otáčení předních i zadních kol a možnosti jejich vzájemného porovnání budeme schopni řešit například případy prokluzu hnaných kol či implementovat nějaký ze systémů kontroly trakce. V takových případech bude možné upravit točivý moment motoru pro dosažení lepší trakce.

Jako vhodný snímač rychlosti otáčení kol byl vybrán senzor SNG-QPLA-000 od firmy Honeywell. Následující informace pocházejí z katalogu výrobce [9]. Jedná se o kvadrurní snímač rychlosti a směru otáčení založený na principu Hallova jevu. Z hlediska použití pro čtyřkolku má dostatečný rozsah pracovních teplot ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) a stupeň krytí IP69. Je použitelný pro měření otáček v rozsahu 3 Hz až 20 kHz. Rozsah napájecího napětí je 4,5 až 26 V, napájecí proud dosahuje maximálně 18 mA, normálně 12 mA. Výstupní signál má podobu dvou obdélníkových signálů (kanály A a B, stav HIGH odpovídá napájecímu napětí poníženému maximálně o 0,5 V, stav LOW je pak maximálně 0,5 V), které jsou vzájemně posunuty o 90° . Díky tomu tedy budeme schopni určovat rychlost i směr otáčení kol.



Obr. 5: Snímač rychlosti a směru otáčení SNG-QPLA-000 (převzato z [9]).



Obr. 6: Ukázka výstupu ze snímače a jeho zapojení (převzato z [9]).

2.1.4 Systém pro měření tlaku v pneumatikách (TPMS)

Systém pro měření tlaku v pneumatikách TPMS je jedním z doplňkových systémů, který by na čtyřkolce našel své využití. Podhuštění pneumatik je častým problémem u všech druhů vozidel. Nízký tlak v pneumatikách má přitom za následek zvýšené opotřebení pneumatik, tedy zkrácení jejich životnosti, vyšší spotřebu elektrické energie potřebné pro pohon vozidla a celkově má negativní dopad na jeho jízdní vlastnosti, včetně prodloužení brzdné dráhy. Z těchto důvodů bude výhodné tlak v pneumatikách monitorovat s využitím přímého snímače, který bude schopen měřit přesnou hodnotu tlaku v každé z pneumatik. Snímač bude mít podobu ventilku a bude tedy integrován přímo v pneumatice čtyřkolky. Jako vhodný produkt byl zvolen snímač tlaku od firmy Sensata Technologies, nalezený pod názvem „Intelligent Tire Solutions TPM Sensor equipped with Bluetooth® wireless technology“. Katalog k tomuto produktu [17] říká, že snímač komunikuje pomocí technologie Bluetooth a je kompatibilní s jeho verzí 5.1. Dále je konstruován pro dlouhou výdrž jeho baterie, která dosahuje až deseti let. Jeho implementování by tak mělo být poměrně pohodlné a jeho provoz téměř bezúdržbový.



Obr. 7: Snímač tlaku v pneumatikách (převzato z [17]).

2.2 Vypínací obvod a trakční systém

V této části budou blíže popsány komponenty, které jsou součástí bezpečnostního vypínacího obvodu nebo trakčního systému. Jedná se tedy především o komponenty, které plní bezpečnostní funkce, o trakční akumulátor, výkonový měnič a elektromotor.

2.2.1 Hlavní vypínače GLVMS, TSMS a palubní baterie

V obou případech se jedná o vypínače, které jsou nutnou součástí systému čtyřkolky. GLVMS (hlavní vypínač uzemněného systému nízkého napětí) slouží k odpojení palubní baterie nízkého napětí, resp. celé palubní sítě, která napájí veškeré systémy čtyřkolky (pochopitelně kromě trakčního obvodu), včetně bezpečnostního vypínacího obvodu. Vypínač TSMS (hlavní vypínač trakčního systému) je pak přímo součástí vypínacího obvodu a slouží výhradně pro rozpojení izolačních stykačů akumulátoru (AIR), tedy pro odpojení trakčního systému. Jako vhodné komponenty pro realizaci těchto prvků byly vybrány manuální otočné vypínače baterie 08010100, které jsou konstruované přímo pro odpojování palubních 12 V, popřípadě 24 V baterií. Katalog výrobce [13] je uveden v seznamu literatury. Konkrétní požadavky na oba vypínače jsou uvedeny v první kapitole v pravidlech Formula SAE.



Obr. 8: Hlavní vypínač baterie 08010100 (převzato z [13]).

Jako palubní baterie bude osazena lithium-iontová motobaterie o napětí 12 V. Aby se nemuselo řešit nabíjení baterie mimo vozidlo, bude na čtyřkolce osazen DC/DC měnič s galvanickým oddělením připojený přímo k trakčnímu obvodu, který bude sloužit jako

nabíječ této palubní baterie. V případě provozu čtyřkolky bude energie spotřebovávaná veškerými obvody a komponenty hrazena z trakčního systému, resp. z trakčního akumulátoru. Při odpojení trakčního obvodu nebo při úplném vyjmutí akumulátorového kontejneru bude pak palubní baterie nadále napájet veškeré nízkonapěťové systémy vozidla. Bude tak nadále možné některé tyto systémy používat nebo například provádět diagnostiku. Vzhledem k tomu, že přímo z palubní baterie nebudou systémy nikdy napájeny po dobu delší než několik hodin, bude naprosto dostačující zvolit baterii o kapacitě 6 Ah. Při samotné jízdě se pak palubní baterie opět dobije z trakčního akumulátoru. Zapojení je uvedeno v podkapitole 4.5 na Obr. 25.

2.2.2 Vypínací tlačítko

Nouzová vypínací tlačítka (E-Stop) jsou běžnou součástí veškerých elektrických zařízení, kde hrozí například zachycení některou pohyblivou částí stroje, úraz elektrickým proudem nebo se používá k rychlému řešení nebezpečných stavů stroje. Na čtyřkolce je tento vypínač součástí vypínacího obvodu a bude sloužit k nouzovému rychlému odpojení trakčního systému v případech, kdy jezdec vyhodnotí hrozící nebezpečí, avšak nenastanou podmínky pro automatické odpojení trakčního systému. Tlačítko bude umístěno v prostoru řídicích a dle pravidel musí mít průměr minimálně 24 mm (platí pro tlačítko v kokpitu formule). Vybrané tlačítko FF0116BACAEA01 od výrobce NKK Switches má podle katalogu [14] průměr 25 mm, je tedy po všech stránkách vyhovující.



Obr. 9: Nouzový vypínač FF0116BACAEA01 (převzato z [14]).

2.2.3 Systém BMS

Systém BMS je tvořen dvěma typy řídicích desek. Jedná se o desku Slave BMS a desku Master BMS. Systém BMS je součástí akumulátorového kontejneru, který pro elektrickou čtyřkolku kompletně převezmeme z projektu elektrické motokáry. Návrhem a realizací systému BMS se zabývá diplomová práce s názvem „Konstrukce trakční baterie motokáry“, jejímž autorem je Bc. Jiří Studnička. Následující informace o systému BMS jsou čerpány z právě z ní. Tímto se na tuto práci odkazují do seznamu literatury [19].

Deska Slave BMS slouží pro měření napětí na 21 sériově spojených článcích baterie a k jejich pasivnímu balancování. Dále pomocí NTC termistorů monitoruje 28 externích teplot článků a také 2 teploty přímo na desce plošného spoje. Jelikož trakční baterie se skládá ze tří segmentů, přičemž každý je ve složení 21 článků sériově a 9 článků paralelně, je zřejmé, že jedna deska Slave BMS se stará právě o jeden segment. Jeden segment tvoří 189 článků. Počet článků, na kterých je monitorována teplota, tedy činí 15 % z jejich celkového počtu, což nevyhovuje pravidlům Formula SAE. Ty vyžadují monitorování teploty minimálně u 20 % článků. Pro naše účely však toto zanedbáme. Deska Slave BMS dále obstarává detekci přepětí či podpětí článků, detekci jejich přehřátí a komunikaci se zbylými dvěma deskami Slave BMS a deskou Master BMS.

Součástí akumulátorového kontejneru je jedna deska Master BMS. Ta zajišťuje sběr naměřených dat z desek Slave BMS a následně komunikaci po sběrnici CAN. Její důležitou úlohou je ovládání bezpečnostního vypínacího obvodu, jehož je součástí. V případě naměření teploty či napětí článků mimo definovaný rozsah zajistí jeho rozpojení. Stejným způsobem se zachová v případě zjištění poruchy ve funkci systému BMS.

2.2.4 Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD)

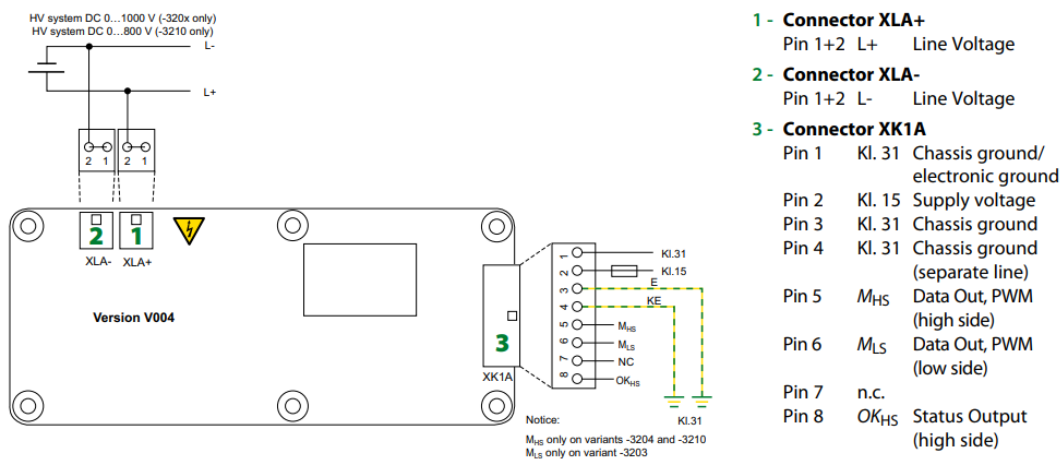
Přímé spojení aktivního vodiče se zemí při závadě na izolaci způsobí v případě uzemněných sítí TN a TT tok velkého poruchového proudu, který vybaví nadproudové ochrany a dojde tak k přerušení provozu [6]. Izolované soustavy IT jsou napájeny buď přes oddělovací transformátor, nebo z nezávislého zdroje a žádný aktivní vodič tak není spojen přímo se zemí [6]. V případě poruchy izolace tak nemůže téci velký poruchový proud, ale pouze malý proud způsobený svodovou kapacitou [6]. Sít' tak zůstává v provozu i při jednopólovém zkratu na zem a pro zajištění vysoké spolehlivosti takové sítě je zapotřebí monitorování izolačního stavu [6]. Vzhledem k tomu, že trakční systémy elektrických vozidel jsou taktéž izolovanými soustavami, je zde sledování izolačního stavu nutné. IMD sleduje hodnotu izolačního odporu mezi napájením trakčního systému a zemí vozidla, tedy jeho šasi. V případě závady na izolaci trakčního systému musí IMD tuto poruchu vyhodnotit a následně trakční systém odpojit od trakčního akumulátoru pomocí izolačních stykačů AIR. Je tedy zřejmé, že IMD musí být součástí vypínacího obvodu. Porucha izolace a zareagování IMD je pak signalizována kontrolkou umístěnou na řídítkách. K rozpojení vypínacího obvodu a rozsvícení kontrolky dojde i v případě detekce poruchy ve vlastní funkci IMD. Samotné zařízení bude umístěno v akumulátorovém kontejneru. IMD je taktéž součástí

vypínacího obvodu nabíjení. Napájení IMD bude provedeno ze systému GLV, resp. z palubní baterie.

Pravidla Formula SAE přímo specifikují typ zařízení IMD, které je nutné použít. V souladu s tímto požadavkem bude použit ISOMETER® IR155-3204 od firmy Bender. Jak výrobce uvádí v katalogovém listu [7], jedná se o hlídač izolačního stavu pro neuzemněné DC sítě určený přímo pro použití v elektromobilech. Dokáže monitorovat izolační stav stejnosměrných i střídavých izolovaných sítí se jmenovitou hodnotou napětí 0 až 1000 V. Izolační odpor je pak nepřetržitě měřen v rozsahu 0 až 10 M Ω . Zařízení je schopno detekovat i poruchy samotného uzemnění a ztráty připojení k němu. Signalizace poruchy je realizována binárním výstupem z IMD, naměřená hodnota izolačního odporu a stav zařízení je pak zakódován pomocí PWM, konkrétně v její střídě a frekvenci.



Obr. 10: Bender ISOMETER® IR155-3204 (převzato z [7]).



Obr. 11: Připojení IMD Bender ISOMETER® IR155-3204 (převzato z [7]).

