

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Topologie klíčových komponentů elektroformule

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin HEŘMÁNEK**

Osobní číslo: **E16B0013P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Topologie klíčových komponentů elektroformule**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Úkolem bakalářské práce je vytvoření blokového schématu hlavních elektrických součástí elektroformule s ohledem na bezpečnost.

1. Proveďte rešerši stávajících pravidel SAE pro elektroformule.
2. Definujte klíčové komponenty elektroformule a jejich možnosti komunikace.
3. Navrhněte topologii splňující požadavky pravidel SAE.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

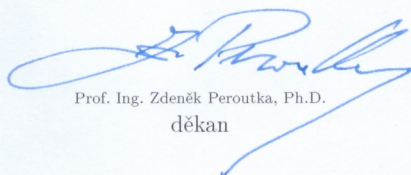
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

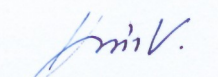
1. Formula SAE [online]. 2017 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z:
<http://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Streit, Ph.D.
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018
Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na topologický návrh a popis klíčových komponentů a systémů elektroformule, jejich uspořádání a komunikaci. Práce obsahuje rozbor pravidel FSAE, která definují funkci klíčových systémů a bezpečnostních prvků instalovaných na formuli. Na těchto pravidlech je sepsána a navržena topologie všech důležitých komponentů a jejich komunikace.

Klíčová slova

Elektroformule, komponenty, topologie, klíčové systémy, komunikace, funkce komponentů, uspořádání, schéma.

Abstract

The bachelor thesis presents topological design and description of key components and systems of electric formula, their arrangement and communication. The thesis contains an analysis of FSAE rules that define the function of major components and safety features installed on the formula. Topology of all important systems and their communication is written and designed on these rules.

Key words

Electric formula, components, topology, key systems, communication, component function, arrangement, schema.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Martin Heřmánek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubošovi Streitovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 REŠERŠE PRAVIDEL FORMULA SAE	12
1.1 BEZPEČNOSTNÍ SPÍNAČ BRZDĚNÍ (BOTS).....	12
1.2 KONTROLKA BRZD.....	12
1.3 SENZOR POZICE PLYNOVÉHO PEDÁLU (APPS).....	13
1.4 SNÍMAČ BRZDOVÉHO SYSTÉMU (BSE).....	14
1.5 BATERIE NÍZKÉHO NAPĚTÍ.....	14
1.6 VŠEOBECNÉ POŽADAVKY NA ELEKTROFORMULE.....	15
1.7 APPS/BRZDOVÝ PEDÁL – KONTROLA PRAVDĚPODOBNOTI.....	15
1.8 KONTEJNER BATERIE TRAKČNÍHO SYSTÉMU – ZÁKLADNÍ POŽADAVKY.....	16
1.9 KONTEJNER BATERIE TRAKČNÍHO SYSTÉMU – ELEKTRICKÉ POŽADAVKY.....	16
1.10 KONTEJNER BATERIE TRAKČNÍHO SYSTÉMU – ÚDRŽBOVÉ ZÁSTRČKY.....	17
1.11 IZOLAČNÍ STYKAČ BATERIE (AIRS).....	17
1.12 ŘÍDICÍ JEDNOTKA BATERIE (BMS).....	18
1.13 ODDĚLENÍ TRAKČNÍHO SYSTÉMU OD SYSTÉMU NÍZKÉHO NAPĚTÍ (GLVS).....	19
1.14 ROZMÍSTĚNÍ ČÁSTÍ TRAKČNÍHO SYSTÉMU.....	19
1.15 MĚŘÍCÍ BODY TRAKČNÍHO SYSTÉMU (TSMP).....	20
1.16 ODPOJENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ (HVD).....	20
1.17 ZAPOJENÍ PŘÍVODU TRAKČNÍHO SYSTÉMU.....	20
1.18 OBVODY PŘEDBĚŽNÉHO NABÍTÍ A VYBÍJECÍ OBVODY.....	21
1.19 INDIKÁTOR TRAKČNÍHO SYSTÉMU (TSAL).....	21
1.20 PŘIPRAVENO K JÍZDĚ (READY TO DRIVE).....	22
1.21 AKTIVACE TRAKČNÍHO SYSTÉMU.....	22
1.22 VYPÍNACÍ OBVOD (SHUTDOWN CIRCUIT).....	22
1.23 HLAVNÍ VYPÍNAČE (MASTER SWITCHES).....	24
1.24 NOUZOVÁ TLAČÍTKA (SHUTDOWN BUTTONS).....	25
1.25 ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ IZOLAČNÍHO STAVU (IMD).....	26
1.26 ZAŘÍZENÍ PRO PLAUSIBILITU BRZDOVÉHO SYSTÉMU (BSPD).....	26
1.27 SPÍNAČ SETRVAČNOSTI (IS).....	27
1.28 NABÍJECÍ VYPÍNACÍ OBVOD.....	28
1.29 NADPROUDOVÁ OCHRANA.....	28
1.30 PRÁCE NA BATERIOVÝCH KONTEJNERECH TRAKČNÍHO SYSTÉMU.....	28
1.31 NABÍJEČKY.....	29

2 DÍLČÍ SYSTÉMY A KOMPONENTY ELEKTROFORMULE.....	30
2.1 BATERIE VYSOKÉHO NAPĚTÍ.....	30
2.2 BATERIOVÝ KONTEJNER.....	33
2.3 MĚŘÍCÍ BODY.....	36
2.4 BATERIE NÍZKÉHO NAPĚTÍ.....	38
2.5 ODPOJENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ (HVD).....	40
2.6 INDIKÁTOR TRAKČNÍHO SYSTÉMU (TSAL).....	42
2.7 VYBÍJECÍ OBVOD.....	42
2.8 VYPÍNAČÍ OBVOD.....	45
2.9 STRÍDAČE.....	47
2.10 MOTORY.....	50
2.11 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA BATERIE (BMS).....	50
2.12 ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ IZOLAČNÍHO STAVU (IMD).....	52
2.13 SPÍNAČ SETRVAČNOSTI (IS).....	53
2.14 PEDÁLY.....	54
2.15 VOLANT.....	59
2.16 NABÍJENÍ.....	60
2.17 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA TRAKČNÍHO SYSTÉMU (μ C).....	61
3 CELKOVÁ TOPOLOGIE FORMULE.....	64
ZÁVĚR.....	67
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	68

Úvod

Předkládaná práce je součástí projektu zaměřeného na výstavbu studentské formule s elektrickým pohonem. Díky tomuto projektu mohlo vzniknout několik témat bakalářských a magisterských prací. Tato práce se zabývá návrhem topologie klíčových komponentů elektroformule.

Práce je rozdělena do tří částí; v první části jsou vypsána a rozdělena pravidla Formula SAE, která budou použita k návrhu topologie vozidla. Druhá část je zaměřena na samostatné dílčí systémy vozidla a jejich funkci ve vozidle s tím, že každý dílčí systém má vlastní topologické schéma. Třetí část se zabývá celkovou topologií vozidla a propojením dílčích systémů z druhé části. Zde se pohlíží na vozidlo jako na ucelený systém sestávající z dílčích systémů.

Seznam symbolů a zkratek

BOTS.....	Bezpečnostní spínač brzdění (Brake Over Travel Switch)
APPS.....	Senzor pozice plynového pedálu (Accelerator Pedal Position Sensor)
CAN.....	Datová sběrnice (Controller Area Network)
BSE.....	Snímač brzdového systému (Brake System Encoder)
GLV.....	Uzemněné nízké napětí (Ground Low Voltage)
GLVS.....	Systém nízkého napětí (Ground Low Voltage System)
AIR.....	Izolační stykač baterie (Accumulator Isolation Relay)
BMS.....	Řídicí jednotka baterie (Battery Management System)
TSMP.....	Měřicí bod trakčního systému (Tractive System Measuring Point)
HVD.....	Odpojení vysokého napětí (High Voltage Disconnect)
TSAL.....	Kontrolka trakčního systému (Tractive System Active Light)
IMD.....	Zařízení pro sledování izolačního stavu (Insulation Monitoring Device)
IS.....	Spínač setrvačnosti (Inertia Switch)
TSMS.....	Hlavní vypínač trakčního systému (Tractive System Master Switch)
GND.....	Uzemnění (Připojeno k šasi)
NO.....	Označení spínacího kontaktu (Normally Open)
NC.....	Označení rozpínacího kontaktu (Normally Close)
μC.....	Řídicí jednotka Trakčního systému
EM.....	Elektroměr
PkJ.....	Připraveno k jízdě
PLC.....	Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
BSPD.....	Zařízení pro plausibilitu brzdového systému (Brake System Plausibility Device)

1 Rešerše pravidel Formula SAE

Veškeré závody, pořádané FSAE International, se řídí pravidly, která je nezbytně nutné dodržovat při návrhu, konstrukci a testování formule. Pokud se při technické inspekci zjistí, že formule nedodržuje daná bezpečnostní pravidla, nebude připuštěna do závodu. Z tohoto důvodu musí být návrh topologie komponentů v souladu s pravidly FSAE.

1.1 Bezpečnostní spínač brzdění (BOTS)

- Pokud brzdný pedál překročí dráhu svého jmenovitého pohybu, BOTS musí zareagovat.
- BOTS musí být jednopólový spínač.
- Přepnutí BOTS do nevodivého stavu musí odpojit Trakční systém.
- Opakované spínání BOTS nesmí uvést vozidlo do pojízdného stavu.
- BOTS musí být navržen tak, aby jej řidič nemohl resetovat.
- Spínač musí být realizován analogovými komponenty bez použití PLC, jednotek řízení pohonu nebo obdobných digitálních jednotek.

1.2 Kontrolka brzd

- Vozidlo musí být vybaveno kontrolkou brzd, která je zepředu viditelná i při silném slunečním svitu.
- Kontrolka brzd musí svítit červeně.

1.3 Senzor pozice plynového pedálu (APPS)

- Pro APPS musí být použity minimálně dva vzájemně nezávislé senzory. Každý senzor musí pracovat na jiném principu (musí mít jiné přenosové funkce – pozitivní sklon s rozdílným gradientem nebo offsetem).
- Nepravděpodobnost je definována jako odchylka o více než 10 % dráhy pedálu mezi senzory.
- Pokud nastane mezi hodnotami APPS nepoměr a přetrvává déle než 100 ms, elektromotory musí být okamžitě odpojeny.
- Pokud jsou použity tři senzory, potom v případě selhání jednoho senzoru mohou být zbylé dva senzory (které souhlasí v rozsahu 10 %) použity ke sledování točivého momentu a třetí APPS senzor zůstane nevyužit.
- Technická inspekce kontroluje správnou funkci každého APPS senzoru. To musí být realizováno buď samostatným oddělitelným konektorem, který umožní kontrolu nebo přepínatelným break-out boxem zapojeným sériově s APPS senzory, který umožňuje odpojení jakéhokoliv APPS signálu.
- APPS signály musí být odesílány přímo do řídicí jednotky analogovým signálem nebo přes digitální přenosovou datovou sběrnici jako např. CAN nebo FlexRay.
- Jakákoliv chyba APPS nebo APPS kabeláže musí být detekovatelná a musí být vyhodnocena jako nepoužitelná.
- Při použití analogového signálu, budou APPS považovány za chybné, pokud dojde k rozpojení obvodu nebo k anomálii, která vygeneruje signál, který neodpovídá provoznímu rozsahu, např. $<0,5$ V nebo $>4,5$ V.

1.4 Snímač brzdového systému (BSE)

- Musí být nainstalován Snímač brzdového systému nebo Spínač pro měření polohy nebo tlaku na brzdový pedál.
- BSE musí být možné zkontrolovat během Technické inspekce, což může být realizováno samostatným oddělitelným konektorem, který detekuje chybné stavy nebo přepínatelným break-out boxem zapojeným sériově, který umožňuje odpojení jakéhokoliv BSE signálu.
- BSE signály musí být odesílány přímo do kontroléru analogovým signálem nebo přes digitální přenosovou datovou sběrnici jako např. CAN nebo FlexRay. Jakákoliv chyba BSE nebo BSE kabeláže, která přetrvává déle než 100 ms, musí být detekovatelná kontrolérem a musí s ní být zacházeno jako s nepravděpodobností, tak že dojde k okamžitému přerušení elektrické energie do pohonu. (Není nutné odpojit celý trakční systém od napájení, stačí pouze odpojení motorů).
- Při použití analogového signálu, budou BSE senzory považovány za chybné, pokud dojde k rozpojení obvodu nebo k anomálii, která vygeneruje signál, který neodpovídá provoznímu rozsahu, např. $<0,5$ V nebo $>4,5$ V.
- Pokud dojde k selhání senzoru, musí být okamžitě přerušeno napájení do motorů.

1.5 Baterie nízkého napětí

- Název „Baterie nízkého napětí“ je pouze označení baterie (stejně jako „Baterie vysokého napětí“). Nejedná se o napětí daná normou.
- Všechny baterie a napájecí zařízení musí být bezpečně připevněné k rámu vozidla.
- Všechny Baterie nízkého napětí musí být vybaveny nadproudovou ochranou, jejíž jmenovitá hodnota je rovna nebo menší než je maximální povolený výbojový proud článků.

- Kladný pól baterie musí být izolovaný.
- Jakákoli baterie s mokrým článkem umístěná v prostoru pro řidiče musí být uzavřena v nevodivém kontejneru (marine type) nebo jeho ekvivalent.
- Baterie na bázi Lithia musí být uzavřeny v pevném a nehořlavém pouzdře a odděleny od řidiče nehořlavou zábranou.

1.6 Všeobecné požadavky na elektroformule

- Trakční systém je vysokonapěťový systém, musí být kompletně izolován od šasi a jiných vodivých částí vozidla a musí obsahovat komponenty, které odpovídají maximální napětí Trakčního systému.
- Ostatní elektrické součásti (GLV) musí být uzemněny k šasi.
- Celý Trakční systém musí být galvanicky oddělený od GLV.
- Mezi Trakčním systémem a GLV systémem je galvanická izolace a proto některé komponenty (kontrolér motoru) mohou být součástí obou systémů.
- Motory obsažené v Trakčním systému musí být propojeny s baterií přes kontrolér motorů. Není povoleno přímé propojení mezi motory a baterií.

1.7 APPS/brzdový pedál – kontrola pravděpodobnosti

- Energie do motorů musí být okamžitě přerušena, pokud jsou mechanicky aktivované brzdy a APPS signalizuje, že pedál urazil více než 25% své dráhy. Toto musí být demonstrováno, když jsou kontroléry motorů pod zatížením.
- Odpojení motorů musí zůstat aktivované, dokud systém APPS nesignalizuje méně než 5% dráhy pedálu. Nezáleží, zda jsou brzdy stále aktivní nebo ne.

1.8 Kontejner baterie trakčního systému – základní požadavky

- Všechny články nebo vysokokapacitní kondenzátory, které napájí Trakční systém, budou vestavěny do Bateriových segmentů a musí být uzavřeny v Bateriových kontejnerech.
- Maximální statické napětí každého Bateriového segmentu musí být méně než 120 V DC a energie každého Bateriového segmentu musí být maximálně 6 MJ.

1.9 Kontejner baterie trakčního systému – elektrické požadavky

- Pokud je Kontejner baterie vyroben z elektricky vodivého materiálu:
 - Póly baterie a/nebo póly článků baterie musí být izolovány od vnitřní strany Kontejneru nevodivým materiálem, který je dán maximálním napětím Trakčního systému.
 - Všechny vodivé části na vnější straně Kontejneru baterie musí být napojeny na GLV systém. Propojení musí mít co nejnižší odpor.
- Každý Bateriový kontejner musí obsahovat alespoň jednu Pojistku a alespoň dva Stykače.
- Každý Segment musí být elektricky izolovaný použitím vhodného materiálu, mezi Segmenty v Kontejneru baterie a na horní straně Segmentů tak, aby nedocházelo k náhlému vytvoření oblouku. Vzduch není v tomto případě vhodný izolant.
- Všechny konektory Trakčního systému vně krytu musí zahrnovat řídicí kontakt/blokovací linku, který/která aktivuje vypnutí.
- Každý Bateriový kontejner musí obsahovat viditelný Indikátor, jako například LED, která se rozsvítí kdykoliv se mezi Izolačními stykači baterie (AIRs) a vozidlem objeví napětí vyšší než 60 V DC.

- Indikátor napětí baterie musí vždy fungovat i v případě pokud je Bateriový kontejner odpojen od GLV systému nebo vyndán z vozidla ven.

1.10 Kontejner baterie trakčního systému – Údržbové zástrčky

- Údržbové zástrčky musí umožňovat elektrické oddělení vnitřních Segmentů baterie, přičemž jeden Segment musí odpovídat hodnotám uváděných v pravidle a samostatné rozpojení musí být provedeno na obou pólech segmentu.
- Oddělení segmentů musí být navrženo tak, aby k oddělení došlo kdykoliv, bude-li Kontejner baterie otevřen kvůli údržbě nebo když budou Segmenty baterie vyjmuty ven z Bateriového kontejneru.
- Není přípustné používat stykače a spínače jako Údržbové zástrčky. Údržbové zástrčky musí být navrženy tak, aby bylo možné je fyzicky vyjmout a tím rozpojit Segmenty baterie.

1.11 Izolační stykače baterie (AIRs)

- V každém bateriovém kontejneru musí být nainstalovány minimálně dva stykače .
- AIR musí rozpojit oba póly baterie.
- Pokud jsou AIRs rozpojeny, nemělo by na vnější straně Kontejneru být naměřeno vysoké napětí.
- Stykače musí být typ NO.
- Maximální proud procházející Pojistkou, která chrání obvod Baterie Trakčního systému, musí být nižší než maximální vypínací proud AIR.

1.12 Řídicí jednotka baterie (BMS)

- Každá baterie musí být sledována Řídicí jednotkou (BMS) kdykoliv, když je Trakční systém aktivní nebo je baterie připojena k nabíječce.
- BMS musí průběžně měřit napětí jednotlivých článků k udržení napětí ve stanovených mezích uvedených v katalogu. Pokud jsou jednotlivé články zapojeny paralelně, stačí pouze jedno měření napětí.
- BMS musí průběžně měřit teploty kritických bodů baterie k udržení teploty pod její maximální přípustnou hodnotou, uvedenou v katalogu nebo pod 60°C, podle toho co je nižší.
- Teplota článků musí být měřena na záporném pólu příslušného článku a použitý snímač musí být také v přímém kontaktu se záporným pólem nebo s přípojnici. Pokud je senzor umístěn na přípojnici, musí být umístěn méně než 10 mm od pólu článku.
- U distribuovaných systémů BMS (jedno měření článku na desku), u kterých jsou připojení snímacích vodičů (sense wires) menší než 25 mm, není potřebné přídatné jištění. Pokud je deska chráněna proti zkratu, připojení k BMS je také chráněno. Pokud nejsou tyto podmínky splněny, potom musí být kladný pól článku chráněn tavným spojovacím vodičem.
- V případě potřeby může tavný spojovací drát zastávat také funkci snímacího vodiče (sense wire).
 - Pokud tavný spojovací drát tvoří část snímacího vodiče (sensewire), pak měřidlo tavného spojovacího drátu musí být vhodně dimenzováno k ochraně zbývající části snímacího vodiče pro měření napětí před nadproudy.
 - Pokud je některý z tavných spojovacích drátů poškozen nebo je-li propojení k měření napětí článku jakkoliv přerušeno, musí být tato porucha detekována BMS a nahlášena jako kritický problém napětí.

- BMS musí odpojit trakční systém rozepnutím Izolačních stykačů baterie (AIRs), pokud jsou zjištěna kritická napětí nebo přehřátí baterie podle katalogu výrobce článků s přihlédnutím na přesnost měřicího systému.
- Pokud BMS nezareaguje a nevypne, musí se v kokpitu rozsvítit červená LED dioda označená BMS.

1.13 Oddělení Trakčního systému od Systému nízkého napětí (GLVS)

- Mezi rámem vozidla (nebo jakýmkoliv vodivým povrchem, kde může dojít k neúmyslnému náhodnému dotyku) a jakoukoliv částí Trakčního systému nesmí dojít ke spojení.
- Trakční systém a obvody nízkého napětí (GLV) musí být fyzicky odděleny tak, aby nebyly provozovány přes stejný kabel nebo konektor, s výjimkou připojení blokovacího obvodu.
- Systémy nízkého napětí (GLV) nesmí být provozovány v Kontejneru baterie, pokud není požadováno. Výjimkami jsou Stykače baterie (AIRs), stejnosměrné měniče, BMS a IMD.

1.14 Rozmístění částí trakčního systému

- Motory kol umístěných mimo rám (motor, pomocné kabely a kabeláž mimo rám) jsou povoleny pouze tehdy, je-li přidána blokovácí jednotka ve formě Vypínacího obvodu, která při detekci poruchy (sestava kola je poškozena nebo uražena z vozidla) se aktivuje a rozepne Stykače baterie (AIRs). K aktivaci Vypínacího obvodu musí dojít ještě před poruchou kabeláže Trakčního systému.

1.15 Měřicí body trakčního systému (TSMP)

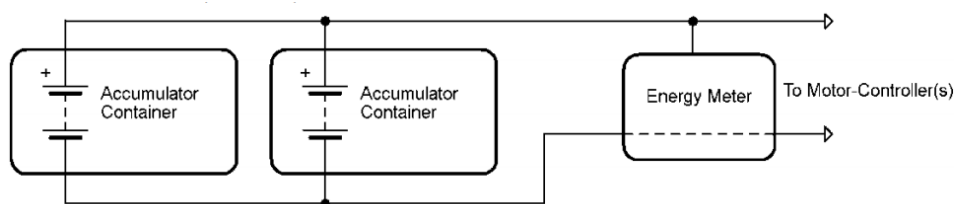
- Měřicí body trakčního systému umožňují během inspekce kontrolu, že je Trakční systém řádně odpojen v daném čase.
- Měřicí body musí být nainstalovány vedle Hlavních vypínačů (MS) a na kladném a záporném napájecím kabelu Regulátoru / Střídače motoru.
- Musí být nainstalován Měřicí bod systému nízkého napětí, který je připojen k uzemnění Systému nízkého napětí (připojeno k šasi) a který je umístěn vedle měřicího bodu trakčního systému (TSMP) a je označen jako GND.

1.16 Odpojení vysokého napětí (HVD)

- Musí být umožněno odpojení alespoň jednoho pólu Baterie trakčního systému rychlým vyjmutím volného, přímo přístupného prvku, pojistky nebo stykače (například při zaseknutí AIR).
- Musí být umožněno odpojení HVD bez demontáže jakékoliv části karoserie.
- Ovládání HVD s použitím dlouhé rukojeti, lana nebo kabelu se považuje za nepřijatelné.
- HVD musí aktivovat Vypínací obvod a musí dojít k rozepnutí AIRs.

1.17 Zapojení přívodu trakčního systému

- Všechny Bateriové kontejnery musí být zapojeny sériově nebo paralelně a musí napájet Trakční systém z jednoho napájecího bodu, na kterém bude umístěn Energy-Meter.
- Za tímto bodem nejsou povoleny žádné baterie nebo akumulátory, kromě přijatelně velkých kondenzátorů meziobvodu.



Obr. 1 Zapojení Bateriových kontejnerů [1]

1.18 Obvody předběžného nabití a vybíjecí obvody

- Předběžné nabití musí být zajištěno obvodem, který je schopný nabít meziobvod alespoň na 90 % aktuálního napětí baterie ještě před sepnutím druhého AIR.

Pokud dojde k rozpojení Vypínacího obvodu, musí být odstaven i Obvod předběžného nabití, aby nedošlo k předběžnému nabití systému.

- Všechny Obvody předběžného nabití musí být napájeny přes Hlavní vypínač (TSMS).
- Vybíjecí obvod musí být zapojen tak, aby byl vždy aktivní a to i při rozpojení Vypínacího obvodu. Navíc, musí být Vybíjecí obvod zajištěn proti rozpojení tak, že pokud dojde k rozepnutí HVD, musí Vybíjecí obvod stále vybíjet kondenzátory meziobvodu.
- Obvody předběžného nabití a vybíjecí obvod nesmí být jištěny.