2.2.5 Odpojovač vysokého napětí (HVD)

Odpojovač vysokého napětí musí dle pravidel odpojit alespoň jeden pól trakčního akumulátoru. Zároveň také musí rozpojit vypínací obvod. Musí se jednat o prvek, který je přístupný přímo, bez odstranění jakékoli části karoserie, krytu nebo použití nástroje. Jelikož je tento prvek přímo součástí trakčního systému, musí být dimenzován na příslušně velký proud a napětí. Tento prvek slouží například pro bezpečné odpojení trakčního systému bez možnosti nechtěného opětovného sepnutí při provádění veškerých prací a kontrol na vozidle. Po průzkumu dostupných produktů na trhu splňujících zmíněné požadavky byl vybrán odpojovač EM30MSD Series od firmy Hirose Electric Co. Ltd., který se podle zjištěných informací hojně používá i na elektrických formulích pro soutěž Formula SAE. Následující informace byly zjištěny v katalogu výrobce [8]. Tento odpojovač v sobě integruje dvojici kontaktů – výkonový a signálový. Přes výkonový kontakt prochází proud samotného trakčního obvodu, signálový kontakt pak propojuje bezpečnostní vypínací obvod. Rozpojení odpojovače se provádí otočením a vytažením zástrčky na vrcholu odpojovače, což splňuje požadavek na možnost rychlého a snadného odpojení alespoň jednoho pólu trakčního systému. Signálový kontakt se při vytažení zástrčky rozpojí jako první. Nejprve se tedy rozpojí vypínací obvod, což okamžitě způsobí rozepnutí izolačních stykačů baterie (AIR) a tedy přerušování trakčního systému. AIR budou řešeny pomocí hermetických stykačů, které snesou elektrický oblouk vzniklý při rozpojování trakčního systému. Při následném rozpojení trakčního systému pomocí výkonového kontaktu HVD již tedy elektrický oblouk nevznikne a rozpojení je zcela bezpečné. Výkonový kontakt je dimenzován na napětí AC/DC 1500 V, signálový kontakt na napětí AC/DC 250 V, což je dostatečné. Co se týče trvalého proudu, signálový kontakt je dimenzován na 1 A, výkonový kontakt pak na proud 200 A. Pokud provedeme výpočet špičkového proudu odebíraného z baterie při uvažování prakticky vybitého akumulátoru, což považujeme za ten nejnepříznivější případ, podle následujícího vztahu:

$$I_{bat_max} = \frac{P_{max_U_min}}{U_{bat_min}} = \frac{46000}{183} = 251,4 \text{ A}, \quad (2.1)$$

kde $P_{max_U_min}$ (W) je špičkový výkon motoru dosažitelný při minimálním napětí akumulátoru a U_{bat_min} (V) je minimální napětí akumulátoru, zjistíme, že trakčním systémem může špičkově protékat proud až 251,4 A. To by vybraný HVD dlouhodobě nevydržel. Při návrhu spoléháme na to, že tyto stavy budou velmi ojedinělé a krátkodobé a odpojovač je tak zvládne. Ověření spolehlivé funkce bude však předmětem následujícího testování.

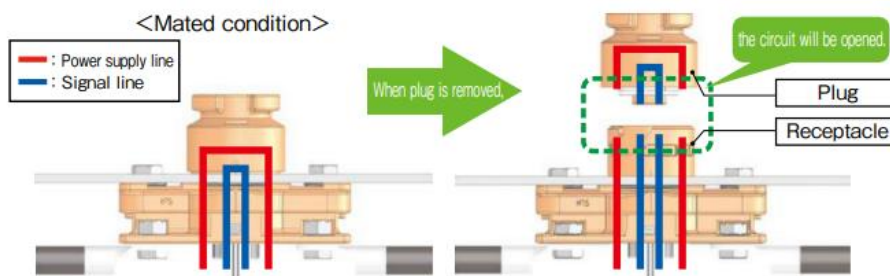
Hodnota špičkového výkonu 46 kW byla vypočítána na základě znalosti napětí akumulátoru, konstanty motoru sloužící pro přepočítání efektivní hodnoty napětí mezi fázemi na otáčky za minutu a také křivky maximálního výkonu v závislosti na otáčkách motoru. Postup je popsán rovnicemi (2.4) až (2.6). Pokud vypočítáme odebíraný proud při maximálním trvalém výkonu motoru při 6000 otáčkách za minutu a uvažujeme přitom nominální napětí akumulátoru, dostaneme:

$$I_{bat_nom} = \frac{P_{mot}}{U_{bat_nom}} = \frac{30000}{226,8} = 132,3 \text{ A}, \quad (2.2)$$

kde P_{mot} (W) je maximální trvalý výkon motoru a U_{bat_nom} (V) je jmenovité napětí akumulátoru. Takový proud odpojovač HVD bez problémů snese. Dimenzování signálového kontaktu je dostatečné, přídržný proud ovládací cívky AIR je 130 mA při napájení 12 V.



Obr. 12: Odpojovač vysokého napětí EM30MSD (převzato z [8]).



Obr. 13: Ukázka rozpojení výkonového a signálového kontaktu (převzato z [8]).

2.2.6 Izolační stykače akumulátoru (AIR)

Izolační stykače připojují a odpojují oba póly trakční baterie k trakčnímu systému. Jedná se o stykače typu NO (Normally Open), které jsou umístěny přímo v akumulátorovém kontejneru. Ovládací cívky izolačních stykačů jsou napájeny z bezpečnostního vypínacího obvodu, tudíž jakékoli jeho přerušení způsobí rozepnutí izolačních stykačů akumulátoru a tím pádem rozpojení trakčního systému. Izolační stykače musí být pochopitelně dimenzovány na maximální hodnoty napětí a proudu vyskytující se v trakčním systému. Tyto požadavky splňuje například stykač Kilovac EV200HAANA. Jedná se o hermetický stykač, který je dle katalogového listu [5] dimenzován na napětí až 900 V DC a snese stálý proud o

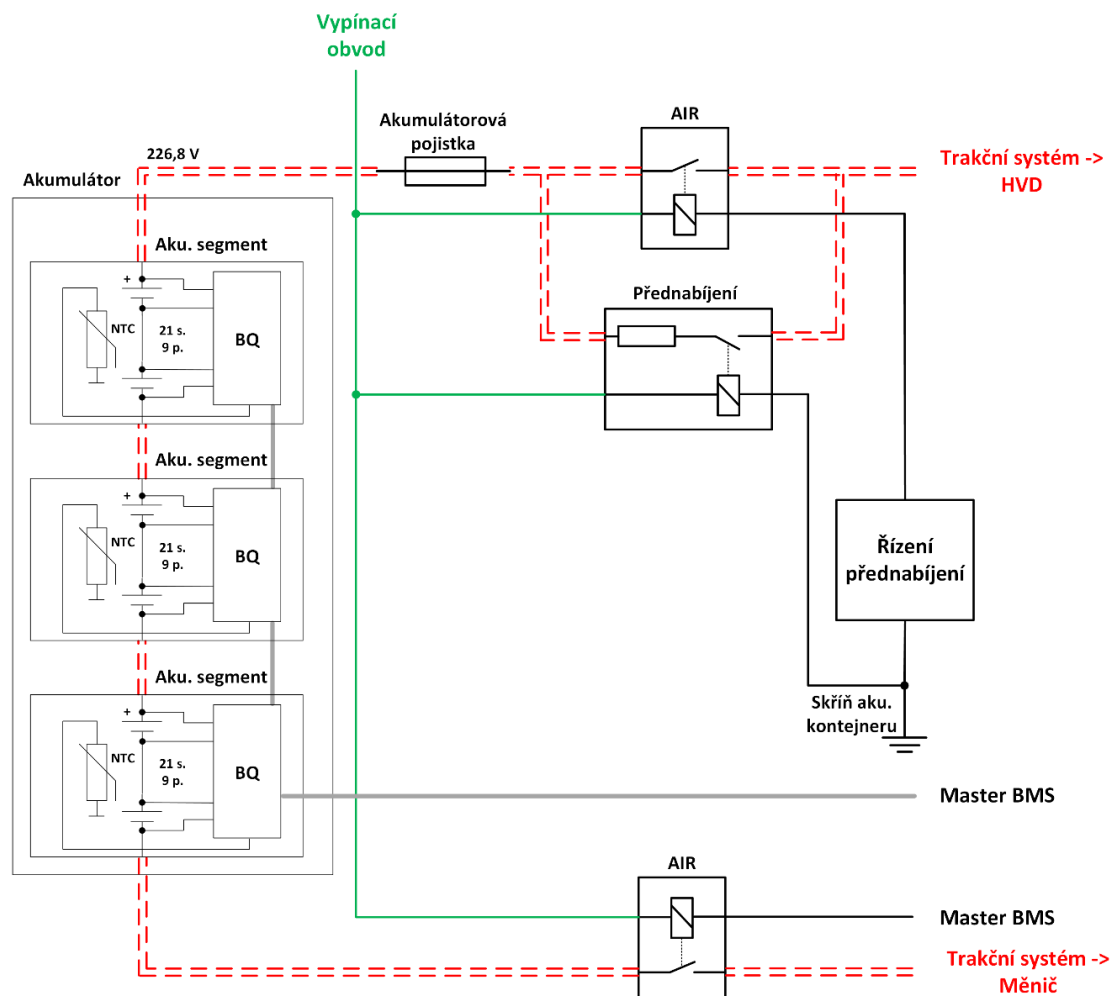
velikosti 500 A. Ovládací cívka může být napájena napětím v rozsahu 9-36 V, což vyhovuje našemu záměru napájet vypínací obvod z 12 V palubní baterie. Přídržný proud ovládací cívky je pak 130 mA při napájení cívky 12 V.



Obr. 14: Stykač EV200HAANA (převzato z [5]).

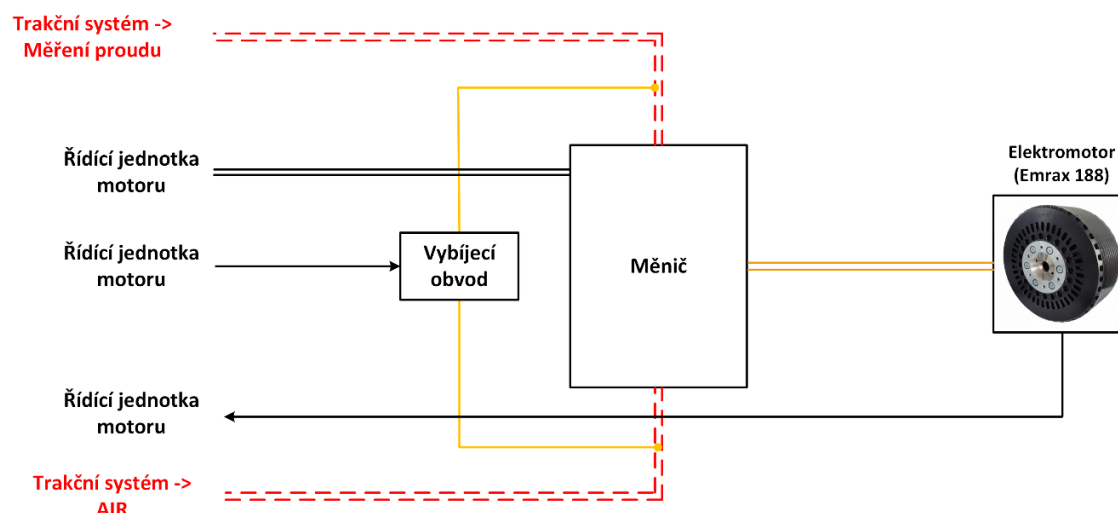
2.2.7 Přednabíjecí a vybíjecí obvody

Akumulátor musí obsahovat přednabíjecí obvod, který musí být dle pravidel schopen nabít napěťový meziobvod minimálně na 90 % napětí akumulátoru před sepnutím druhého izolačního stykače akumulátoru (AIR). Přednabíjecí obvod se skládá ze stykače a odporu vhodné velikosti pro omezení nabíjecího proudu. Ovládací cívka stykače je opět napájena z vypínacího obvodu, stejně jako v případě izolačních stykačů akumulátoru (AIR). Přednabíjecí obvod je možné realizovat se stejným stykačem typu NO (Normally Open) jako v případě AIR (EV200HAANA). Zapojení izolačních stykačů akumulátoru a přednabíjecího obvodu v rámci čtyřkolky je nakresleno na Obr. 15.



Obr. 15: Zapojení izolačních stykačů akumulátoru a přednabíjecího obvodu.

Pokud trakční systém odpojíme od trakční baterie, v kondenzátorové baterii trakčního měniče stále zůstává určitá naakumulovaná energie. Tuto energii je zapotřebí co nejrychleji vybit, a to konkrétně tak, aby napětí v trakčním systému pokleslo pod úroveň nízkého napětí (napětí 60 V DC nebo nižší), a to maximálně do 5 sekund od rozpojení vypínacího obvodu. Tento požadavek vychází z pravidel pro funkci vypínacího obvodu (kapitola 1.5.2). Z tohoto důvodu je nutné použít vybíjecí obvod složený ze spínacího prvku a vybíjecího rezistoru, na kterém se naakumulovaná energie zmaří. Vybíjecí obvod bude zapojen na svorky výkonového trakčního měniče. Vybíjecí obvod musí být zapojen tak, aby byl aktivní vždy, když je rozepnut vypínací obvod. Zapojení vybíjecího obvodu je znázorněno na Obr. 16.



Obr. 16: Zapojení vybíjecího obvodu trakčního systému.

2.2.8 Trakční akumulátor

Pro konstrukci akumulátoru jsou použity lithium-iontové bateriové články INR21700-40T od firmy Samsung. Katalogový list je uveden v seznamu literatury ([16]). Nominální napětí článku je 3,6 V a jeho jmenovitá kapacita je 3,9 Ah v případě plného nabití a následného vybíjení proudem 10 A do hodnoty napětí „cut-off“, která je stanovena na 2,5 V. Z jednotlivých článků je sestaven akumulátor, který je uložen v akumulátorovém kontejneru společně s dalšími komponenty uvedenými výše. Topologické schéma akumulátorového kontejneru je obsahem čtvrté kapitoly této práce. Konstrukce akumulátoru je předmětem již zmiňovaného projektu elektrické motokáry, která bude ve finále osazena dvěma kompletními akumulátorovými kontejnery. Pro projekt čtyřkolky bude převzat a použit jeden kompletní akumulátorový kontejner. V rámci projektu motokáry se pochopitelně prováděly také veškeré výpočty a specifikace související s touto baterií. Ty nejdůležitější jsem převzal a uvádím je v následující tabulce. Opět se odkazuji na diplomovou práci [19].

Tabulka 4: Základní parametry akumulátoru.

Parametr	Hodnota
Typ článku	INR21700-40T
Zapojení baterie	63s.,9p., tj. 567 článků
Kapacita baterie	32,4 Ah
Energie baterie	7,3 kWh
Minimální napětí při vybití	183 V
Jmenovité napětí	226,8 V
Maximální napětí při nabití	265 V
Kontinuální vybíjecí proud	315 A

Maximální vybíjecí proud (maximální teplota článku = 80°C)	405 A
Jmenovitý nabíjecí proud	54 A
Odhadovaná hmotnost	45 kg
Odhadovaný objem	44 l

Pro úplnost zde uvedu výpočet energie, která bude v akumulátoru teoreticky uložena. Energii lze vypočítat podle následující rovnice:

$$E_{bat} = C_{\text{el}} \cdot U_{\text{el}} \cdot \text{počet článků} = 3,9 \cdot 3,6 \cdot 567 = 7,96 \text{ kWh}, \quad (2.3)$$

kde C_{el} (Ah) je jmenovitá kapacita jednoho článku a U_{el} (V) je jeho nominální napětí. Je však nutné zmínit, že tato hodnota energie je skutečně jen teoretická. Udávaná kapacita článku je platná při jeho vybíjení až na hodnotu 2,5 V. V naší aplikaci však bude dolní hranice vybití článku podstatně vyšší, zhruba 2,9 V, a to především z důvodu ochrany baterie a dlouhodobého zachování její kapacity. Proto je reálná kapacita baterie stanovena na 32,4 Ah, což činí 3,6 Ah na jeden článek. Prakticky to znamená, že hodnota skutečně využitelné energie bude nižší zhruba o 600 Wh, což je ostatně uvedeno v tabulce (Tabulka 4).