1.19 Indikátor trakčního systému (TSAL)

- Vozidlo musí být vybaveno Indikací Trakčního systému, která musí svítit vždy, když je GLVS pod napětím, což indikuje stav Trakčního systému a musí být řízena napětím přítomným v Trakčním systému bez použití software řízení.
- Pokud je na výstupu z Bateriového kontejneru naměřeno napětí vyšší než 60 V DC nebo 25V AC, Indikátor musí červeně blikat s frekvencí mezi 2 až 5 Hz.

- Pokud je napětí na výstupu z Bateriového kontejneru menší než v předchozím pravidle, Indikátor musí svítit zeleně.

1.20 Připraveno k jízdě (Ready to Drive)

- Vozidlo je připraveno k jízdě, jakmile motory reagují na vstup APPS.
- Sepnutím pouze Vypínacího obvodu nesmí uvést vozidlo do režimu Připraveno k jízdě.
- Řidič musí po oživení Trakčního systému stisknout tlačítko, kterým uvede vozidlo do režimu Připraveno k jízdě a zároveň musí sešlápnout brzdový pedál.
- Z vozidla zazní charakteristický zvuk, který oznámí, že je vozidlo připraveno k jízdě.

1.21 Aktivace trakčního systému

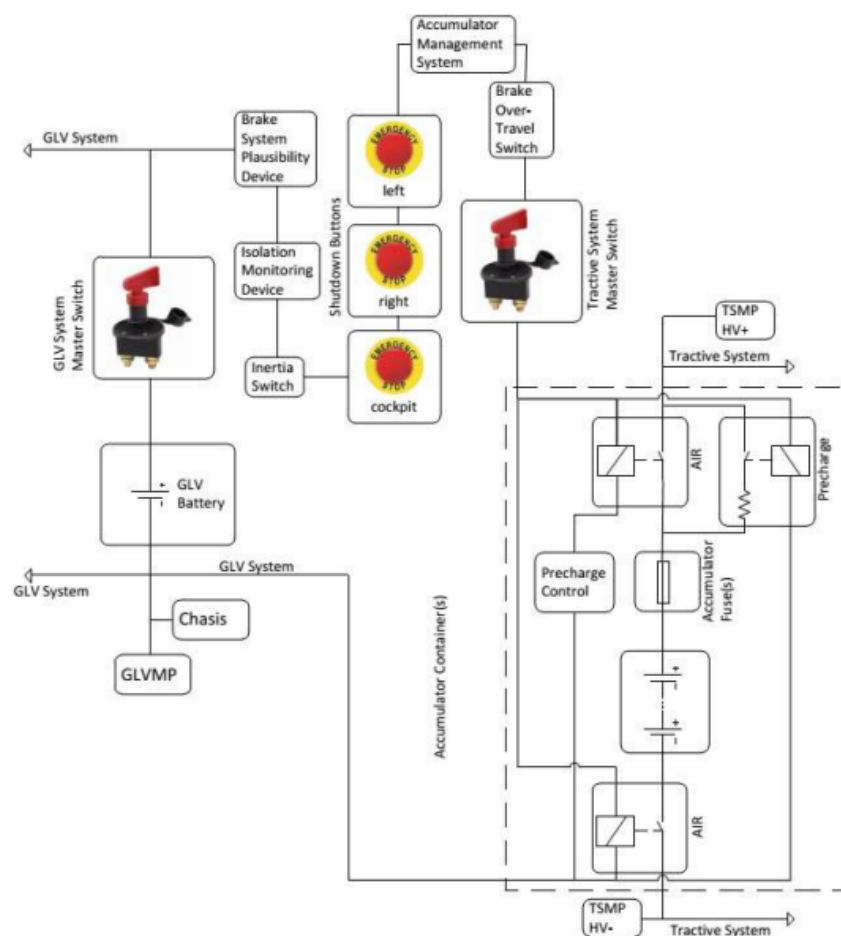
- Řidič musí být schopný aktivovat nebo resetovat Trakční systém zevnitř kokpitu bez vnější pomoci, kromě situací, kdy BMS, IMD nebo BSPD způsobily odpojení Trakčního systému.

1.22 Vypínací obvod (Shutdown Circuit)

- Vypínacím obvodem přímo protéká proud, který napájí cívky Izolačních stykačů baterie (AIRs).
- Vypínací obvod se skládá z nejméně dvou Hlavních vypínačů (Master Switch), tří Nouzových tlačítek (Shutdown Button), Bezpečnostního spínače brzdění (BOTS), Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD), Spínače setrvačnosti (IS), Zařízení pro plausibilitu¹ brzdového systému (BSPD) a Řídicí jednotky baterie (BMS).

¹ Signál je označován jako plausibilní, pokud je informace přenášená tímto signálem označena jako důvěryhodná (přijatelná).

- Porucha způsobující vypnutí systému GLV musí okamžitě odpojit Trakční systém.
- Pokud dojde k rozepnutí/přerušení Vypínacího obvodu, musí být Trakční systém odpojen rozepnutím všech Izolačních stykačů baterie (AIRs) a napětí Trakčního systému musí poklesnout pod 60 V DC nebo 25 V AC (efektivní hodnota) za méně než pět sekund po rozepnutí Vypínacího obvodu. Veškerý proud tekoucí z baterií musí být okamžitě přerušen.
- Všechny okruhy, které jsou součástí Vypínacího obvodu, musí být navrženy tak, aby ve vypnutém/odpojeném stavu byly rozpojeny tak, aby každý okruh přerušil proud, který napájí cívky Izolačních stykačů baterie (AIRs).
- Pokud dojde k vypnutí Trakčního systému za jízdy, tak motory musí běžet na volnoběh. Na motory nesmí působit žádný brzdový moment.
- Pro zajištění dodatečné ochrany Izolačních stykačů baterie může být použit kondenzátor pro udržení zavřených AIRs po dobu až 250 ms po vypnutí aktuálního zdroje, který je udržuje zavřený, takže řídicí jednotka motoru má čas snížit trakční proud předtím, než Izolační stykače odpojí baterii od zbytku Trakčního systému.
- Musí být možné prokázat, že všechny funkce Vypínacího obvodu fungují správně, včetně všech blokování.
- Každý systém, který je schopný rozepnout Vypínací obvod, musí mít vlastní neprogramovatelný výkonový stupeň. Příslušné výkonové stupně musí být navrženy tak, aby porucha nemohla vést k tomu, že elektrická energie bude přiváděna zpět do Vypínacího obvodu.
- Nouzová tlačítka, Bezpečnostní spínač brzdění (BOTS), Hlavní vypínač trakčního systému (TSMS) a všechna blokování musí přímo přenášet proud do Izolačních stykačů baterie a neprocházet žádným výkonovým stupněm.



Obr. 2 Blokové zapojení Bateriového kontejneru a Vypínacího obvodu [1]

1.23 Hlavní vypínače (Master Switches)

- Každé vozidlo musí být vybaveno dvěma Hlavními vypínači.
- Hlavní vypínač nízkého napětí (GLVMS) musí kompletně přerušit průtok elektrické energie do Systému nízkého napětí (GLV System). Musí být označen zkratkou “LV“ a musí obvod spínat přímo, nelze spínat přes relé nebo logické obvody.
- Hlavní vypínač trakčního systému (TSMS) musí rozpínat Vypínací obvod, musí obvod spínat přímo, nelze spínat přes relé nebo nebo logické obvody.
- TSMS musí být umístěn jako poslední spínač před cívkami Izolačních stykačů baterie, kromě Obvodů předběžného nabití a pevně zapojených blokování.

Blokování mezi TSMS a Izolačními stykači nesmí být v nízkém (zemním) spojení s cívkami Izolačních stykačů. Musí být označen zkratkou “HV“ nebo “TS“ a trojúhelníkovou značkou s černým bleskem na žlutém pozadí.

- Musí být vybaven funkcí „uzamčení“, aby se zabránilo náhodnému spuštění Trakčního systému.
- Oba Hlavní vypínače musí být rotačního mechanického typu, s červeným odnímatelným klíčem, který může být vyjmut pouze v rozepnuté poloze vypínače.

1.24 Nouzová tlačítka (Shutdown Buttons)

- Na vozidle musí být nainstalován systém tří Nouzových tlačítek.
- Stisknutí jednoho z těchto tří tlačítek musí oddělit Trakční systém od baterie rozepnutím Vypínacího obvodu.
- Každé Nouzové tlačítko musí být stlač-vytáhni (push-pull) nebo stlač-otoč (push-rotate) nouzový vypínač, kde stisknutí tlačítka způsobí rozepnutí Vypínacího obvodu.
- Je zakázáno u těchto tlačítek použít programovatelné logické obvody.
- Jedno tlačítko musí být z každé strany vozidla za sekci řidiče přibližně na úrovni hlavy řidiče.
- Jedno Nouzové tlačítko musí být umístěno v kokpitu jako hlavní vypínač, který se nachází v dosahu připoutaného řidiče, vedle volantu tak, aby volant nebo jiná část vozidla nepůsobila jako překážka k dosažení tlačítka.

1.25 Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD)

- Každé vozidlo musí mít Zařízení pro sledování izolačního stavu nainstalovaný v Trakčním systému.
- IMD musí být Bender A-ISOMETER® iso-F1 IR155-3203 nebo -3204 nebo ekvivalentní IMD schválené pro automobilové účely.
- Hodnota odezvy IMD musí být nastavena na 500 Ω/V , vztažená k maximálnímu provoznímu napětí Trakčního systému.
- V případě selhání izolace nebo poruchy IMD, musí IMD rozpojit Vypínací obvod. To musí být provedeno bez použití programovatelné logiky.
- Stav IMD sleduje řidič pomocí kontrolky, která svítí, když IMD detekuje selhání izolace nebo když IMD detekuje poruchu ve svém vlastním provozu (např. když ztratí referenční zem).
- Kontrolka IMD musí svítit červeně, musí být označena jako “IMD“ a musí být jasně viditelná pro sedícího řidiče za jasného slunečního světla.

1.26 Zařízení pro plausibilitu brzdového systému (BSPD)

- BSPD je samostatný neprogramovatelný obvod, který musí být na vozidle použit tak, aby při prudkém brzdění (bez zablokování kol) a při přivedení kladného proudu ze střídače do motoru (proud k pohonu vozidla vpřed) byly Izolační stykače baterie rozepnuty. K rozepnutí AIRs musí dojít, pokud situace přetrvává déle než 0,5 s.
- Mezní hodnota proudu pro spuštění obvodu musí být nastavena na úroveň, kdy je ve stejnosměrném obvodu dodáno 5 kW elektrického výkonu do motorů při jmenovitém napětí baterie.

- Obvod musí také obsahovat detekci rozepnutých / zkratovaných obvodů pro vstupy senzorů tak, aby byl Vypínací obvod rozepnut.
- Toto zařízení musí být navíc vybaveno kontrolami plausibility, které provádí regulátor, který přijímá a interpretuje požadavky na kroutící moment od řidiče a dodává kroutící moment kolům.
- Tým musí navrhnout zkoušku, která otestuje správnou funkci BSPD během elektrotechnické kontroly. Navrhuje se, aby se vyslal příslušný signál do neprogramovatelného obvodu, který představuje proud pro dosažení 5 kW, zatímco bude sešlápnut brzdový pedál do požadované polohy nebo silou, která představuje tvrdé brzdění.

1.27 Spínač setrvačnosti (IS)

- Všechna vozidla musí být vybavena Spínačem setrvačnosti. Tento spínač musí být resetovatelný Crash senzor od firmy Sensata nebo jeho ekvivalent.
- Zařízení se musí spustit v důsledku nárazového zatížení, které zpomalí vozidlo v rozmezí 8 g až 11 g v závislosti na době zpomalování (viz. Katalogový list zařízení Sensata).
- Spínač setrvačnosti musí být součástí vypínacího obvodu a musí být zapojen v sérii s Nouzovými tlačítky, takže náraz bude mít za následek rozepnutí Vypínacího obvodu a rozepnutí Izolačních stykačů baterie.
- Spínač musí zůstat rozepnutý až do manuálního resetování.
- Spínač může resetovat řidič z kokpitu.