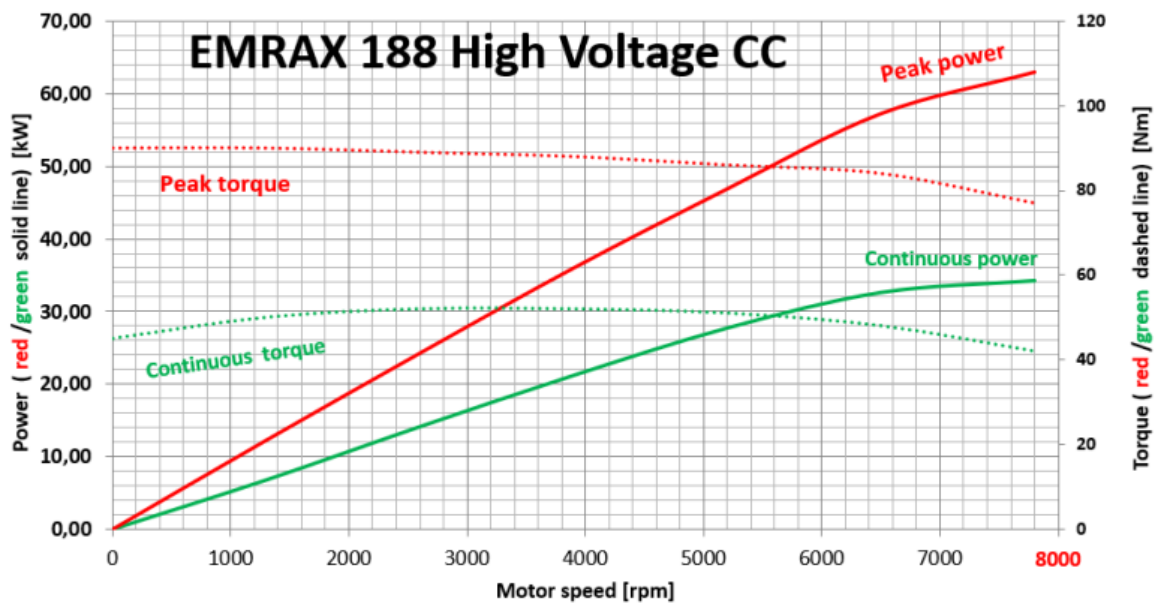
2.2.9 Elektromotor

Čtyřkolka bude vybavena elektromotorem Emrax 188 Medium Voltage. Jedná se o kompaktní axiální synchronní motor s permanentními magnety. Tento motor se vyznačuje vysokou hustotou výkonu a momentu a díky své nízké hmotnosti je velmi vhodný právě pro oblast elektromobility. V této podkapitole budou shrnuty jen základní údaje a charakteristiky, které jsou popsány výrobcem v katalogovém listu uvedeném v seznamu literatury [2]. Podrobnější údaje a výpočty jsou obsahem diplomové práce kolegy Bc. Jakuba Šandy, která v rámci projektu elektrické čtyřkolky taktéž v tomto akademickém roce vznikla. Na jeho práci s názvem „Návrh silového obvodu třífázového střídače pro studentský projekt elektrické čtyřkolky“ se tímto odkazují do seznamu literatury [18].

Technické údaje a parametry, které jsou v tuto chvíli důležité pro lepší představu o použitém motoru, jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 5). Dalším důležitým údajem jsou křivky momentu a výkonu v závislosti na otáčkách motoru (Obr. 17).

Tabulka 5: Základní parametry elektromotoru Emrax 188.

Parametr	Hodnota
Maximální napětí baterie	270 V
Maximální otáčky při plném zatížení	6750 ot./min.
Maximální otáčky bez zatížení	7830 ot./min.
Špičková hodnota výkonu při maximálních otáčkách	70 kW
Maximální trvalý výkon při 6000 ot./min.	30 kW
Maximální střední hodnota proudu (po dobu 2 minuty)	300 A
Trvalá střední hodnota proudu	150 A
Špičkový moment	100 Nm
Trvalý moment	50 Nm
Střídavé napětí mezi fázemi potřebné na jednu ot./min	0,0252 V/(1 ot./min)
Průměr	188 mm
Hmotnost	7 kg



Obr. 17: Křivky výkonu a momentu v závislosti na otáčkách motoru (převzato z: [2]).

V podkapitole 2.2.5, kde je popisován odpojovač vysokého napětí HVD, uvádím výpočet špičkového proudu, který bude procházet trakčním obvodem, a tedy i odpojovačem HVD, v případě minimálního napětí trakční baterie. K tomu je zapotřebí znát hodnotu špičkového výkonu, které jsme schopni při daném napětí baterie dosáhnout. Nejprve musíme vypočítat efektivní hodnotu fázového napětí zátěže při řízení PWM s injektovanou 3. harmonickou (modulační index uvažujeme 1 a proto není v rovnici zahrnut):

$$U_{f_{out}} = \frac{U_{bat_min}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{183}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 74,7 \text{ V}, \quad (2.4)$$

kde U_{bat_min} (V) je minimální napětí akumulátoru. Dále vypočítáme efektivní hodnotu sdruženého napětí:

$$U_{sout} = U_{f_{out}} \cdot \sqrt{3} = 74,7 \cdot \sqrt{3} = 129,4 \text{ V}, \quad (2.5)$$

kde $U_{f_{out}}$ (V) je efektivní hodnota fázového napětí zátěže. Nyní jsme již schopni určit otáčky motoru, kterých při tomto napětí akumulátoru budeme schopni dosáhnout, podle vztahu:

$$n_{U_min} = \frac{U_{sout}}{k_{U_n}} = \frac{129,4}{0,0252} = 5135 \text{ ot./min}, \quad (2.6)$$

kde U_{sout} (V) je efektivní hodnota sdruženého napětí a k_{U_n} (V/(1 ot./min)) je konstanta motoru sloužící pro přepočtení efektivní hodnoty napětí mezi fázemi na otáčky za minutu. Jinými slovy, tato konstanta udává, jakou efektivní hodnotu sdruženého napětí potřebujeme na 1 otáčku za minutu. Nyní už lze z grafu (Obr. 17) jednoduše odečíst hodnotu špičkového výkonu, které můžeme v takovémto případě dosáhnout. Tato hodnota činí 46 kW a je s ní uvažováno při výpočtu špičkového proudu trakčním obvodem (rovnice (2.1)).

2.2.10 Výkonový měnič

Měnič pro čtyřkolku bude mít podobu třífázového střídače postaveného z půlmůstků CAB450M12XM3 od firmy Wolfspeed. Jedná se o MOSFET SiC prvky, které nám umožní pracovat s vysokou spínací frekvencí při malých spínacích ztrátách. Měnič bude řízen pomocí PWM s injektovanou 3. harmonickou. Podrobnější specifikace a veškeré výpočty a dimenzování jsou opět součástí diplomové práce „Návrh silového obvodu třífázového střídače pro studentský projekt elektrické čtyřkolky“ [18]. Měnič i motor spolu budou sdílet společný vodní chladicí okruh.

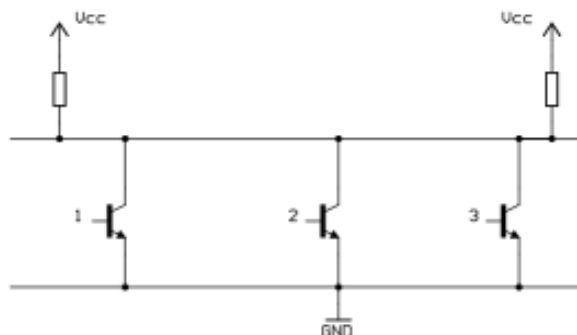
3 Návrh komunikace a připojení klíčových komponentů čtyřkolky

3.1 Sběrnice CAN (CAN bus)

CAN (Controller Area Network) je sériový komunikační protokol, který byl původně vyvinut firmou Bosch pro nasazení v automobilech [10]. Vývoj tohoto komunikačního protokolu byl iniciován masivním nárůstem elektroniky v automobilech a v té souvislosti postupně neúnosným množstvím kabeláže. Řídící jednotky, senzory i akční členy jsou tak připojeny na sběrnici CAN, díky níž mohou mezi sebou komunikovat prostřednictvím pouhých dvou vodičů. Jelikož značné množství dnes vyráběných mikrokontrolérů protokol CAN podporuje, dochází k velmi častému využívání tohoto protokolu například i v ostatních průmyslových aplikacích. V automobilech je CAN stále naprosto dominantní. Důvodem širokého používání je především nízká cena, snadné nasazení, spolehlivost, dostatečná přenosová rychlost, snadná rozšiřitelnost a dostupnost potřebné součástkové základny [10].

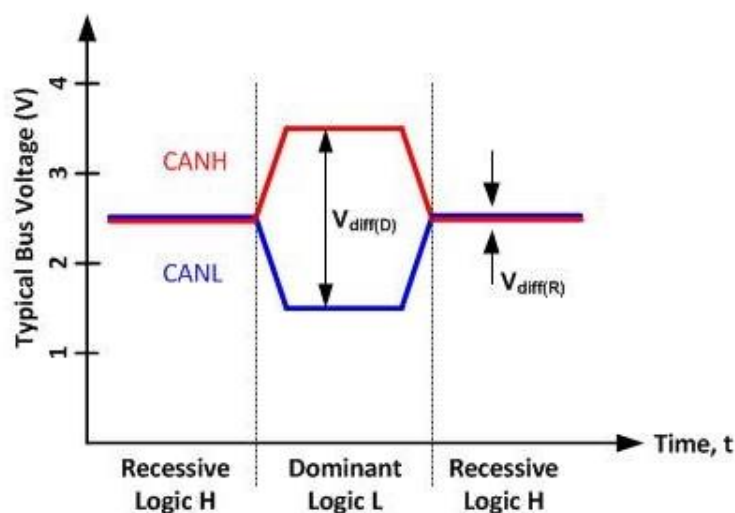
Protokol CAN je definován normou ISO 11898. Umožňuje distribuované řízení systémů v reálném čase a s vysokou mírou zabezpečení proti chybám. Jedná se o protokol typu multimaster, kde každý uzel sběrnice může řídit chování jiných uzlů. Zprávy vysílané po sběrnici neobsahují žádnou informaci o cílovém uzlu, kterému jsou určeny, a jsou přijímány všemi ostatními uzly připojenými ke sběrnici. Každá zpráva má na svém počátku identifikátor, který udává význam přenášené zprávy a její prioritu. Protokol CAN zajišťuje, aby v případě kolize dvou zpráv byla přednostně doručena zpráva s vyšší prioritou. Dále je možné na základě identifikátoru zajistit, aby daný uzel přijímal pouze ty zprávy, které se ho týkají. [10]

Standard protokolu CAN definuje dvě vzájemně komplementární hodnoty bitů na sběrnici – dominant (logická 0) a recessive (logická 1) [10]. Pravidla pro stav na sběrnici jsou jednoduchá a jednoznačná. Vysílají-li všechny uzly sběrnice bit recessive, pak je na sběrnici úroveň recessive [10]. Vysílá-li alespoň jeden uzel dominant bit, pak je na sběrnici úroveň dominant [10]. Jako příklad můžeme uvést sběrnici buzenou členy s otevřeným kolektorem (Obr. 18), na které je dobře patrný princip funkce.



Obr. 18: Příklad realizace fyzické vrstvy CAN (převzato z [10]).

Pro realizaci fyzického přenosového média se nejčastěji používá diferenciální sběrnice definovaná podle normy ISO 11898. Sběrnici tvoří dva vodiče – CAN H a CAN L, mezi kterými sledujeme rozdílové napětí. Pro úroveň recessive je velikost rozdílového napětí $U_{diff} = 0$ V, pro úroveň dominant pak $U_{diff} = 2$ V. Pro eliminaci odrazů na vedení je sběrnice na obou koncích přizpůsobena zakončovacími odpory o velikosti 120Ω . [10]

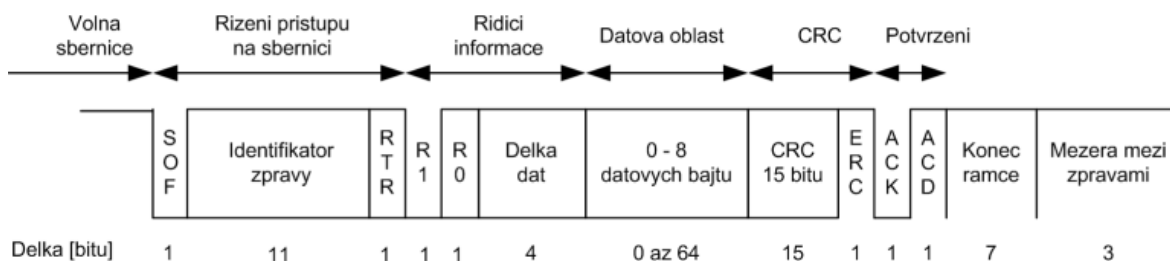


Obr. 19: Úrovně na sběrnici CAN (převzato z [11]).

Zahájí-li vysílání několik uzlů současně, přístup na sběrnici získá ten, který vysílá zprávu s vyšší prioritou, tj. s nižším identifikátorem. Identifikátor je na začátku každé zprávy. Každý vysílač porovnává hodnotu právě vysílaného bitu s hodnotou na sběrnici. Pokud zjistí, že na sběrnici je jiná hodnota než je hodnota právě vysílaného bitu (jediná možnost je, že na sběrnici je stav dominant a přitom vysílač vysílá recessive bit), okamžitě přeručí další vysílání. Tím je zajištěno, že zpráva s vyšší prioritou bude odvysílána přednostně. [10]

Protokol CAN používá dva typy datových zpráv. První je definován specifikací 2.0A a je označován jako standardní formát zprávy (Standard Frame), druhý typ je pak definován

specifikací 2.0B a definuje navíc tzv. rozšířený formát zprávy (Extended Frame) [10]. Identifikátor zprávy má v případě standardního formátu 11 bitů, v případě rozšířeného formátu má 29 bitů [10]. Kromě datových zpráv existují ještě další 3 typy zpráv. Konkrétně žádost o data, zpráva o chybě a zpráva o přetížení.