1.28 Nabíjecí vypínací obvod

- Nabíjecí vypínací obvod při nabíjení sestává alespoň z Tlačítka pro vypnutí nabíječky, Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD) a Řídící jednotky baterie (BMS).
- Pokud je Vypínací obvod rozpojen vlivem BMS nebo IMD, musí zůstat Trakční systém odpojen, dokud není obvod ručně resetován.
- Nabíječka musí obsahovat tlačítko nouzového zastavení typu push, které má minimální průměr 25 mm a musí být zřetelně označeno.

1.29 Nadproudová ochrana

- Všechny elektrické systémy (nízkého i vysokého napětí) musí mít odpovídající nadproudovou ochranu.
- Trvalý jmenovitý proud nadproudové ochrany nesmí být větší než trvalý jmenovitý proud jakékoliv elektrické komponenty (např. vodič, přípojnice, článek).
- Všechny nadproudové ochrany musí být dimenzovány na nejvyšší napětí v systémech, které chrání.
- Pokud je použito více paralelních bateriových článků nebo kondenzátorům musí mít každý paralelní prvek individuální nadproudovou ochranu.
- Články s vnitřní nadproudovou ochranou mohou být provozovány bez vnější nadproudové ochrany.

1.30 Práce na Bateriových kontejnerech Trakčního systému

- Otevírat nebo pracovat na Kontejnerech baterie je povoleno pouze v Nabíjecí zóně a během Elektrotechnické inspekce.
- Kdykoliv jsou Kontejnery baterií otevřeny, vnitřní Segmenty baterie musí být rozpojeny Údržbovými zástrčkami.

1.31 Nabíječky

- Všechna propojení nabíječky / nabíječek musí být izolovány a zakryty.
- Konektor nabíječky musí obsahovat blokování tak, aby žádná strana konektoru nebyla pod napětím, pokud není správně připojena k akumulátoru.
- Během nabíjení musí být v provozu BMS a musí být schopné v případě zjištění poruchy vypnout nabíječku.
- Při nabíjení baterie musí být IMD v provozu a musí být schopné vypnout nabíječku. Nabíječka musí být vybavena aktivním IMD nebo musí být uvnitř akumulátoru aktivní IMD.

Všechna pravidla obsažená v první kapitole byla vypsána a přeložena autorem práce z dokumentu Formula SAE Rules 2019. Originální text je dostupný z: <http://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>

2 Dílčí systémy a komponenty elektroformule

Následující podkapitoly obsahují rozbor dílčích systémů formule, přičemž pro téměř každý dílčí systém je nakresleno topologické schéma, ve kterém bude ukázané umístění komponent a jejich zapojení s ostatními systémy tak, aby nebyla porušena pravidla FSAE.

U některých schémat je nakreslený blok, který dané zapojení reprezentuje a částečné popisky pro lepší srozumitelnost. Ve schématech jsou barevně označena propojení mezi komponenty pro lepší přehlednost ve schématech.

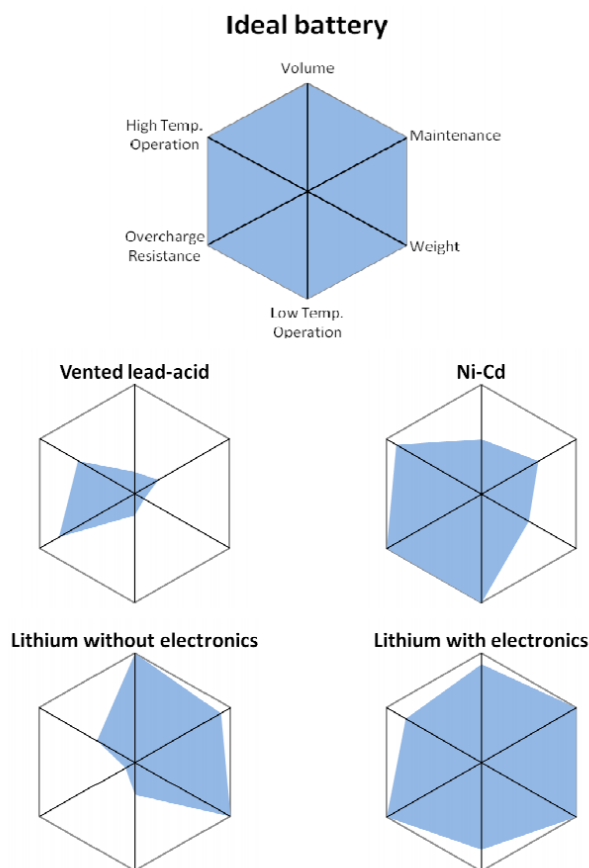
- **Červeně** je označený kladný pól Baterie vysokého napětí,
- **Žlutě** je označený Systém nízkého napětí,
- **Zeleně** je označené napájení Izolačních stykačů baterie a tudíž i Vypínací obvod,
- **Fialově** jsou označena datová a měřící propojení,
- **Azurově** je označené napájení AIRs během nabíjení,
- Tečkovaně jsou vyznačeny světelné signalizace.

2.1 Baterie vysokého napětí

Baterie vysokého napětí bude sestavena z Lithium-Ionových bateriových článků Panasonic NCR20700A, přičemž kapacita jednoho článku baterie je 3,3 Ah a napětí 3,6 V. Celkové napětí baterie bude 560 V.

Lithium-Ionové články jsou svými vlastnostmi velmi využívány právě v elektromobilech, protože mají relativně vysokou hustotu energie ve srovnání s jinými chemikáliemi, jsou bezúdržbové, protože jsou hermeticky uzavřeny a s řídicí

elektronikou jsou schopny pracovat v širokém teplotním rozsahu. Tyto články však vyžadují určité řízení a správu, kterou zprostředkuje Řídicí jednotka baterie (BMS), díky které je možné využívat potenciál, který tyto články nabízejí. Obr. 3 jasně ukazuje výborné vlastnosti Li-Ion článků v porovnání s jinými. [2]



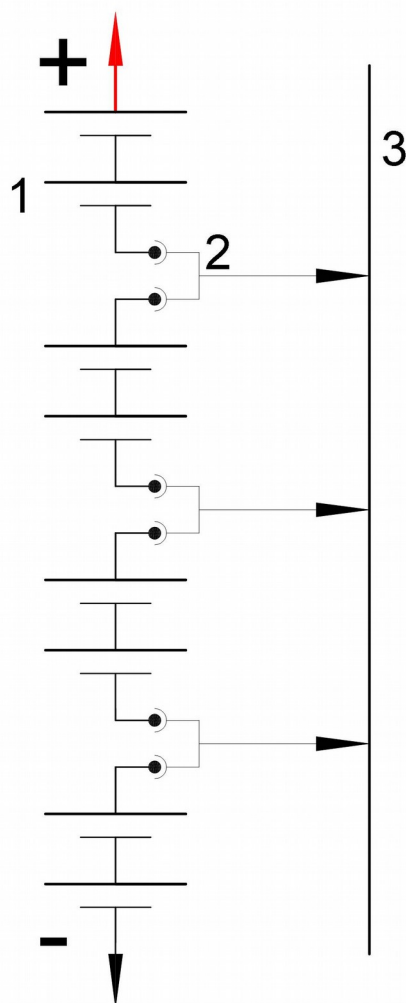
Obr. 3 Porovnání charakteristických vlastností různých typů baterií [2]

Sériové zapojení článků bude tvořit tzv. Bateriový segment, jehož parametry jsou omezeny pravidly. Maximální statické napětí jednoho segmentu musí být menší než 120 V DC a energie jednoho segmentu nesmí překročit 6 MJ. Každý segment musí být elektricky izolován tak, aby nedošlo k vytvoření elektrického oblouku.

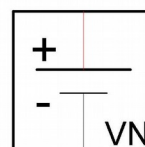
Bateriové segmenty budou zapojeny sériově a budou odděleny Údržbovými zástrčkami. Zástrčky jsou mechanické zabezpečovací prvky, které v případě potřeby otevření Bateriového kontejneru rozpojí bateriové segmenty. Nesmí být použity spínače nebo stykače, musí se jednat o čistě mechanický prvek.

Jedno z možných řešení je schématicky znázorněno na obr. 4 a může být realizováno montáží Údržbových zástrček přímo k víku Bateriového kontejneru tak, aby při zavřeném víku zástrčky propojovaly Bateriové segmenty a v případě otevření víka došlo rovnou k vytažení zástrček a rozpojení obvodu bez potřeby manuálního vyjmutí zástrček.

Zapojení Článků baterie a Údržbových zástrček



- 1 - Článek baterie
- 2 - Údržbová zástrčka
- 3 - víko Bateriového kontejneru



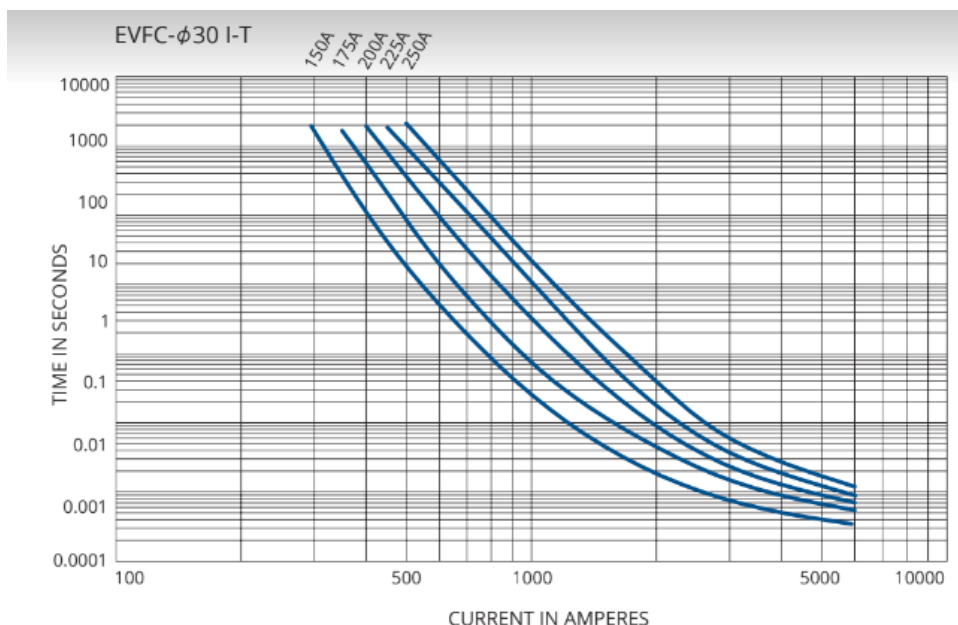
Obr. 4 Schéma zapojení Článků baterie a Údržbových zástrček

2.2 Bateriový kontejner

Bateriový kontejner je nádoba, ve které jsou uloženy Bateriové články seskupené do Bateriových segmentů, které jsou odděleny Údržbovými zástrčkami. Pokud je Bateriový kontejner vyrobený z vodivého materiálu, musí být Kontejner připojený ke GLV systému a Bateriové články musí být izolovány od vnitřní strany kontejneru. Dále jsou v Bateriovém kontejneru uloženy spínací a bezpečnostní prvky, které jsou schématicky znázorněny na obr. 6 včetně jejich zapojení. Mezi Bateriovým kontejnerem a střídačem musí být podle pravidel zapojen Elektroměr (Energy-Meter), který dodá organizátor a který bude sloužit ke kontrole výkonových a napěťových limitů. Umístění Elektroměru v obvodě je vyobrazeno na obr. 11.

- **Pojistka**

Hlavní důvod zapojení pojistky je ochrana Bateriových článků proti zkratům. Působí také jako ochrana v případě selhání měniče nebo motoru (přímý zkrat). Předpokládané parametry pojistky jsou 450 V DC a 250 A. Těmto hodnotám odpovídá vysoko-napěťová pojistka EVFC od firmy PEC s vypínací schopností až 6000 A, která se běžně používá v automobilním průmyslu a která by se dala použít ve formuli. Samozřejmě se musí při výběru pojistky také přihlížet na její rozměry a hmotnost.