Obr. 20: Datová zpráva podle specifikace CAN 2.0A (převzato z [10]).

Přenosová rychlost sběrnice CAN je teoreticky až 1 Mbit/s. To však platí pouze pro krátké vzdálenosti, asi do 40 m. Při přenosu na větší vzdálenosti se již musí pracovat s nižšími přenosovými rychlostmi (např. 125 kbit/s na vzdálenost 500 m).

3.2 Digitální komunikace – CAN 1

Sběrnice CAN 1 bude zajišťovat komunikaci mezi hlavní řídicí jednotkou a řídicí jednotkou motoru. Bude se jednat o uzavřenou sběrnici sloužící skutečně pouze pro přenos informací mezi zmíněnými řídicími jednotkami. Bude zde použita vyšší komunikační rychlost než na sběrnici CAN 2 a to především proto, že po sběrnici CAN 1 budou posílána data nezbytně nutná pro správné řízení výkonového měniče. Je zřejmé, že tato data musí být přenášena a zpracovávána co nejrychleji, aby čtyřkolka měla co možná nejkratší odezvu na zadávané požadavky. Konkrétně po této sběrnici budou vysílána data s údaji o míře stlačení plynové páky, rychlosti a směru otáčení předních kol, údaje o stisknutí páky nebo pedálu mechanických brzd a údaje o náklonu čtyřkolky v ose Y získané z gyroskopu. Na základě těchto dat bude řídicí jednotka motoru provádět potřebné akční zásahy do řízení výkonového měniče. V následující tabulce (Tabulka 6) je uveden seznam zpráv vysílaných po sběrnici CAN 1 a nezbytné informace o nich.

Tabulka 6: Zprávy vysílané po sběrnici CAN 1 a příslušné reakce.

Název	Data	Význam	Jednotka	Reakce	Vysílač zprávy	Přijímač zprávy
Brake_F	ON/OFF	Přední mechanická brzda	-	Požadavek na nulový moment motoru	Hlavní řídicí jednotka	Řídicí jednotka motoru
Brake_R	ON/OFF	Zadní mechanická brzda	-	Požadavek na nulový moment motoru	Hlavní řídicí jednotka	Řídicí jednotka motoru
Throttle_Lever	0 – 100 % (0,5 V – 4,5 V)	Rekupační brzda (0,5 – 2 V)	V	Požadavek na rekuperaci (formou snižujícího se požadavku na otáčky)	Hlavní řídicí jednotka	Řídicí jednotka motoru
		Plyn (2 – 4,5 V)		Požadavek na kladný moment motoru	Hlavní řídicí jednotka	Řídicí jednotka motoru
Whell_Speed_F	0 – 100 % (0 – 800 ot./min)	Rychlost otáčení předních kol	ot./min	Pokud budou otáčky předních kol nižší, než zadních, uprav požadavek na moment (omezení prokluzu zadních kol)	Hlavní řídicí jednotka	Řídicí jednotka motoru

Wheel_Direct	0/1	Směr otáčení předních kol	-	Kontroluj shodnost směru otáčení předních a zadních kol – pokud směr není shodný, generuj požadavek na nulový moment motoru	Hlavní řídicí jednotka	Řídicí jednotka motoru
Pitch_Angle	0-100 % (0° - 180°)	Naklonění v ose Y	o	Při dosažení kritického úhlu náklonu kolem osy Y omezit maximální požadavek na moment motoru	Hlavní řídicí jednotka	Řídicí jednotka motoru

Rozsah rychlosti otáčení předních kol (ot./min) byl stanoven na základě maximální povolené rychlosti vozidla a znalosti průměru kol. Rychlost vozidla by neměla překročit hranici 80 km/h a průměr kol činí 52 cm. Na základě těchto hodnot vychází, že pokud se kola budou otáčet rychlostí 800 ot./min, čtyřkolka dosáhne rychlosti lehce přes 78 km/h, což budeme považovat za maximální dosažitelnou rychlost. Ze znalosti maximálních otáček kol a motoru bude dále stanovena hodnota převodového poměru použité převodovky.

3.3 Digitální komunikace – CAN 2

Sběrnice CAN 2 bude využita pro posílání zpráv, které jsou méně důležité z hlediska samotného řízení a regulace pohonu. K této sběrnici bude připojena jednotka Master BMS, řídicí jednotka motoru, hlavní řídicí jednotka, kontroléry pro ovládání předních a zadních světel a také palubní displej. Z Master BMS budou vysílána data pro řídicí jednotku motoru, která díky tomu bude schopna provést akční zásah do řízení motoru, například omezit maximální požadavek na moment v případě nebezpečí překročení kritické teploty některých článků. V případě, že by povolená teplota některých článků byla překročena nebo by se napětí některé z paralelních skupin článků dostalo mimo stanovené meze, jednotka Master BMS musí rozpojit vypínací obvod. Skutečně kritické situace je tak schopna řešit sama bez nutnosti komunikace s jinou jednotkou. Hodnotu nejvyšší měřené teploty a hodnotu nejnižšího napětí na dané paralelní skupině článků bude možné případně vizualizovat na displeji. Z Master BMS se také budou získávat údaje o spotřebované či zbývající energii akumulátoru, případně i údaj o množství energie zrekuperované. Tyto údaje budou mít pouze informační charakter a budou určeny pouze pro zobrazení na displeji. Z hlavní řídicí jednotky budou po CAN 2 posílány povely pro kontrolér předních a zadních světel. Po této sběrnici budou na displej z hlavní řídicí jednotky posílány také údaje o aktuální rychlosti a ujeté vzdálenosti získané a vypočítané na základě zpracovaných signálů ze senzorů rychlosti předních kol. Pro úplnost je ještě nutné zmínit, že na sběrnici CAN 2 bude připojen diagnostický konektor, jehož prostřednictvím bude možné vyčíst data zaznamenaná hlavní řídicí jednotkou v určitém časovém intervalu. V následující tabulce (Tabulka 7) je uveden seznam zpráv vysílaných po sběrnici CAN 2 a nezbytné informace o nich.

Tabulka 7: Zprávy vysílané po sběrnici CAN 2 a příslušné reakce.

Název	Data	Význam	Jednotka	Reakce	Vysílač zprávy	Přijímač zprávy
Speed	-	Aktuální rychlost	km/h	Zobraz hodnotu na displej	Hlavní řídicí jednotka	Palubní displej
Distance	-	Ujetá vzdálenost	km	Zobraz hodnotu na displej	Hlavní řídicí jednotka	Palubní displej
Tire Pressure	-	Hodnota tlaku v jednotlivých pneumatikách	bar	Na vyžádání zobraz hodnoty na displeji	Hlavní řídicí jednotka	Palubní displej
Consumed_E	-	Spotřebovaná energie	kWh	Zobraz hodnotu na displej	Master BMS	Palubní displej
Remaining_E	-	Zbývající energie	kWh	Zobraz hodnotu na displej	Master BMS	Palubní displej
Recovered_E	-	Zrekuperovaná energie	kWh	Zobraz hodnotu na displej	Master BMS	Palubní displej
Consumption_AV	-	Průměrná spotřeba energie	kWh/100 km	Zobraz hodnotu na displej	Master BMS	Palubní displej
Cell_Temp	0-100 % (-20°C – 80°C)	Teploty monitorovaných článků	°C	V případě zvýšené teploty článků omez maximální možný požadavek na moment motoru (omezení proudu motoru)	Master BMS	Řídicí jednotka motoru
				Na požadavek na displeji zobraz nejvyšší měřenou hodnotu teploty		Palubní displej

Cell_Voltage	0-100 % (2,5V – 4,2V)	Napětí paralelně spojených skupin článků	V	Na požadavek na displeji zobraz hodnotu nejnižšího měřeného napětí	Master BMS	Palubní displej
Headlights	ON/OFF	Potkávací světla	-	Zapni/vypni potkávací světla	Hlavní řídicí jednotka	Kontrolér předních světel
						Kontrolér zadních světel
Indicator_R	ON/OFF	Pravé blinkry	-	Zapni/vypni pravé blinkry	Hlavní řídicí jednotka	Kontrolér předních světel
						Kontrolér zadních světel
Indicator_L	ON/OFF	Levé blinkry	-	Zapni/vypni levé blinkry	Hlavní řídicí jednotka	Kontrolér předních světel
						Kontrolér zadních světel
Hazard_Lights	ON/OFF	Výstražná světla	-	Zapni/vypni výstražná světla	Hlavní řídicí jednotka	Kontrolér předních světel
						Kontrolér zadních světel
Brake_Lights	ON/OFF	Brzdová světla	-	Zapni/vypni brzdová světla	Hlavní řídicí jednotka	Kontrolér zadních světel
High_Beam	ON/OFF	Dálková světla	-	Zapni/vypni dálková světla	Hlavní řídicí jednotka	Kontrolér předních světel
Foglamp	ON/OFF	Mlhové světlo	-	Zapni/vypni mlhové světlo	Hlavní řídicí jednotka	Kontrolér zadních světel

3.4 Komunikace SPI

Kromě komunikace po sběrnici CAN bude v rámci systému čtyřkolky implementována ještě komunikace po sériové sběrnici SPI. Po této sběrnici bude komunikovat hlavní řídicí jednotka s integrovaným obvodem akcelerometru a gyroskopu. Vyhodnocováno bude zrychlení, resp. přetížení a úhlové natočení v jednotlivých osách. Při dosažení definovaných mezních hodnot bude provedena příslušná reakce, v obou případech se bude jednat o rozpojení bezpečnostního vypínacího obvodu.

Tabulka 8: Komunikace SPI.

Komponent	Měřená data	Jednotka	Reakce
ASM330LHHTR (akcelerometr + gyroskop)	Zrychlení v osách X, Y a Z	m/s ² resp. g	Při zaznamenání přetížení >3 g v některé z os rozpoj vypínací obvod (vyhodnoceno jako náraz)
	Natočení v osách X, Y a Z	°	Při přesáhnutí mezní hodnoty náklonu v některé z os (vyhodnoceno jako převrácení čtyřkolky) rozepni vypínací obvod

3.5 Komunikace Bluetooth

Prostřednictvím technologie Bluetooth bude komunikovat hlavní řídicí jednotka se snímačem tlaku v pneumatikách. Vyhodnocovat se bude konkrétní hodnota tlaku ve všech čtyřech pneumatikách. Charakter přijímaných dat bude čistě informativní, při poklesu tlaku v některé z pneumatik se pouze zobrazí upozornění na displeji. Žádným způsobem nebudou omezeny možnosti provozu vozidla.

Tabulka 9: Komunikace Bluetooth.

Komponent	Měřená data	Jednotka	Reakce
Snímač tlaku v pneumatikách	Hodnoty tlaku v jednotlivých pneumatikách	bar	Na vyžádání zobrazit hodnoty tlaků na displeji. Při poklesu tlaku v některé z pneumatik zobrazit na displeji upozornění.

3.6 Připojení komponentů

V této části jsou ve formě tabulky (Tabulka 10) rozepsány jednotlivé komponenty připojené k příslušným řídicím jednotkám. Je definováno jejich napájecí napětí, odebíraný proud, veškeré jejich vývody, místo připojení těchto vývodů a v neposlední řadě i signály, které tyto komponenty na výstupu generují. Takovýto přehled má význam především pro výběr a návrh vhodného napájecího zdroje a prvotní návrh kabeláže. Dále poskytuje i informace o nutném počtu vstupních a výstupních pinů příslušné řídicí jednotky a o signálech, které bude muset být jednotka schopna zpracovávat. Vzhledem k tomu, že již byly definovány zprávy, které budou vysílány po sběrnicích CAN 1 a CAN 2 i komunikace prostřednictvím SPI a Bluetooth, vzniká už také představa o tom, jakým způsobem budou muset být data získaná od jednotlivých komponentů zpracovávána a jaké výpočty bude nutné provádět.

Tabulka 10: Komunikace mezi komponenty a příslušnými řídicími jednotkami.

Komponent	Označení typu	Napájení	Vývod / pin	Připojení vývodu	Signál z vývodu
Snímač polohy plynového pedálu (APPS)	PST360G2-2AA- C0002-ERA360- 05K	5 V, 17 mA	Napájení + (hnědá)	Napájecí zdroj (+5 V)	-
			Napájení - (modrá)	Napájecí zdroj (GND)	-
			Výstup 1 (černá)	Hlavní řídicí jednotka	0,5 – 4,5 V
			Výstup 2 (bílá)	Hlavní řídicí jednotka	0,5 – 4,5V
Snímač rychlosti předních kol	SNG-QPLA-000	5 V, 12 mA	Napájení + (žlutá)	Napájecí zdroj (+5 V)	-
			Napájení - (černá)	Napájecí zdroj (GND)	-
			Kanál A (bílá)	Hlavní řídicí jednotka	Obdélníkový signál 5 V (HIGH), 0 V (LOW), fázový posun 90° oproti kanálu B
			Kanál B (modrá)	Hlavní řídicí jednotka	Obdélníkový signál 5 V (HIGH), 0 V (LOW), fázový posun 90° oproti kanálu A

Akcelerometr + gyroskop	ASM330LHHTR	3,3 V, 1,3 mA	Vdd	Interface deska (Vdd +3,3 V)	-
			GND	Interface deska GND	-
			GNSD	Interface deska GND	-
			Vdd_IO	Interface deska (Vdd_IO +3,3 V)	-
			RES	Vdd_IO	-
			RES	Vdd_IO	-
			INT2	Interface deska	-
			CS	Hlavní řídicí jednotka	-
			SDO	Hlavní řídicí jednotka	-
			SDI	Hlavní řídicí jednotka	-
			SPC	Hlavní řídicí jednotka	-
Ovladač světél	Shineray 200ST	5 V	Napájení +	Napájecí zdroj (+5 V)	-
			Výstupy pro ovládání světél	Hlavní řídicí jednotka	0 V nebo 5 V

Brzdová páka – přední mechanická brzda	5 V	Napájení +	Napájecí zdroj (+5 V)	-
		Výstup spínače	Hlavní řídicí jednotka	0 V nebo 5 V
Brzdový pedál – zadní mechanická brzda	5 V	Napájení +	Napájecí zdroj (+5 V)	-
		Výstup spínače	Hlavní řídicí jednotka	0 V nebo 5 V
Tlačítko „připraveno k jízdě“	5 V	Napájení +	Napájecí zdroj (+5 V)	-
		Výstup spínače	Řídicí jednotka motoru	0 V nebo 5 V
Přepínač pro reverzaci chodu motoru	5 V	Napájení +	Napájecí zdroj (+5 V)	-
		Výstup spínače	Řídicí jednotka motoru	0 V nebo 5 V

3.7 Analýza možných poruch a jejich následků

Podstatným úkolem, který je nutné provést hned v rámci prvotního návrhu každého systému, je vypracování analýzy možných poruch a jejich následků, známé také jako FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). FMEA je preventivní nástroj pro nalezení a řešení potenciálních závad na produktu nebo ve výrobním procesu a to již ve fázi navrhování produktu a navrhování výrobního procesu [12]. FMEA umožňuje určit velikost rizika jednotlivých potenciálních vad a na základě toho lze pak efektivně přijímat opatření pro snížení rizikovosti vady [12]. FMEA musí být živým dokumentem, který se pravidelně aktualizuje a vyhodnocují se rizika i efektivnost stanovených opatření pro eliminaci těchto rizik [12]. Správně provedená FMEA analýza nám následně umožňuje ušetřit čas i peníze při samotném vývoji a následné výrobě produktu. V následující tabulce (Tabulka 11) jsou uvedeny základní poruchové stavy přiřazené vždy k příslušnému komponentu, jejich důsledky a způsob, jakým je nutné na tyto stavy reagovat. Tato analýza je tedy zjednodušená a neobsahuje například výpočet konkrétního rizikového čísla. Slouží tak především k definování možných poruch, kvůli kterým bude nutné přijmout příslušná opatření. V průběhu dalšího vývoje mohou být doplněny další poruchy, které budou zjištěny a které bude nutné vhodným způsobem ošetřit.

Tabulka 11: Poruchové stavy, jejich důsledky a příslušné reakce.

Komponent	Možná porucha	Důsledek poruchy	Reakce na poruchu
Snímač polohy plynového pedálu (APPS)	Ztráta napájení, zkrat, ztráta signálu ze snímače, lišící se hodnoty standardního a redundantního výstupu nebo jiná anomálie, která vygeneruje signál mimo provozní rozsah (zde 0,5 V – 4,5 V)	Nemožnost korektně zadávat požadavek na točivý moment/rekuperační brzdu	Okamžité zastavení elektromotoru pomocí měniče, není nutné rozpojovat vypínací obvod
Snímač rychlosti předních kol	Ztráta výstupního signálu z jednoho/z obou kanálů jednoho ze snímačů	Nemožnost vyhodnotit směr otáčení kola, případně nemožnost vyhodnotit i jeho otáčky. Stále však možné měřit tyto údaje na druhém kole	Veškeré funkce zůstávají v činnosti na základě hodnot získaných z druhého funkčního snímače. Zobrazit výstrahu na palubním displeji, příp. dodatečná kontrolka
	Ztráta výstupního signálu z jednoho/z obou kanálů obou snímačů	Úplná nemožnost vyhodnotit směr otáčení kol, případně úplná nemožnost vyhodnotit jejich otáčky. Nelze měřit rychlost vozidla, ujetou vzdálenost, ochrana proti prokluzu kol neaktivní	Vozidlo zůstává s danými omezeními v provozu pro nezbytné dojetí. Zobrazit požadavek na servis na palubním displeji, příp. dodatečná kontrolka
Brzdová páka a pedál – mechanické brzdy	Ztráta signálu od jedné nebo od obou brzd	Hlavní řídicí jednotka nemá informaci o aktivaci brzd	Zastavení elektromotoru (řízená rekuperační brzda) a následné rozpojení vypínacího obvodu

Trakční baterie/BMS	Teplota článků se blíží mezní hodnotě	Baterie se zahřívá na teplotu, která má negativní vliv na její životnost	Signalizovat zvýšenou teplotu, omezit maximální možný požadavek na moment motoru (ve výsledku omezení proudu motoru)
	Teplota článků překročila kritickou mezní hodnotu	Hrozí nebezpečí zničení baterie	Problém si řeší systém BMS zcela samostatně – rozpojí vypínací obvod a rozsvítí výstražnou kontrolku „BMS“
	Napětí článků se dostane mimo povolený rozsah	Snižování životnosti baterie/její zničení	Problém si řeší systém BMS zcela samostatně – rozpojí vypínací obvod a rozsvítí výstražnou kontrolku „BMS“
	Chybějící nebo přerušené měření teplot nebo napětí	Neexistují správné informace o hodnotách teploty a napětí – baterie se může dostat do nebezpečného stavu bez příslušné reakce systému	Problém si řeší systém BMS zcela samostatně – rozpojí vypínací obvod a rozsvítí výstražnou kontrolku „BMS“
	Chyba ve vlastní funkci BMS	Nemožnost monitorovat teploty a napětí akumulátoru	Problém si řeší systém BMS zcela samostatně – rozpojí vypínací obvod a rozsvítí výstražnou kontrolku „BMS“
Elektromotor	Teplota motoru se blíží mezní hodnotě	Nebezpečí poškození vinutí motoru při dalším zvyšování teploty	Signalizovat zvýšenou teplotu, omezit maximální možný požadavek na moment motoru (ve výsledku omezení proudu motoru)
	Teplota motoru překročila kritickou mezní hodnotu	Hrozí nebezpečí zničení vinutí motoru	Rozpojit vypínací obvod, signalizovat překročení kritické teploty

Měnič	Teplota spínacích prvků se blíží mezní hodnotě	Nebezpečí poškození spínacích prvků při dalším zvyšování teploty	Signalizovat zvýšenou teplotu, omezit maximální možný požadavek na moment motoru (ve výsledku omezení proudu motoru)
	Teplota spínacích prvků překročila kritickou mezní hodnotu	Hrozí nebezpečí zničení spínacích prvků	Rozpojit vypínací obvod, signalizovat překročení kritické teploty
Izolační stykače akumulátoru (AIR)	Rozpojení vypínacího obvodu	Vozidlo vyřazeno z provozu	Signalizovat rozpojení vypínacího obvodu pomocí TSAL, který rozsvítí taktéž signalizační kontrolku rozpojení trakčního systému
Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD)	Poškození izolace (izolační hladina je nižší než 500 Ω/V) nebo porucha funkce IMD	Není zaručen bezpečný izolační stav	Rozpojit vypínací obvod a rozsvítit výstražnou kontrolku „IMD“
Ventilátor trakčního akumulátoru	Ventilátor mimo provoz	Zvyšování teploty akumulátoru až na kritickou mez	Zastavení elektromotoru (řízená rekuperační brzda) a následné rozpojení vypínacího obvodu
Vodní pumpa chladičového systému motoru a měniče	Vodní pumpa mimo provoz	Zvyšování teploty motoru a měniče až na kritickou mez	Zastavení elektromotoru (řízená rekuperační brzda) a následné rozpojení vypínacího obvodu
Snímač tlaku v pneumatikách	Pokles tlaku v některé z pneumatik	Zhoršení jízdních vlastností, zvýšené opotřebení pneumatik	Zobrazení upozornění na palubním displeji

4 Návrh topologie klíčových komponentů čtyřkolky















Posledním bodem zadání této diplomové práce je navrhnout topologii čtyřkolky, která bude splňovat bezpečnostní požadavky vycházející z pravidel Formula SAE. V předchozích kapitolách bylo uvedeno, která pravidla jsou pro náš projekt podstatná, kde bylo naopak nutné dělat změny a byly definovány a specifikovány důležité komponenty, kterými bude čtyřkolka v budoucnu osazena. V neposlední řadě byly navrženy základní komunikace v rámci systému vozidla. Všechny tyto kroky vedly ke vzniku topologie, jejíž jednotlivé části budou uvedeny na následujících stránkách. Tato výsledná topologie slouží k celkové představě o rozmístění a zapojení jednotlivých komponentů a bude sloužit jako podklad pro další projektové činnosti, které budou v budoucnu probíhat.

Topologické schéma bude pro lepší orientaci v následujících podkapitolách rozděleno do ucelených funkčních celků, které budou podrobněji popsány. Celková topologie čtyřkolky je pak zahrnuta v rámci příloh, konkrétně jako příloha B. Většina komponentů, které jsou v topologii zakresleny, nese název nebo popis v českém jazyce. Schéma však obsahuje i komponenty, které jsou v souladu s pravidly Formula SAE označovány jejich anglickými zkratkami. Použití těchto komponentů je přímo vyžadováno pravidly Formula SAE a pro náš projekt je jejich použití vhodné, či dokonce nezbytné. Vysvětlení veškerých zkratk je uvedeno v seznamu symbolů a zkratk, který je součástí této práce. Dále jsou anglicky uvedeny některé přesně definované popisky, kterými musí být dle pravidel komponenty po osazení na vozidlo označeny, a také některé obecně zažité názvy komponentů a zařízení, jako je například označení „Master BMS“ apod.

4.1 Legenda použitých spojů

V topologickém schématu jsou jednotlivým spojům přiřazovány barvy a styly podle jejich funkce tak, aby byly navzájem dobře odlišitelné. Na následujícím obrázku (Obr. 21) tedy pro jednoznačnost uvádím legendu použitých spojů.

Legenda spojů:

	Vypínací obvod
	Kladný pól napájení (12 V, 5 V, 3,3 V)
	Záporný pól napájení (12 V, 5 V, 3,3 V) / obecný spoj
	Informační signály
	Připojení komponentů k pólům trakčního systému
	Chybový signál k výstražným kontrolkám
	Komunikace v rámci systému BMS
	Trakční systém
	Řídící signály pro měnič
	Napájení motoru
	Sběrnice CAN 1
	Sběrnice CAN 2
	Mechanické spojení (lanko)
	Brzdové hadice

Obr. 21: Legenda spojů použitých v topologickém schématu.

4.2 Blok řídicí

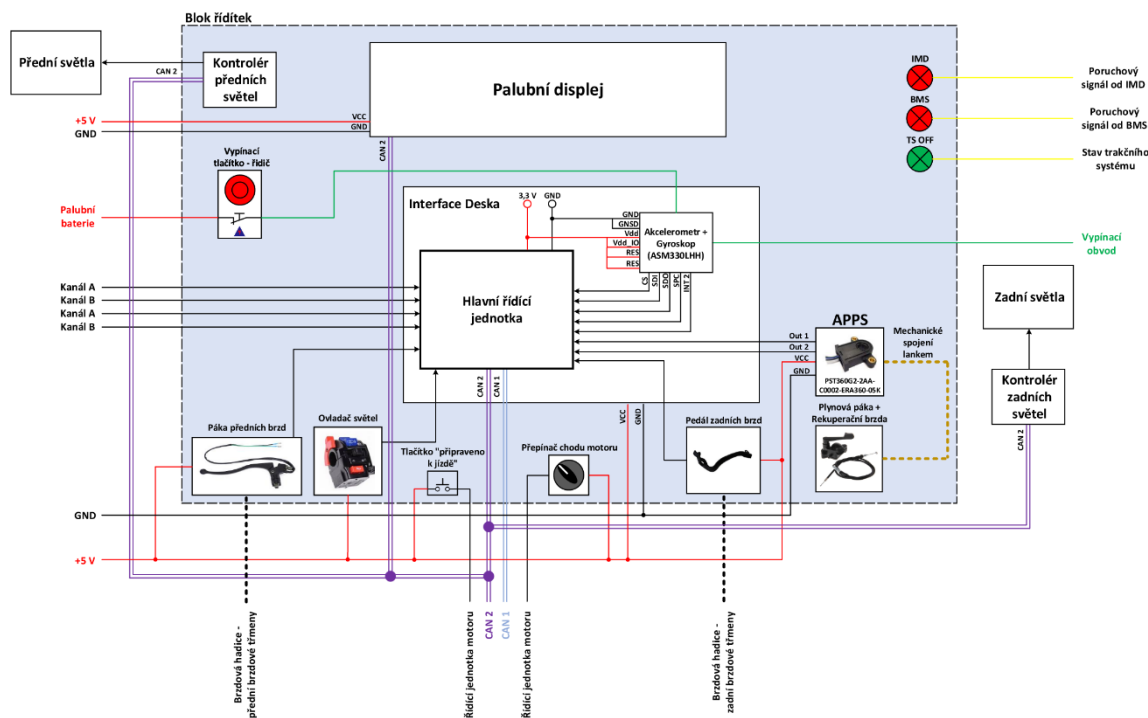
Blok řídicí je nejkompaktnější ze všech dílčích částí systému čtyřkolky. Tento blok zahrnuje nejvíce komponentů, přičemž se v naprosté většině jedná o komponenty nacházející se na rozhraní mezi jezdce a strojem samotným. Jinými slovy jde o komponenty, které jsou jezdci přímo přístupné a jejichž prostřednictvím lze přímo ovládat jízdu čtyřkolky nebo ovládat nejrůznější systémové funkce. Nacházejí se tu i komponenty, které mají za úkol jezdce informovat o aktuálním stavu vozidla a zobrazovat mu aktuální údaje o jízdě.

Jak je z topologického schématu (Obr. 22) patrné, nejvýraznějším vizuálním prvkem je palubní displej. Displej je připojen na sběrnici CAN 2, po které do něj směřují data a zprávy určené k zobrazení. Kompletní seznam zpráv určených pro palubní displej je součástí tabulky zpráv vysílaných po sběrnici CAN 2 (Tabulka 7). Výstražné zprávy, které bude

nutné vizualizovat, jsou pak uvedeny v tabulce poruchových stavů a příslušných reakcí (Tabulka 11). Není vyloučeno, že při budoucích pracích na projektu čtyřkolky budou na displej přidány další zprávy podle aktuálních potřeb. V rámci této práce jsou uvedeny pouze ty nejnútnejší z nich. Jedná se například o údaje o rychlosti vozidla, ujeté vzdálenosti, zbývající energii v akumulátoru, tlacích v jednotlivých pneumatikách nebo například o informace o detekované poruše některého z komponentů. Dalším významným vizuálním prvkem je trojice kontrolky signalizujících poruchový stav detekovaný systémem BMS, IMD a stav trakčního systému.