Obr.5 Vypínací charakteristiky pojistky PEC EVFC [3]

- **Izolační stykače baterie**

Izolační stykače baterie budou zapojené na obou pólech baterie, což znamená, že v Bateriovém kontejneru budou dva Stykače. Jejich práce spočívá v připojování a odpojování Baterie vysokého napětí k Trakčnímu systému. Z toho vyplývá, že Stykače musí být schopny přenášet a rozpínat vysoké proudy tekoucí z Bateriových článků do střídačů. Kontakty Stykače musí být typu NO (Normally Open), tyto kontakty budou ovládané cívkou, která bude napájena stejnosměrným napětím z Baterie nízkého napětí přes Vypínací obvod, aby v případě jakékoliv závady či poruchy na vozidlo došlo k okamžitému přerušení napájení cívek Stykačů a následnému přerušení dodávky elektrické energie do Trakčního systému formule. Parametry pro naši formuli jsou 450 V DC a 250 A a stejně jako u Pojistky je nutné přihlídnout také na rozměry a hmotnost Stykače. Maximální proud Stykače musí být vyšší než maximální proud Pojistky, aby v případě poruchy nedošlo ke zničení Stykačů, ale k vybavení Pojistky.

- **Obvod předběžného nabití**

Pokud připojíme Baterii vysokého napětí přímo k Trakčnímu systému přes Izolační stykače baterie, začne obvodem procházet nadproud způsobený vnitřní kapacitou měniče, následovaný přepětím, které je způsobené baterií a indukčností kabeláže. [4]

Toto proudové přetížení a přepětí může způsobit mnoho problémů ostatním komponentům jako jsou:

- Poškození měničů nebo jiné kapacitní zátěže,
- Poškození Bateriových článků, které nejsou na dimenzovány na proudová přetížení,
- Zničení Pojistky v Bateriovém kontejneru,
- Svaření kontaktů Stykačů baterie způsobené tepelným namáháním.

Zapojením Obvodu předběžného nabití vyřešíme problémy popsané výše. Obvod předběžného nabití je zapojen na kladném pólu baterie a přemostuje kontakt Izolačního stykače baterie. Obvod je vybaven Před-nabíjecím odporem, který omezí nárůst proudu, takže pokud chceme připojit baterii k Trakčnímu systému, musíme nejprve sepnout Stykač obvodu předběžného nabití do té doby než začne odporem procházet dostatečně nízký proud, který neohrozí zbylé přístroje v kontejneru, dojde k sepnutí druhého Izolačního stykače baterie a proud může procházet cestou nižšího odporu. Proto je mezi AIRs umístěna Přednabíjecí kontrola, která ve chvíli, kdy obvodem prochází požadovaný proud, sepne i druhé AIR. Cívka stykače v Obvodu předběžného nabití bude napájena z Baterie nízkého napětí stejně jako jsou napájeny AIRs. Před-nabíjecí obvod nemusí být vůbec zapojen, jeho zapojení závisí na parametrech baterie a Trakčního systému.

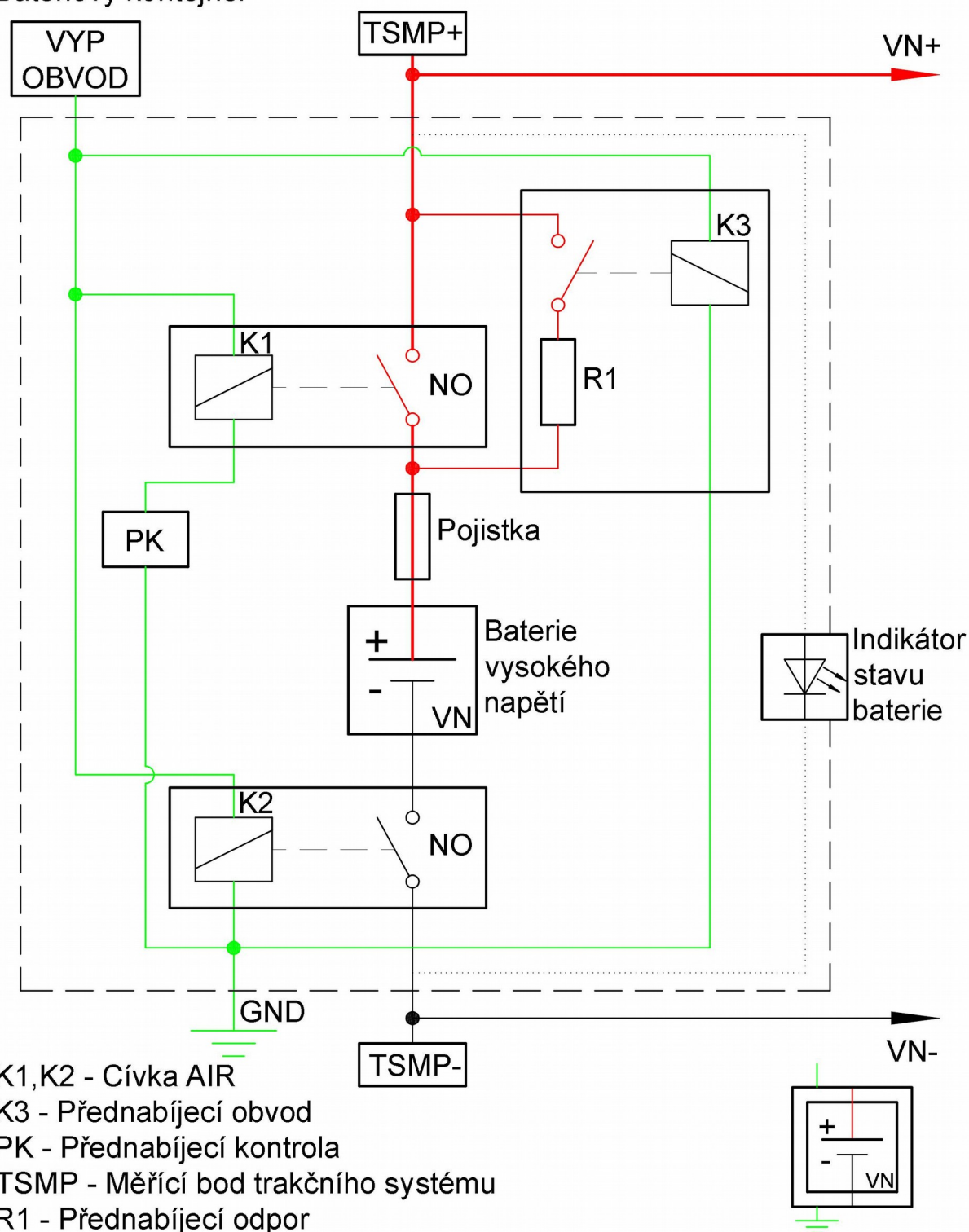
- **Indikátor napětí baterie**

Na každém Bateriovém kontejneru musí být nainstalován Indikátor, který bude svítit kdykoliv, bude-li na výstupech z Bateriového kontejneru naměřeno napětí vyšší než 60 V DC. Není dovoleno, aby Indikátor indikoval signál, který napájí cívky Izolačních stykačů baterie, čímž by oznamoval stav Izolačních stykačů baterie a tedy i výstupní napětí z Kontejneru baterie. Indikátor musí být řízen přímo výstupním napětím z Kontejneru a navíc musí být funkční i při odpojení Kontejneru od Baterie nízkého napětí a vyndání Kontejneru z vozidla, což znamená, že Indikátor může být napájen výstupním napětím z Kontejneru nebo bude v Kontejneru umístěný zdroj nízkého napětí pro napájení Indikátoru. Pokud bude napájen z výstupního napětí Kontejneru, musí být indikátor vybavený DC/DC měničem, který zajistí požadované napětí pro napájení indikátoru.

2.3 Měřicí body

Na vozidle budou nainstalovány tři Měřicí body, jeden na kladném pólu Baterie vysokého napětí (TSMP+), jeden na záporném pólu (TSMP-) a jeden Měřicí bod na záporném pólu Baterie nízkého napětí, tedy uzemnění (MP-GND). Důvod instalace měřících bodů je pro kontrolu izolace baterie (Trakčního systému), kterou bude provádět inspektor během Elektrotechnické inspekce. Měřicí body musí být zajištěny proti náhlému dotyku a vnějším vlivům (Rain Test) vhodnou krytkou. GND bod je přímo připojen k šasi vozidla.

Bateriový kontejner

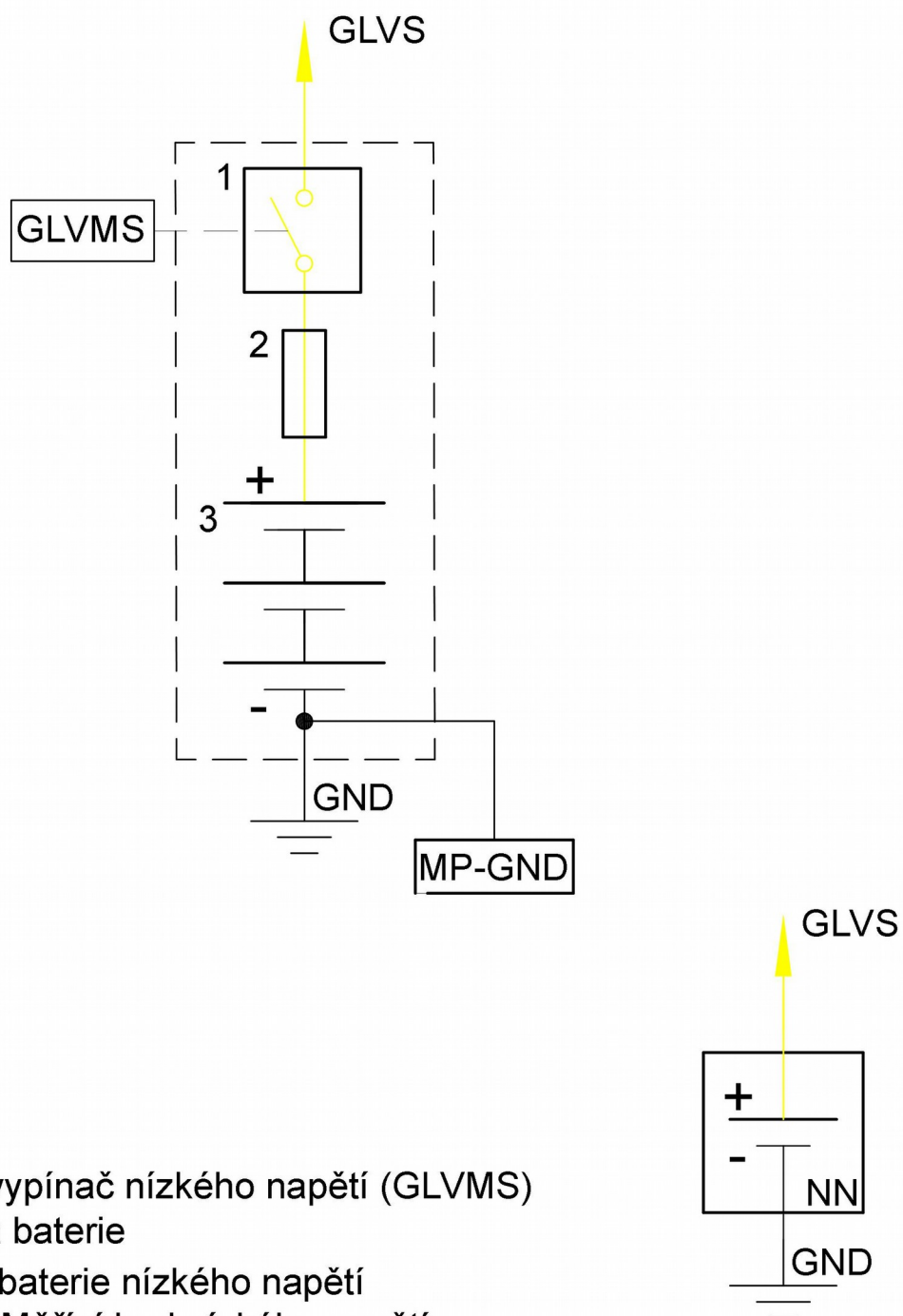


Obr. 6 Schéma uspořádání komponentů v Bateriovém kontejneru

2.4 Baterie nízkého napětí

Zatímco Baterie vysokého napětí bude napájet elektromotory, Baterie nízkého napětí bude napájet ostatní pomocné systémy a řídicí elektroniku jako jsou cívky Izolačních stykačů baterie vysokého napětí. Baterie nízkého napětí bude jištěna nadproudovou ochranou umístěnou na kladném pólu baterie, záporný pól baterie bude uzemněný (připojený k šasí vozidla). Takto jištěná baterie bude připojena do Systému nízkého napětí přes Hlavní vypínač nízkého napětí. Všechny tyto prvky jsou vykresleny v obr. 7.

Baterie nízkého napětí



- 1 - Hlavní vypínač nízkého napětí (GLVMS)
- 2 - Pojistka baterie
- 3 - Článek baterie nízkého napětí
- MP-GND - Měřící bod nízkého napětí

Obr. 7 Schéma zapojení Baterie NN a jejího příslušenství

2.5 Odpojení vysokého napětí (HVD)

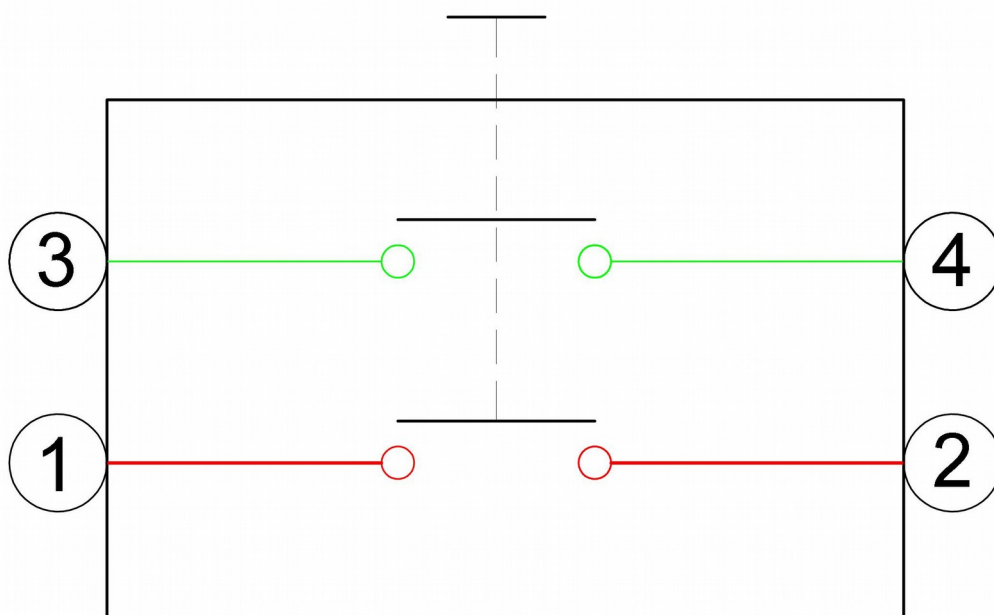
Jedná se o další bezpečnostní prvek, který je pro závodní vozidla jako jsou elektroformule nezbytný a je vyžadovaný pravidly. Zařízení musí být schopno odpojit alespoň jeden pól Trakčního systému, čímž poskytuje izolaci mezi baterií a Trakčním systémem, čímž chrání osoby pracující na formuli během závodu. Podle pravidel musí při odpojení Trakčního systému dojít také k odpojení napájení pro Izolační stykače baterie a realizace tohoto bezpečnostního prvku nesmí být provedena lanem nebo dlouhou rukojetí, což znamená že musí být použit manuální vypínač, který odpojí baterii a současně také napájení pro Stykače baterie. Vypínač musí být na dobře přístupném místě, což znamená, že musí mít vysokou IP ochranu (Rain Test) a pro jeho odpojení se nesmí demontovat jakákoliv část vozidla. Na obr. 9 je znázorněno vnitřní zapojení a funkce HVD.

Jeden z možných produktů pro odpojení Trakčního systému respektující pravidla FSAE je manuální dvoupólový spínač BD9521 od firmy Gigavac s ochranou IP67. Jmenovitý proud spínače je 500 A a lze být krátkodobě zatížen i proudem 2500 A. Spínač umožňuje zapojení jednoho pólu do obvodu, který napájí cívky Izolačních stykačů baterie a zapojení druhého pólu do části obvodu mezi Baterií vysokého napětí a střídače.

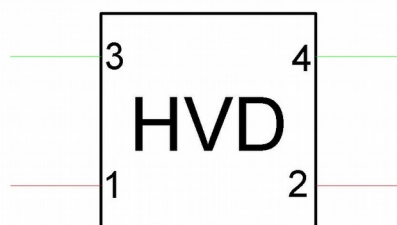


Obr. 8 Gigavac BD 9521 [5]

HVD



1, 2 - kontakty zapojené na kladném pólu napájení TS
3, 4 - kontakty zapojené ve vypínacím obvodu



Obr. 9 Vnitřní zapojení HVD

2.6 Indikátor trakčního systému (TSAL)

Indikátor trakčního systému je bezpečnostní prvek, který jednoznačně signalizuje stav Trakčního systému. Indikátor bude blikat červeně pokud bude na výstupu z bateriového kontejneru naměřeno napětí vyšší než 60 V DC nebo 25 V AC. Pokud bude napětí menší, Indikátor bude svítit zeleně. Indikátor nesmí být realizován softwarově, musí přímo měřit napětí na výstupu z Kontejneru a bude umístěn nad hlavou řidiče tak, aby bylo všem osobám v okolí vozidla jasné v jakém stavu se nachází Trakční systém. Rozdíl mezi Indikátorem baterie a Indikátorem Trakčního systému je, že Indikátor baterie musí být umístěn na všech Bateriových kontejnerech formule a ukazuje stav daného kontejneru, zatímco Indikátor Trakčního systému musí být umístěn na vozidle tak, jak je ukázáno na obr. 10 a bude oznamovat stav Trakčního systému. Na obr. 11 je znázorněno jeho zapojení.



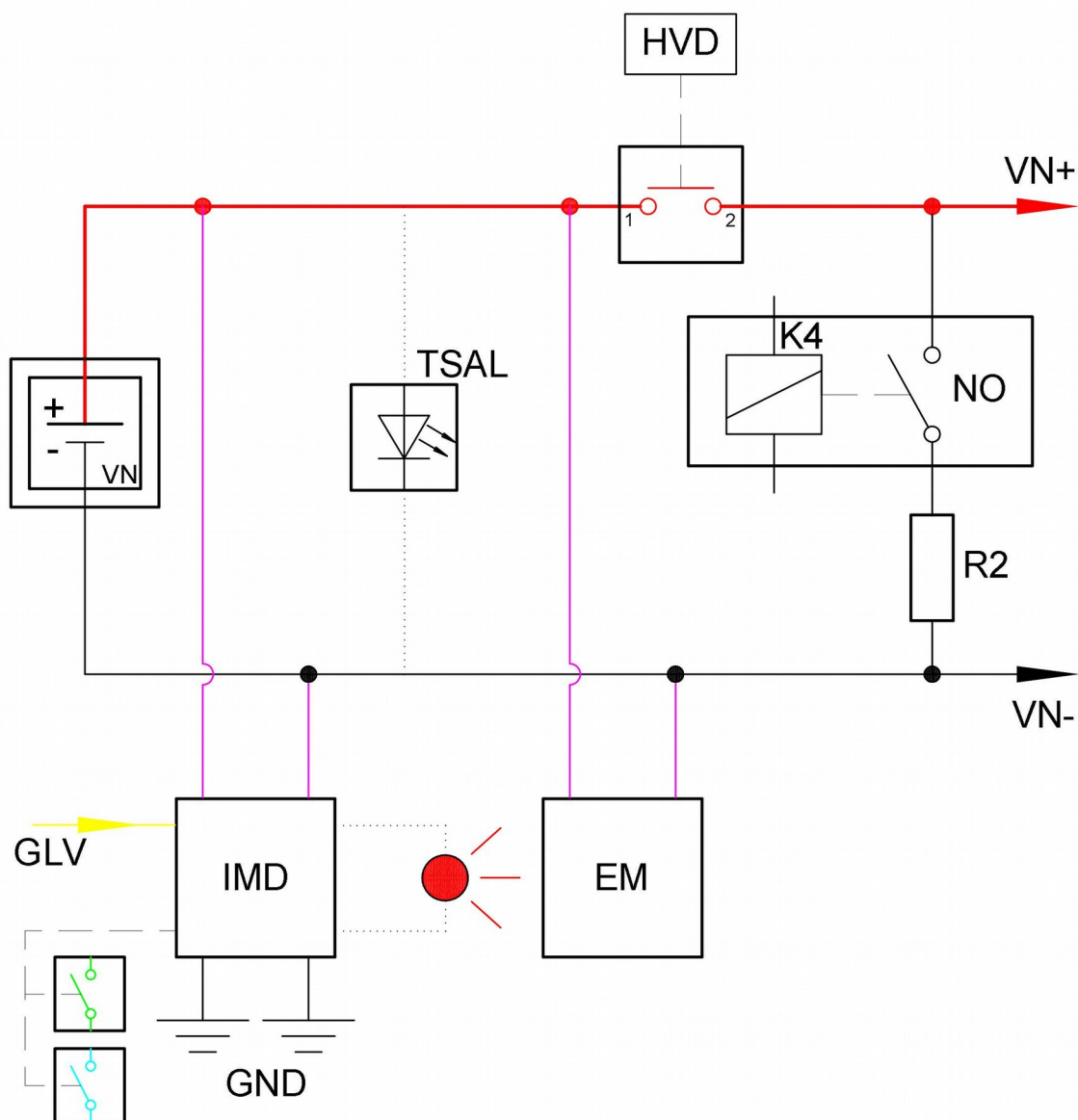
Obr. 10 Umístění LED indikátoru na vozidlech F1 [6]

2.7 Vybíjecí obvod

Při odpojení Trakčního systému od Baterie vysokého napětí zůstává v Trakčním systému naakumulovaná energie. Tuto energii je možné vybit přes vnitřní odpor motoru, avšak vybíjení tímto pasivním způsobem by trvalo příliš dlouho. Proto se těsně před měniče zapojí vybíjecí obvod složený z kontaktu stykače a odporu, přes který se dostatečně rychle vybijí Trakční systém. Zapojení Vybíjecího obvodu je znázorněno ve Stejnoseměrném meziobvodu na obr. 11.

Stykač vybíjecího obvodu lze realizovat přimontováním dalšího stykače na formuli a zapojením jeho NO kontaktu do Vybíjecího obvodu, takže při odpojení baterie musí být přiveden signál do cívky tohoto stykače, aby se trakční systém uzavřel přes Vybíjecí obvod.

Stojnosměrný meziobvod



- TSAL - Kontrolka trakčního systému
 IMD - Zařízení pro sledování izolačního stavu
 HVD - Odpojení vysokého napětí
 K4 - cívka stykače vybíjecího obvodu
 EM - Elektroměr
 R2 - vybíjecí odpor

mezi obvod

Obr. 11 Zařízení instalovaná mezi Baterií vysokého napětí a střídači

2.8 Vypínací obvod

Úkolem Vypínacího obvodu je bezpečné odpojení Baterie vysokého napětí přerušením napájení cívek Izolačních stykačů baterie při poruše či havárii vozidla. Obvod je tedy zapojený mezi Baterií nízkého napětí a Stykači Baterie vysokého napětí, jak je ukázáno na obr. 12 a sestává ze spínacích a rozpínacích kontaktů bezpečnostních systémů vozidla, Hlavního vypínače a Nouzových tlačítek a to vše zapojené sériově, tudíž při aktivaci jednoho tlačítka či kontaktu dojde k přerušení napájení.