Jezdec má pak k dispozici řadu ovládacích prvků. V první řadě je třeba jmenovat plynovou páku, která je lankem mechanicky spojena s rotačním senzorem pozice plynového pedálu. Oba analogové signály ze senzoru (hlavní a redundantní) jsou zavedeny do hlavní řídicí jednotky. Zde se vyhodnotí míra stlačení plynové páky a po sběrnici CAN 1 se do řídicí jednotky motoru vyše příslušný požadavek. Jak již bylo zmíněno, může se jednat o požadavek na kladný točivý moment motoru nebo o požadavek na rekuperační brzdu. Dalšími ovládacími prvky jsou páka a pedál mechanických brzd, ovladač světel, přepínač chodu motoru, tlačítko pro signalizaci připravenosti k jízdě a vypínací tlačítko, které je prvním prvkem vypínacího obvodu a jezdec může jeho prostřednictvím v případě potřeby odpojit trakční systém. Signály z přepínače chodu motoru a tlačítka připravenosti k jízdě směřují do řídicí jednotky motoru, signály z ostatních jmenovaných komponentů jsou pak zavedeny do hlavní řídicí jednotky.

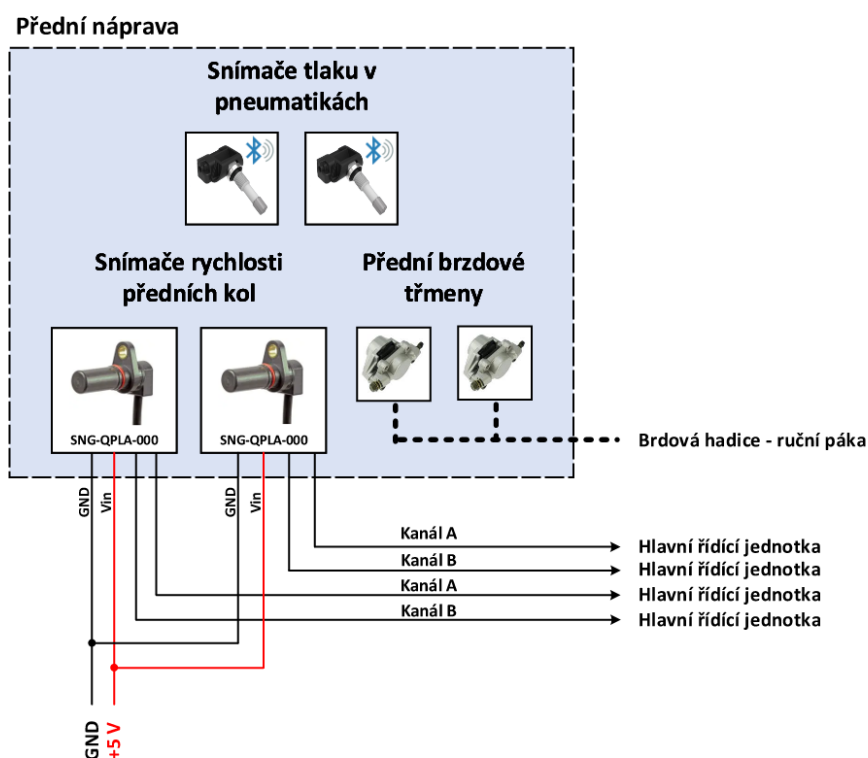
Z hlavní řídicí jednotky budou dále po sběrnici CAN 2 vysílány zprávy určené pro kontroléry ovládající světla. Po sběrnici CAN 1 budou vysílány údaje o aktuální rychlosti a směru otáčení předních kol a také údaje o stisknutí brzdové páky nebo pedálu. Do hlavní řídicí jednotky tedy vstupují také signály ze snímačů rychlosti a směru otáčení předních kol. Mezi hlavní řídicí jednotkou a integrovaným obvodem s akcelerometrem a gyroskopem probíhá komunikace pomocí SPI. Hodnota náklonu čtyřkolky v ose Y bude posílána do řídicí jednotky motoru po sběrnici CAN 1. Tento integrovaný obvod je také součástí vypínacího obvodu, jak je ostatně v obrázku naznačeno.



Obr. 22: Topologické schéma bloku řídicí.

4.3 Přední náprava

Na přední nápravě (Obr. 23) budou umístěny senzory rychlosti otáčení předních kol, díky kterým budeme schopni měřit aktuální rychlost vozidla a vypočítávat ujetou vzdálenost. Měření otáčky předních kol také budou porovnávány s otáčkami zadních kol a v případě prokluzu hnaných kol bude upraven požadavek na moment motoru. Vyhodnocovat se bude také směr otáčení. Každý ze senzorů má dva výstupní kanály – kanál A a B. Obdélníkové signály vzájemně posunuté o 90° směřují do hlavní řídicí jednotky, kde budou následně zpracovávány. V předních kolech budou použity ventily s integrovanými snímači tlaku v pneumatikách. Hodnoty tlaku budou prostřednictvím Bluetooth vysílány do hlavní řídicí jednotky. Pro úplnost jsou zakresleny i brzdové třmeny ovládané ruční brzdovou pákou.



Obr. 23: Topologické schéma přední nápravy.

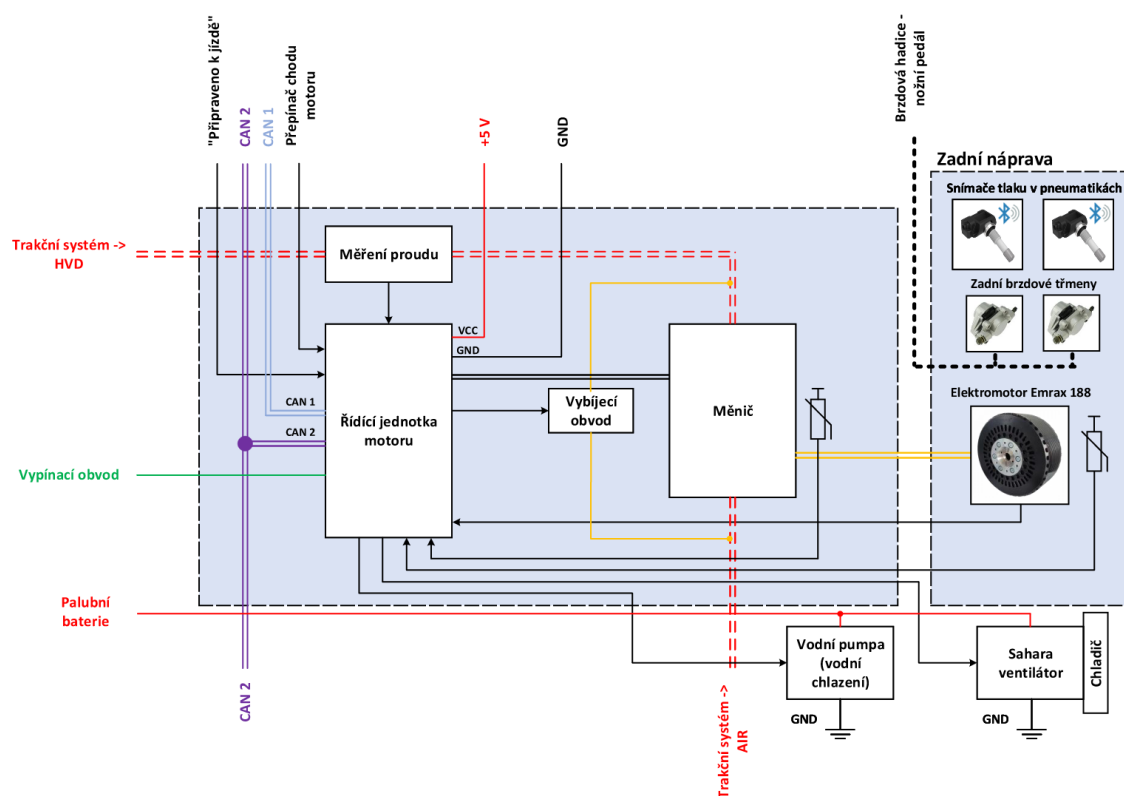
4.4 Blok elektrického pohonu

Blok pohonu se skládá z bloku měniče a z bloku zadní nápravy. Hlavním komponentem této části je elektromotor Emrax 188 umístěný na zadní nápravě, který bude čtyřkolku uvádět do pohybu. Motor bude pohánět pevnou zadní nápravu s pevným převodovým poměrem, který v současné době zatím není přesně určen. Motor bude napájen z třífázového výkonového měniče. Měnič bude dále řízen blokem řídicí jednotky motoru. Teplo vznikající v motoru i měniči bude odváděno pomocí vodního chladicího okruhu. Na zadní nápravě, resp. přímo v kolech, budou umístěny snímače tlaku v pneumatikách v podobě ventilků, ve kterých jsou snímače integrovány. Pro úplnost jsou zakresleny i brzdové třmeny ovládané nožním brzdovým pedálem.

Řídicí jednotka motoru je připojena k oběma sběrnicím CAN. Zprávy vysílané po obou těchto sběrnicích již byly v této práci definovány. Dalším důležitým vstupem do řídicí jednotky motoru je měřený proud na vstupu střídače a dále zpětná vazba od otáček a proudů motoru, která je nezbytná pro realizaci vektorového řízení. Řídicí jednotka motoru musí také vyhodnocovat teploty výkonového střídače a elektromotoru kvůli možnosti provedení zásahu do řízení v případě zvyšování některé z teplot směrem ke kritické hodnotě, v případě

překročení kritické hodnoty pak musí iniciovat rozpojení vypínacího obvodu, tedy úplné odstavení pohonu vozidla. V neposlední řadě je zakreslen i signál od tlačítka „připraveno k jízdě“, kterým jezdec signalizuje připravenost k jízdě, a signál od přepínače chodu elektromotoru. Řídící jednotka motoru je navíc připojena k vypínacímu obvodu a neustále sleduje jeho stav. V případě, že dojde k rozpojení vypínacího obvodu, řídicí jednotka motoru okamžitě aktivuje vybíjecí obvod a umožní tím rychlé a bezpečné vybití trakčního obvodu tak, aby v něm nezůstala naakumulovaná energie.

Co se týče výstupů z řídicí jednotky motoru, je třeba v první řadě uvést PWM výstupy pro řízení výkonového měniče. Dále jsou pak zakresleny výstupy signálů pro řízení vodní pumpy a ventilátoru sahara. Vodní pumpa i ventilátor budou napájeny napětím 12 V z uzemněného systému nízkého napětí.



Obr. 24: Topologické schéma bloku elektrického pohonu.

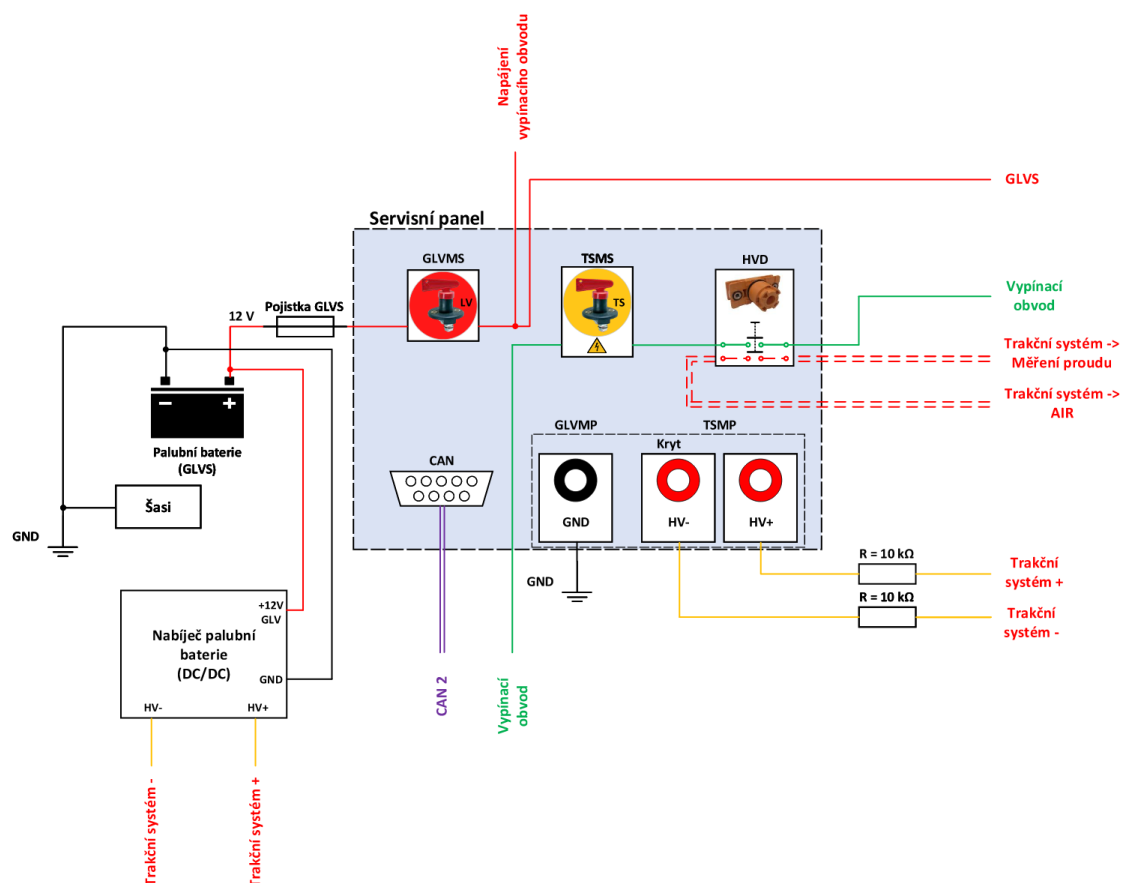
4.5 Servisní panel

Jak název napovídá, tato část systému čtyřkolky bude sloužit především pro odstavení systému při provádění servisních prací, revizí či jiných zásahů do systému. Dále tato část slouží jako diagnostické rozhraní. Prvním komponentem je hlavní vypínač uzemněného

systému nízkého napětí (GLVMS), který je umístěn hned za nadproudovou ochranou systému nízkého napětí a slouží pro odpojení celého systému od napájení z palubní baterie. Ze systému nízkého napětí je napájen i vypínací obvod, tudíž po rozpojení GLVMS bude odpojen i trakční systém. Hlavní vypínač trakčního systému (TSMS) je pak součástí vypínacího obvodu a slouží výhradně pro odpojení trakčního systému. Odpojovač vysokého napětí (HVD) je součástí vypínacího obvodu i samotného trakčního systému, což ukládají pravidla Formula SAE. HVD odpojuje kladný pól trakčního systému a jedná se o přímo přístupný prvek. Rozpojení HVD se provede pootočením a vyjmutím zástrčky na jeho vrcholu. Tento odpojovač slouží například právě pro servisní účely, kdy zajišťuje naprosto bezpečné a trvalé odpojení trakčního systému.