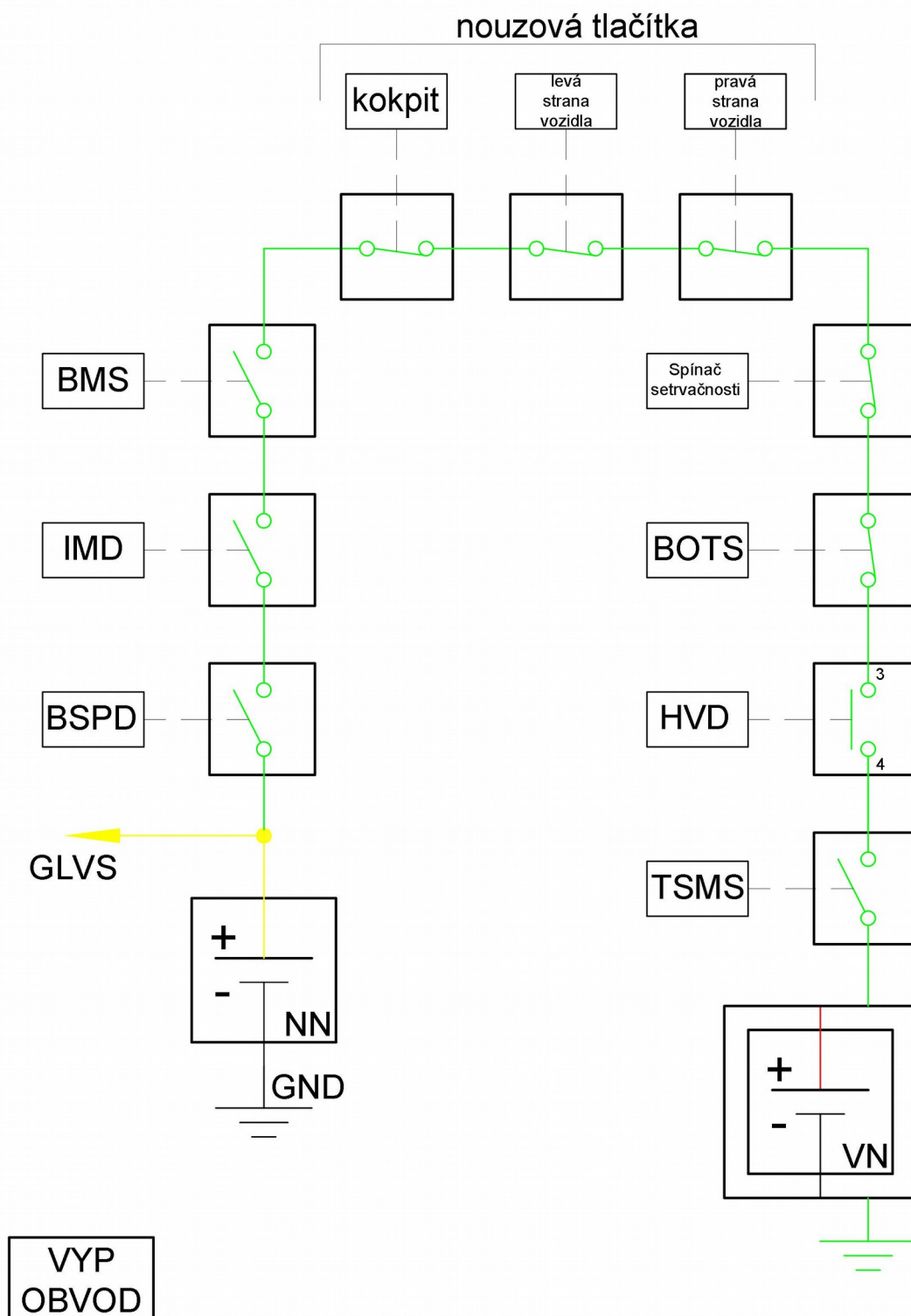
Obvod obsahuje dva Hlavní vypínače. První vypínač - Vypínač nízkého napětí (GLVMS), který připojuje Baterii nízkého napětí k Systému nízkého napětí (GLVS), tudíž i k cívkám Izolačních stykačů přes Vypínací obvod. Druhý vypínač - Vypínač trakčního systému (TSMS) je zapojený jako poslední prvek Vypínacího obvodu, těsně před cívkami Stykačů. Oba Hlavní vypínače musí být realizovány jako rotační mechanické vypínače s klíčkem. Oba vypínače se musí nacházet na pravé straně vozidla, přibližně ve výšce ramena řidiče.

Nouzová tlačítka jsou na vozidle tři, přičemž první tlačítko na levé straně vozidla, druhé na pravé straně a třetí je umístěno v kokpitu řidiče. Každé z těchto tlačítek musí být schopno odpojit baterii VN od Trakčního systému. Tlačítka musí být čistě mechanické prvky.

V obvodu je také zapojený Odpojovač vysokého napětí, aby při manuálním odpojení Trakčního systému od Baterie vysokého napětí bylo zajištěno také odpojení Izolačních stykačů od Baterie nízkého napětí.

Dalšími bezpečnostními prvky jsou Bezpečnostní spínač brzdění a Spínač setrvačnosti umístěné v obvodu jako kontakty typu NC (Normally Close) a kontakty NO (Normally Open) od Řídicí jednotky baterie, Zařízení pro sledování izolačního stavu a Zařízení pro plausibilitu brzdového systému.

Vypínací obvod



Obr. 12 Schéma Vypínacího obvodu

2.9 Střídače

Formule bude poháněna čtyřmi motory napájenými střídavým napětím. Jelikož napětí dodávané z Baterie VN je stejnosměrné, musí dojít k jeho rozstředění prostřednictvím napěťových střídačů. Formule bude tedy vybavena čtyřmi třífázovými napěťovými střídači - jeden střídač na jeden motor. Střídače budou osazeny spínacími součástkami s hybridní strukturou SiC-DMOS, které vynikají vysokou spínací rychlostí a malými spínacími ztrátami.

Následující údaje a poznatky o funkci Řídicího obvodu a Integrovaného regulátoru střídače jsou ze specifikačního dokumentu od firmy AMK, ve kterém je zmíněno zapojení motorů použitých na formuli. V dokumentu jsou také informace o střídačích napětí použitých pro tyto motory. Avšak v dokumentu se na motory, střídače a CAN komunikaci pohlíží jako na jednu kompletní a funkční sestavu pohonů. Ve skutečnosti bude střídač navržený a sestavený týmem z fakulty, ale komunikace mezi střídači a řízením bude zprostředkována na podobném principu jako je uváděno ve specifikačním dokumentu AMK.

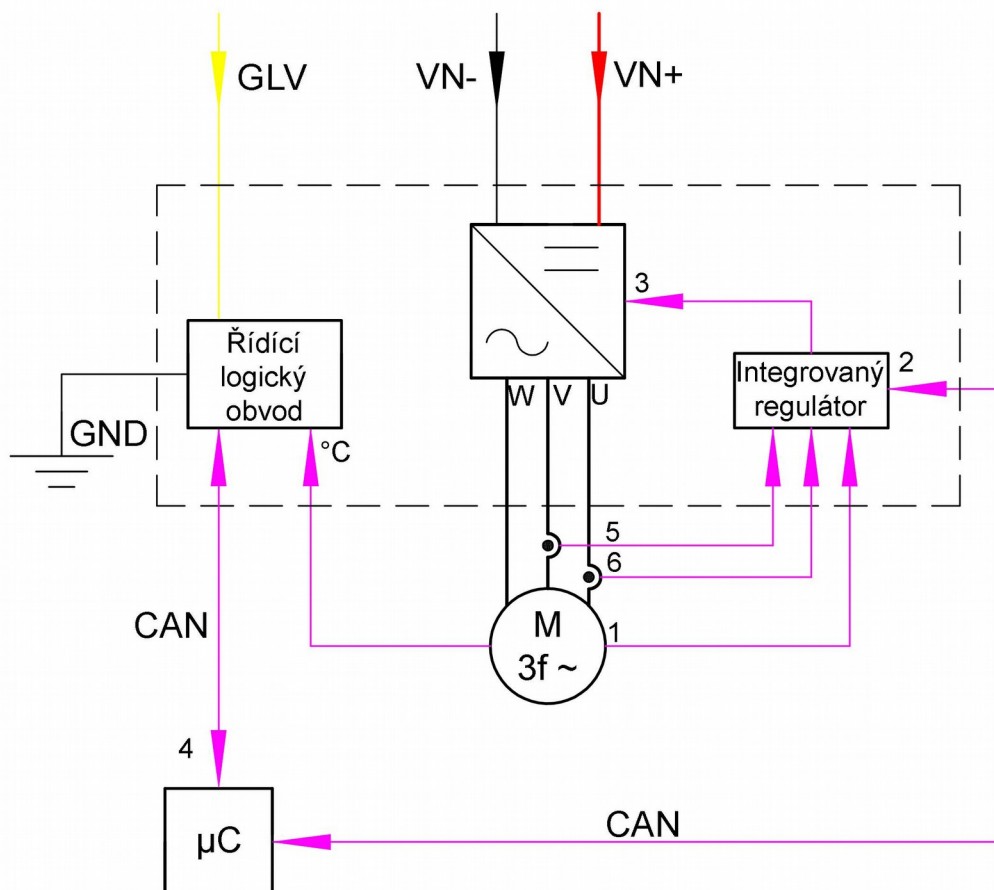
- **Řízení střídačů**

Výstupní napětí střídačů bude řízeno přes Integrované regulátory (obr.13). Integrovaný regulátor bude porovnávat aktuální rychlost vozidla (zpětná vazba od čidla otáček) s APPS signály z Řídicí jednotky, které budou určeny pozicí plynového pedálu a podle toho bude řídit spínání součástek střídače – řídit výstupní napětí měniče. APPS signály budou posílány z Řídicí jednotky Trakčního systému přes datovou sběrnici CAN do Integrovaného regulátoru střídače. Komunikace mezi těmito systémy je vyobrazena na obr. 13.

Na obr. 14 je schéma Integrovaného regulátoru. Toto schéma je spíše určené pro autonomně řízená vozidla, protože do regulátoru je posílán požadavek na otáčky motoru. Studentská formule nebude autonomně řízené vozidlo, ale bude řízené

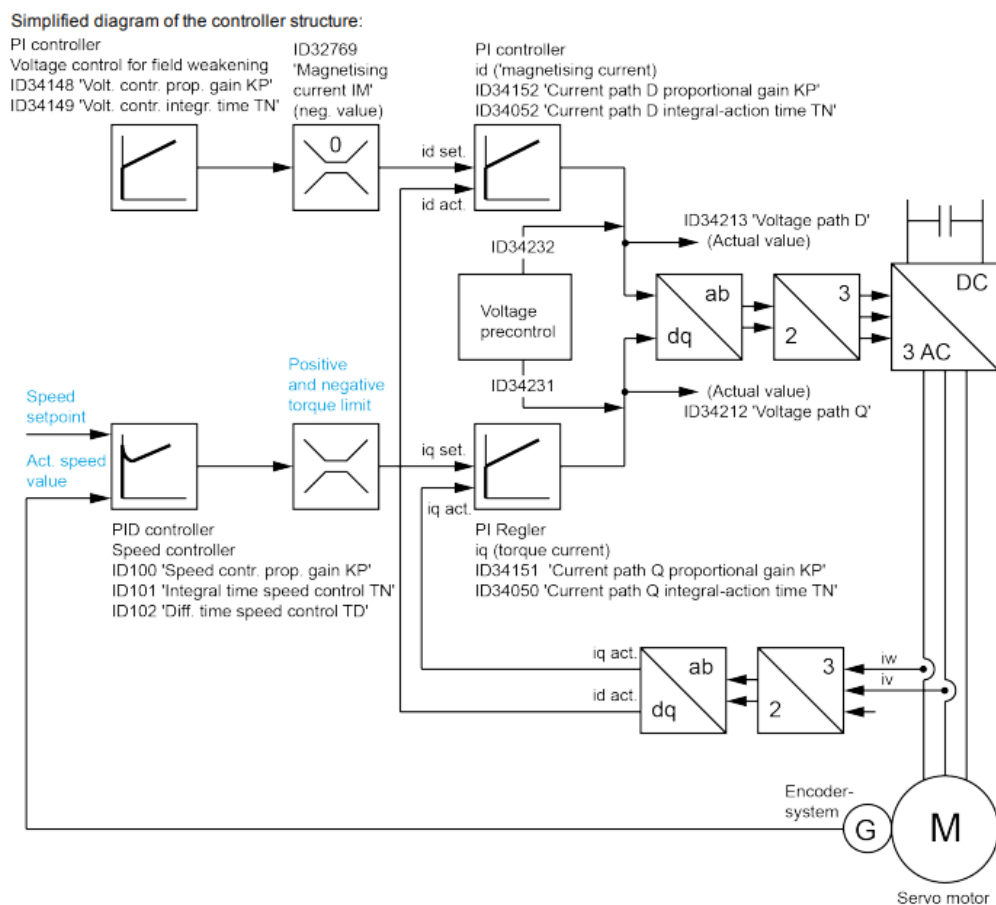
pilotem, který bude změnou polohy plynového pedálu měnit požadavek na točivý moment motorů, čímž bude nepřímo měnit otáčky motorů – rychlost vozidla.