Další částí servisního panelu je diagnostické rozhraní. Na panel je vyveden konektor sběrnice CAN 2, po které se budou z hlavní řídicí jednotky vysílat nejrůznější diagnostické zprávy. Hlavní řídicí jednotka bude schopna zaznamenávat kritická data získaná měřením či výpočty a zprostředkuje je právě na tuto sběrnici. Budeme tak schopni diagnostikovat běžná provozní data, ale například i data z vybraných komponentů, která předcházela nehodě, poruše nebo jinému stavu mimo normální funkci. Dále jsou zde umístěny měřicí body, které jsou pravidly vyžadovány – měřicí bod uzemněného systému nízkého napětí (GLVMP) a měřicí body trakčního systému (TSMP). GLVMP je dle pravidel připojen k šasi vozidla, je označen nápisem „GND“, má černou barvu a je umístěn vedle TSMP. TSMP jsou pak připojeny k oběma pólům trakčního systému a v souladu s pravidly jsou umístěny vedle hlavních vypínačů GLVMS a TSMS. Označeny jsou pak nápisy „HV+“ a „HV-“. Každý měřicí bod TSMP je navíc zabezpečen rezistorem omezujícím proud, jehož hodnota je stanovena na základě hodnoty napětí trakčního akumulátoru, která v našem případě činí 226,8 V. Dle tabulky uvedené v pravidlech (Tabulka 1) pak hodnota omezovacího rezistoru vychází 10 k Ω .

V obrázku (Obr. 25) je také zakreslena lithium-iontová palubní baterie a je naznačen způsob jejího nabíjení z trakčního systému pomocí galvanicky odděleného DC/DC měniče. Pokud bude trakční systém odpojen nebo vyjmut celý akumulátorový kontejner, systém čtyřkolky bude nadále napájen z této palubní baterie, která se až do doby odpojení trakčního systému nabíjela ze samotné trakční baterie.



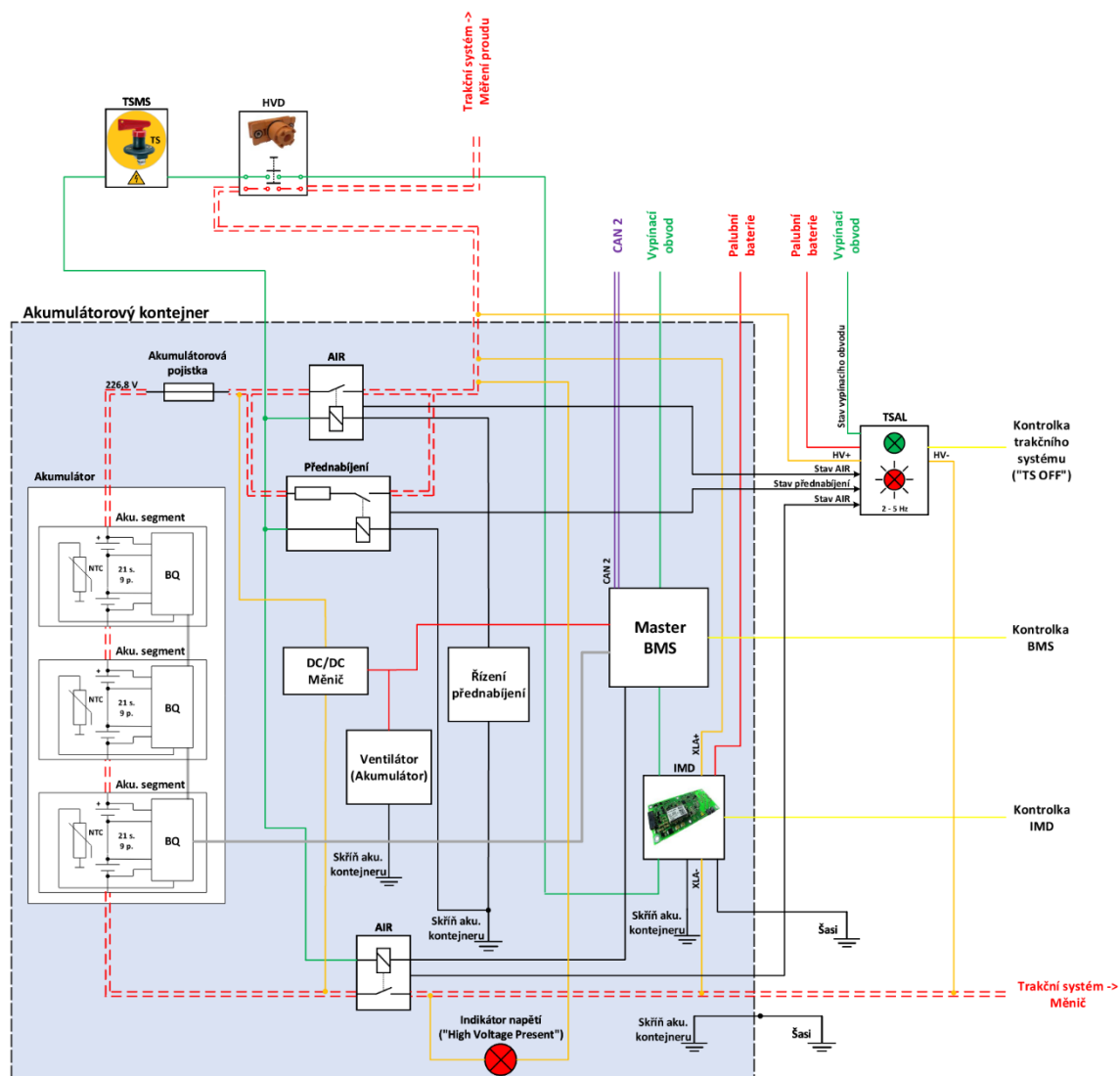
Obr. 25: Topologické schéma servisního panelu.

4.6 Akumulátorový kontejner

Akumulátorový kontejner bude kompletně, včetně veškerých komponentů, které má obsahovat, převzat ze zmiňovaného projektu elektrické motokáry. I v případě tohoto projektu je akumulátorový kontejner navrhován v souladu s pravidly Formula SAE, tudíž v něm jsou či budou osazeny i veškeré komponenty, které pravidla zmiňují. Konkrétně se uvnitř akumulátorového kontejneru kromě samotné baterie nachází nadproudová ochrana, izolační stykače akumulátoru (AIR), přednabíjecí obvod a jeho řízení, kompletní systém BMS, zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD), indikátor napětí a v neposlední řadě DC/DC měnič pro napájení desky Master BMS a chladicích ventilátorů akumulátoru. Výstupem z akumulátorového kontejneru jsou oba póly trakčního systému, poruchové signály od BMS a IMD ovládající výstražné kontrolky a sběrnice CAN 2, po které se přenáší zprávy vysílané z bloku Master BMS. Do kontejneru naopak vstupuje napájení z palubní baterie pro Master BMS.

Jak je z následujícího obrázku (Obr. 26) patrné, systém BMS a zařízení IMD jsou v souladu s pravidly součástí bezpečnostního vypínacího obvodu, který na svém konci napájí ovládací cívky izolačních stykačů akumulátoru a přednabíjecího obvodu. Indikátor napětí musí být připojen přímo k pólům trakčního systému, jelikož dle pravidel nesmí být ovlivňován řídicím signálem ovládajícím cívky izolačních stykačů akumulátoru. Zároveň musí být vždy funkční, a to i v případě, kdy je akumulátorový kontejner odpojen nebo odebrán. Skříň akumulátorového kontejneru je vodivě spojena s rámem čtyřkolky.

Pro úplnost a ucelenost jsou v obrázku zakresleny i bezprostředně navazující komponenty, kterými jsou odpojovač vysokého napětí (HVD), hlavní vypínač trakčního systému (TSMS) a indikátor trakčního systému (TSAL). HVD a TSMS jsou součástí vypínacího obvodu a jejich funkce již byla popsána dříve. TSAL je připojen k systému nízkého napětí, aby mohl ihned po jeho zapnutí indikovat stav trakčního systému, což přesně vyžadují pravidla. Pravidla dále zakazují jeho softwarové ovládání, proto je připojen k trakčnímu systému, jehož stavem je přímo řízen. Systém TSAL taktéž nebude vznikat v rámci projektu elektrické čtyřkolky (bude převzat z projektu elektroformule) a jeho přesná podoba není prozatím známa. Systém však bude navíc sledovat také stav kontaktů izolačních stykačů akumulátoru (AIR) a přednabíjecího obvodu s využitím pomocných kontaktů, kterými jsou stykače vybaveny. Bude tak schopen porovnávat, jestli stav trakčního systému odpovídá stavu, v jakém se nachází stykače. Sledován bude také stav vypínacího obvodu. V případě, že bude trakční systém odpojen, rozsvítí se kromě zeleného světla samotného zařízení TSAL také zelená kontrolka umístěná na řídítkách čtyřkolky. Jak je z obrázku patrné, TSAL již není součástí akumulátorového kontejneru, ale je umístěn na dobře viditelném místě na vozidle.



Obr. 26: Topologické schéma akumulátorového kontejneru.

Zhodnocení a závěr

Výsledkem této diplomové práce je navržené topologické schéma, které obsahuje veškeré klíčové komponenty elektrické čtyřkolky. Aby takové schéma mohlo vzniknout, bylo zapotřebí postupně udělat několik nezbytných kroků, které jsou v práci shrnuty. Nejdříve ze všeho byla prostudována a přeložena nejdůležitější pravidla platná pro soutěž Formula SAE. Ačkoli pro náš projekt nejsou tato pravidla závazná, posloužila jako vynikající základ pro vytvoření představy o potřebných komponentech, jejich funkci a jejich zapojení, ale také na jejich základě byla vytvořena prvotní koncepce celého systému čtyřkolky. Na základě našich možností a požadavků bylo vždy rozhodnuto o vhodnosti implementace daného pravidla do našeho projektu. Je nutné říci, že pravidla jsou ve skutečnosti rozsáhlejší. Zde jsou vypsána jen ta nejdůležitější, která jsou ale zároveň pro náš projekt naprosto dostačující.

Dalším bodem zadání, který byl v rámci této práce vyřešen, byl úkol přesně definovat klíčové komponenty, které budou na čtyřkolce osazeny. Snahou bylo tyto komponenty přesně vyspecifikovat, ať už na základě našich požadavků nebo podle nároků, které nám ukládají pravidla Formula SAE. Většina komponentů byla nejen vyspecifikována, ale také konkrétně vybrána z nabídky produktů dostupných na trhu. Při výběru komponentů hrála mimo jiné roli také jejich skladová dostupnost, což je parametr, který v dnešní době dlouhých dodávkových termínů nabývá na důležitosti. Každý z komponentů je pak v práci stručně popsán a jsou uvedeny jeho důležité parametry, výhody a důvody, které vedly k jeho výběru. Byl vytvořen také objednávkový list, který je tak připraven pro budoucí nákup těchto komponentů.

V dalším kroku bylo zapotřebí provést návrh komunikací mezi jednotlivými komponenty a řídicími jednotkami. Z praktických důvodů byla pro realizaci těchto komunikací zvolena sběrnice CAN, která má zejména v oblasti vozidel naprosto dominantní postavení. Pro účely budoucí realizace byla definována nejdůležitější data, která bude nutno získávat, zpracovávat a následně je v podobě informačních zpráv posílat po sběrnici. U každé zprávy je také uvedeno, jakým způsobem na ni musí její příjemce reagovat. Dále byla zpracována analýza základních poruchových stavů, které se mohou u jednotlivých komponentů vyskytnout. Je vždy důležité dopředu určit, jaká rizika mohou tyto poruchy představovat a co mohou mít za následek. Na základě těchto znalostí byly určeny způsoby, jakými je nutné

na tyto stavy reagovat. Jak návrh komunikací, tak analýza poruchových stavů obsahují pouze nejzákladnější zprávy, které bude potřeba vysílat, a poruchy, které se dají při testování a následném provozu čtyřkolky očekávat. Zcela jistě se v průběhu další realizace objeví další údaje, které bude nutné mezi komponenty komunikovat. Stejně tak se mohou objevit další nežádoucí stavy, na které bude nutné reagovat. Vzniklé tabulky jsou tedy otevřené pro další vývoj a v současné podobě slouží jako základní podklad pro programátora, který bude komunikace implementovat.

Výsledný topologický návrh systému čtyřkolky, který vznikl na základě zmíněných předchozích kroků, poskytuje přehled o klíčových komponentech, kterými bude čtyřkolka osazena. Díky přehlednému rozdělení do dílčích bloků je zřejmé, kde budou jednotlivé komponenty umístěny, jak budou zapojeny a jakým způsobem budou komunikovat s dalšími částmi systému. Vzniklá topologie opět slouží jako podklad pro realizace konkrétních prvků čtyřkolky, ale význam má také například pro návrh kabeláže. Výsledné schéma je taktéž otevřeným dokumentem a dá se očekávat, že v dalších fázích projektu bude upravováno, doplňováno či naopak redukováno dle aktuální potřeby.

Projekt elektrické čtyřkolky je na svém počátku. Cílem této práce bylo poskytnout celkový náhled na problematiku jeho realizace a definovat základní systémové prvky a funkce, na kterých bude dále stavěno. Tento cíl byl postupnými kroky splněn. V rámci tohoto projektu byla v tomto akademickém roce zpracována také práce zabývající se návrhem silového obvodu třífázového měniče. V dalších letech bude nutné navázat dalšími realizacemi jednotlivých částí systému, jejich testováním a postupným osazováním na samotné vozidlo.

Seznam obrázků

Obr. 1: Zapojení akumulátorů, Energy Meteru (převzato z [1]).	- 9 -
Obr. 2: Zapojení vypínacího obvodu dle pravidel Formula SAE (převzato z [1]).	- 18 -
Obr. 3: Snímač pozice plynového pedálu PST-360 (převzato z [4]).	- 28 -
Obr. 4: Ukázka redundantního výstupu snímače (převzato z [4]).	- 28 -
Obr. 5: Snímač rychlosti a směru otáčení SNG-QPLA-000 (převzato z [9]).	- 31 -
Obr. 6: Ukázka výstupu ze snímače a jeho zapojení (převzato z [9]).	- 31 -
Obr. 7: Snímač tlaku v pneumatikách (převzato z [17]).	- 32 -
Obr. 8: Hlavní vypínač baterie 08010100 (převzato z [13]).	- 32 -
Obr. 9: Nouzový vypínač FF0116BACAEA01 (převzato z [14]).	- 33 -
Obr. 10: Bender ISOMETER® IR155-3204 (převzato z [7]).	- 35 -
Obr. 11: Připojení IMD Bender ISOMETER® IR155-3204 (převzato z [7]).	- 35 -
Obr. 12: Odpojovač vysokého napětí EM30MSD (převzato z [8]).	- 37 -
Obr. 13: Ukázka rozpojení výkonového a signálového kontaktu (převzato z [8]).	- 37 -
Obr. 14: Stykač EV200HAANA (převzato z [5]).	- 38 -
Obr. 15: Zapojení izolačních stykačů akumulátoru a přednabíjecího obvodu.	- 39 -
Obr. 16: Zapojení vybíjecího obvodu trakčního systému.	- 40 -
Obr. 17: Křivky výkonu a momentu v závislosti na otáčkách motoru (převzato z: [2]).	- 42 -
Obr. 18: Příklad realizace fyzické vrstvy CAN (převzato z [10]).	- 45 -
Obr. 19: Úrovně na sběrnici CAN (převzato z [11]).	- 45 -
Obr. 20: Datová zpráva podle specifikace CAN 2.0A (převzato z [10]).	- 46 -
Obr. 21: Legenda spojů použitých v topologickém schématu.	- 62 -
Obr. 22: Topologické schéma bloku řídicíků.	- 64 -
Obr. 23: Topologické schéma přední nápravy.	- 65 -
Obr. 24: Topologické schéma bloku elektrického pohonu.	- 66 -
Obr. 25: Topologické schéma servisního panelu.	- 68 -
Obr. 26: Topologické schéma akumulátorového kontejneru.	- 70 -
Obr. 27: Celkové topologické schéma elektrické čtyřkolky.	II

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty omezovacích rezistorů (převzato z [1]).	- 12 -
Tabulka 2: Vzdálenosti vodičů trakčního systému a systému GLV (převzato z [1]).	- 15 -
Tabulka 3: Vzdálenosti mezi vodivými cestami/oblastmi na DPS s trakčním i GLV systémem (převzato z [1]).	- 15 -
Tabulka 4: Základní parametry akumulátoru.	- 40 -
Tabulka 5: Základní parametry elektromotoru Emrax 188.	- 42 -
Tabulka 6: Zprávy vysílané po sběrnici CAN 1 a příslušné reakce.	- 47 -
Tabulka 7: Zprávy vysílané po sběrnici CAN 2 a příslušné reakce.	- 50 -
Tabulka 8: Komunikace SPI.	- 52 -
Tabulka 9: Komunikace Bluetooth.	- 52 -
Tabulka 10: Komunikace mezi komponenty a příslušnými řídicími jednotkami.	- 54 -
Tabulka 11: Poruchové stavy, jejich důsledky a příslušné reakce.	- 58 -
Tabulka 12: Kusovník vybraných klíčových komponentů.	- I

Literatura

- [1] 2022 Formula SAE Rules. *Formula SAE* [online]. [cit. 10.9.2022]. Dostupné z: <https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [2] EMRAX 188 Technical Data Table. *EMRAX* [online]. Ver. 5.1. [cit. 30.8.2022]. Dostupné z: https://emrax.com/wp-content/uploads/2016/12/emrax_188_technical_data.pdf
- [3] BAKER, Bonnie. Choosing the Right Automotive Sensor for Throttle Control. *ElectronicDesign* [online]. 14.6.2018. [cit. 17.11.2022]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21806620/choosing-the-right-automotive-sensor-for-throttle-control>
- [4] PST-360 Hall-Effect Through-Shaft Rotary Position Sensor. *PIHER sensing systems* [online]. [cit. 20.11.2022]. Dostupné z: <https://www.piher.net/pdf/PST-360.pdf>
- [5] KILOVAC EV200 Series Contactor With 1 Form X Contacts Rated 500+ Amps, 12-900VDC. *Tyco Electronics* [online]. [cit. 8.3.2023]. Dostupné z: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=EV200_R_TBD_KILOVAC_EV200_Ser_Contactors&DocType=CS&DocLang=English
- [6] SMĚKAL, Roman. Trvalé monitorování a lokalizace poruchy izolačního odporu v izolovaných sítích. *Časopis ELEKTRO* [online]. [cit. 24.11.2022]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/trvale-monitorovani-a-lokalizace-poruchy-izolacniho-odporu-v-izolovanych-sitich--11938>
- [7] ISOMETER® IR155-3203/IR155-3204. *BENDER* [online]. [cit. 24.11.2022]. Dostupné z: https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/d/e/IR155-32xx-V004_D00115_D_XXEN.pdf
- [8] EM30MSD Series – Service Plug for 200A Applications. *Hirose Electric Co., Ltd* [online]. [cit. 23.2.2023]. Dostupné z: https://www.hirose.com/en/product/document?clcode=&productname=&series=EM30MSD&documenttype=Catalog&lang=en&documentid=D53033_en

- [9] SNG-Q SERIES – Quadrature Speed and Direction Sensors. *Honeywell International Inc* [online]. [cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/siot/en-us/products/sensors/speed-sensors/hall-effect-digital-speed-and-direction-sensors/sng-q-series/documents/sps-siot-speed-sng-q-series-datasheet-32304260-d-en-ciid-155812.pdf?download=false>
- [10] POLÁK, Karel. Sběrnice CAN. *Elektrorevue* [online]. 16.6.2003. [cit. 26.2.2023]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03021/index.html>
- [11] GRIFFITH, John. What do CAN bus signals look like? *Texas Instruments Incorporated* [online]. 4.6.2015. [cit. 26.2.2023]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/posts/what-do-can-bus-signals-look-like
- [12] EICHLER, Tomáš. Nebojte se FMEA. *Kvalita jednoduše* [online]. 10.1.2016. [cit. 9.3.2023]. Dostupné z: <https://kvalita-jednoduse.cz/fmea/>
- [13] 08010100 Series - 24V 300A SPST Waterproof Manual Battery Disconnect Switch with Fixed T-Handle. *Littelfuse* [online]. [cit. 9.3.2023]. Dostupné z: <https://www.littelfuse.com/products/switches/manual-battery-disconnect-switches/08010100>
- [14] FF01 Series – Low Profile E-Stop Switches with Ø 16 mm Bodies. *NKK Switches* [online]. [cit. 9.3.2023]. Dostupné z: <https://www.nkkswitches.com/pdf/FF01%20E-Stop%20Switches.pdf>
- [15] ASM330LHH. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 14.3.2023]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/asm330lhh.pdf>
- [16] INR21700-40T SAMSUNG SDI. *TME Electronic Components* [online]. [cit. 21.3.2023]. Dostupné z: <https://www.tme.com/Document/ce39e3f7739112dc81e80cdebae6518a/ACCU-INR21700-40T.pdf>
- [17] BLUETOOTH TPMS – INTELLIGENT TIRE SOLUTION. *Sensata Technologies* [online]. [cit. 2.4.2023]. Dostupné z: <https://www.sensata.com/sites/default/files/a/sensata-ble-vms-datasheet.pdf>
- [18] ŠANDA, Jakub. *Návrh silového obvodu třífázového střídače pro studentský projekt elektrické čtyřkolky*. V Plzni, 2023. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Katedra výkonové elektroniky a strojů. Vedoucí práce Jan Štěpánek.

- [19] STUDNIČKA, Jiří. *Konstrukce trakční baterie motokáry*. V Plzni, 2023. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Katedra výkonové elektroniky a strojů. Vedoucí práce Luboš Streit.

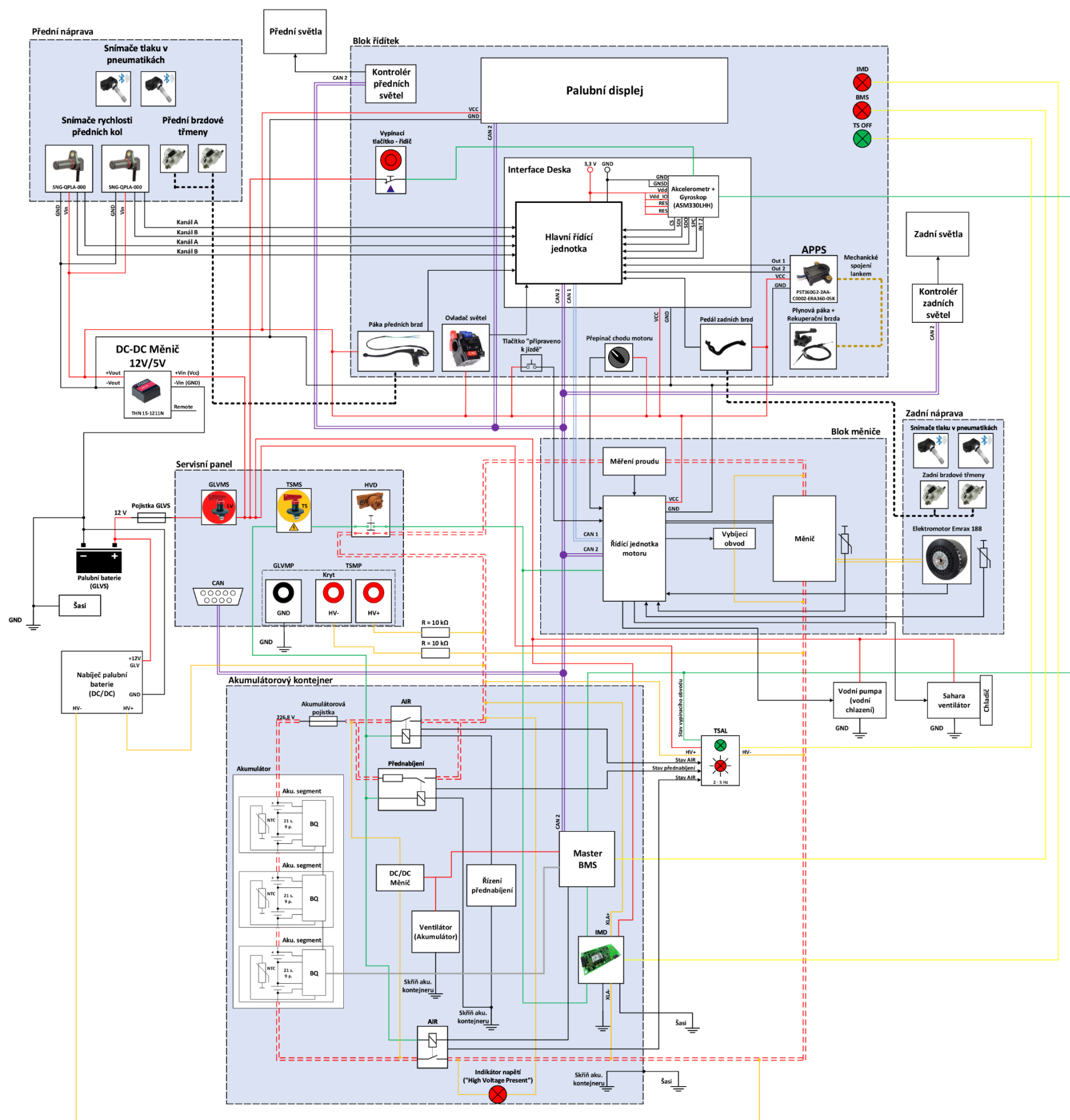
Příloha A

Tabulka 12: Kusovník vybraných klíčových komponentů.

Označení komponentu	Popis	Výrobce	Dodavatel	Číslo produktu - dodavatel	Jednotková cena (Kč)	Množství (ks)
PST360G2-2AA-C0002-ERA360-05K	Rotační snímač polohy – snímač pozice plynového pedálu (APPS)	Amphenol Piher Sensing Systems	Digi-Key	1993-1017-ND	1469,26	1
SNG-QPLA-000	Kvadrurní snímač rychlosti a směru – snímač rychlosti předních kol	Honeywell	Digi-key	480-6270-ND	1679,46	2
EM30MSD	Servisní zástrčka – Odpojovač vysokého napětí (HVD)	Hirose Electric	Digi-Key	H124827-ND	2161,74	1
EV200HAANA	Izolační stykač akumulátoru (AIR)	TE Connectivity	Digi-Key	A101162-ND	5590,44	3
08010100	Hlavní vypínače (GLVMS a TSMS)	Littelfuse Inc.	Digi-Key	08010100-ND	852,11	2
ASM330LHH	Akcelerometr a gyroskop	STMicroelectronics	Digi-Key	497-19078-2-ND	350,40	1
FF0116BACAEA01	Nouzové vypínací tlačítko (E-Stop)	NKK Switches	Digi-Key	360- FF0116BACAEA01-ND	998,93	1
ISOMETER® IR155-3204	Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD)	Bender	GHV Trading	IR155-3204	Na dotaz	1
Intelligent Tire Solutions TPM Sensor equipped with Bluetooth® wireless technology	Snímač tlaku v pneumatikách (TPMS)	Sensata Technologies	Sensata Technologies	-	Na dotaz	4

Pozn.: Jednotkové ceny uvedené v tabulce jsou platné k datu odevzdání diplomové práce, tj. k 26.5.2023.

Příloha B



Obr. 27: Celkové topologické schéma elektrické čtyřkolky.