Zapojení měniče a motoru



- 1 - Zpětná vazba od čidla otáček (Okamžitá rychlost formule)
- 2 - Požadovaná rychlost formule
- 3 - Spínací signály pro střídač
- 4 - Komunikace mezi logickým obvodem a μC
- 5,6 - Čidla proudu

Obr. 13 Schéma propojení vnitřních komponentů střídače a motoru



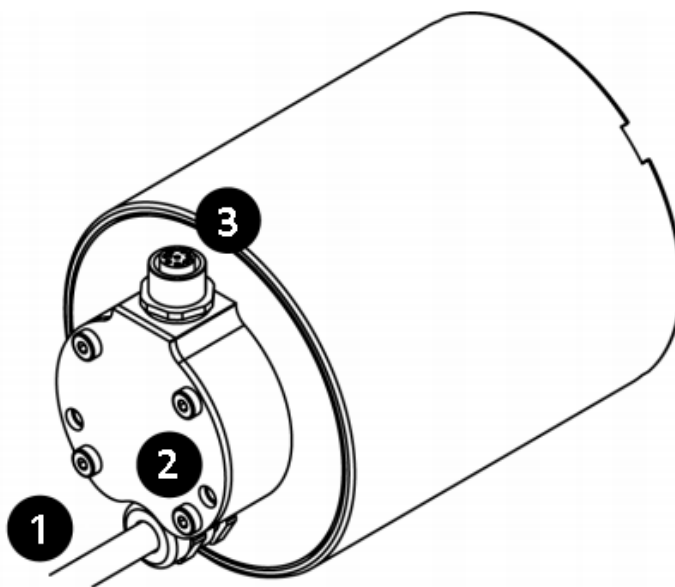
Obr. 14 Integrovaný regulátor střídače [7]

Na řídicí kartě každého střídače bude Ethernet zásuvka a USB konektor pro připojení k PC (první spuštění ,diagnostika, konfigurace). Dále bude k řídicí kartě střídače připojený kodér motoru. Ten bude do řídicí karty odesílat informaci o aktuálních otáčkách motoru - rychlosti vozidla. Poslední konektor na řídicí kartě bude binární vstup/výstup (dva vstupy, jeden výstup), ke kterému bude připojena Řídicí jednotka Trakčního systému.

Pro každou dvojici střídačů bude nainstalován samostatný logický obvod, který musí být napájen z vnějšího zdroje napětí. Logický obvod bude komunikovat s Řídicí jednotkou Trakčního systému. Do logických obvodů budou přivedeny signály z teplotních čidel motorů. Logické obvody bude tedy sledovat aktuální teploty uvnitř motorů. Komunikace mezi střídači a Řídicí jednotkou Trakčního systému bude zprostředkována přes CAN jak je vyobrazeno v obr. 13.

2.10 Motory

Formule bude poháněna čtyřmi elektromotory AMK DD5-14-10-POW. Jedná se o synchronní servomotory s permanentními magnety, přičemž jmenovité parametry motoru jsou 350 V a 41 A. Motor může být zatížen až 105 A po dobu 1,24 s. Z jednoho motoru budou vyvedeny tři kabely - napájecí kabel (1), uzemnění (2) a kabel pro přenos dat (3) z motoru do logických obvodů střídačů a do integrovaného regulátoru. Konektor pro připojení datového kabelu je M12 s osmi bity.



Obr. 15 Umístění konektorů na motoru [7]

2.11 Řídicí jednotka baterie (BMS)

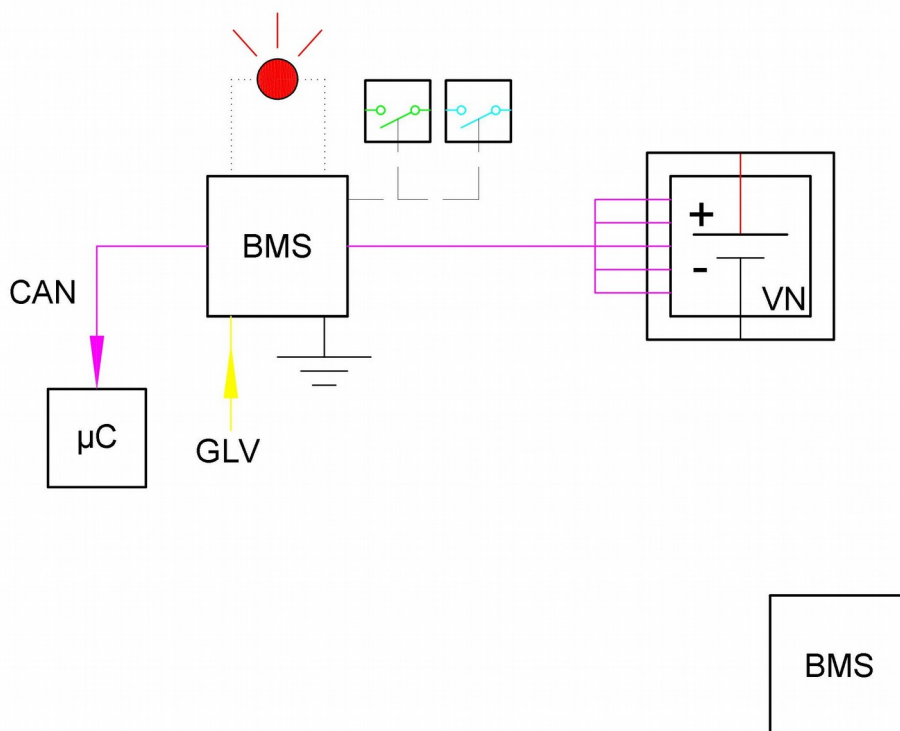
U Lithium-Ionových článků je zásadní, udržet jejich parametry v provozních mezích. Z tohoto důvodu musí být články neustále monitorovány Řídicí jednotkou baterie, která bude měřit napětí článků a jejich teploty, protože Lithium-Ionové články jsou náchylné na tepelné přetížení. Mezi hlavní úkoly BMS tedy patří:

- Vyvažování napětí článků,
- Měření teploty článků,

- Měření napětí článků,
- Sledování parametrů článků během nabíjecího procesu

Pokud BMS vyhodnotí některý z měřených parametrů článků jako abnormální či poruchový, musí být odpojeny články od Trakčního systému. To lze vyřešit zapojením BMS do Vypínacího obvodu, aby v případě nebezpečí mohla BMS rozepnout Vypínací obvod a přerušit napájení Izolačních stykačů baterie. Komunikaci mezi BMS a Řídicí jednotkou Trakčního systému lze zprostředkovat pomocí datové sběrnice CAN. BMS lze umístit do Bateriovém kontejneru a napájení pro BMS může být přivedeno z Baterie nízkého napětí. BMS musí být v provozu během nabíjení, musí kontrolovat parametry článků a musí komunikovat s nabíječkou během Nabíjecího procesu. Ve schématu Bateriového kontejneru a Baterie vysokého napětí není zakresleno měření článků, kvůli přehlednosti daných schémat. Propojení BMS s ostatními systémy je znázorněno na obr. 16.

BMS

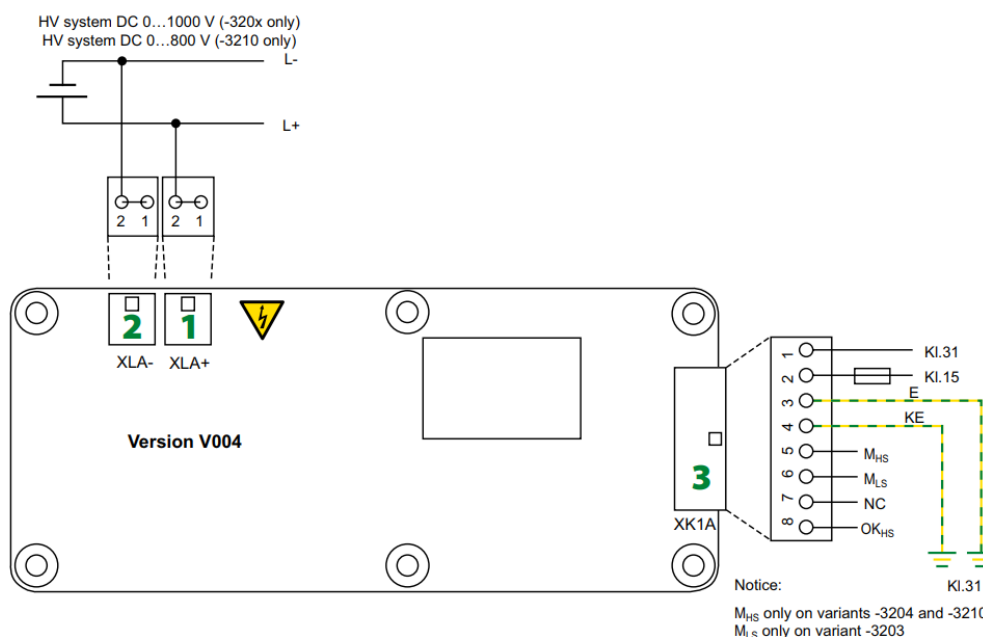


Obr. 16 Schéma Řídicí jednotky baterie (BMS)

2.12 Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD)

Účelem tohoto zařízení je sledovat izolační stav vozidla. To znamená, že pokud dojde k porušení izolace na vozidle, IMD musí tuto poruchu zjistit a odpojit Trakční systém od Baterie vysokého napětí, z tohoto důvodu musí být IMD obsaženo ve Vypínacím obvodu a při poruše odpojit napájení Izolačních stykačů baterie. Stav izolace musí být signalizován řidiči vozidla přes kontrolku, která bude umístěna na palubní desce a při porušení izolace nebo poruše IMD musí svítit červeně. IMD může být (stejně jako BMS) umístěna v Bateriovém kontejneru a musí být v provozu během Nabíjecího procesu. Napájení IMD lze realizovat z Baterie nízkého napětí. Zapojení IMD na formuli je znázorněno v obr. 11, na obr. 17 je ukázané zapojení IMD.

IMD, doporučené FSAE (ISOMETER® iso-F1 IR155-3203), monitoruje izolační odpor mezi napájením Trakčního systému a referenční zemí (šasi vozidla). Tato měřicí technika je schopna sledovat stav izolace jak na stejnosměrné straně - před střídačem, tak i na střídavé straně – na svorkách motoru. Díky svým menším rozměrům a použité měřicí technologii je přístroj vhodný pro použití v hybridních nebo plně elektrických vozidlech. IMD generuje impulsní měřicí napětí, které je v IT systému na svorkách L+ / L- a E /LE. Poslední změřený stav izolace je k dispozici jako signál PWM (Pulzní šířková modulace) na svorkách M_{LS}. Chybná hlášení budou poskytnuty prostřednictvím integrovaného a galvanicky odděleného rozhraní, které se skládá ze stavového výstupu OK_{HS} a výstupu měření M_{LS}. IMD lze napájet 10 – 36 V DC přes K1.15. [8]



Obr. 17 Schéma Zařízení pro sledování izolačního stavu (IMD) [8]

2.13 Spínač setrvačnosti (IS)

Tento spínač je navržen jako automatický bezpečnostní prvek, který se aktivuje při nárazu vozidla. Spínače jsou běžně používány v sériově vyráběných vozidlech za účelem odpojení palivové pumpy, ale u čistě elektrických vozidel musí otevřít Izolační stykače baterie a tím odpojit Trakční systém od Baterie vysokého napětí v případě nárazu.

Spínač se tedy zapojí do Vypínacího obvodu přes kontakty NC a COM kontakty, přičemž NO kontakt zůstane nezapojený. Spínač by měl být co nejpevněji připevněn k šasi vozidla, tak aby spínač byl schopný zachytit jakýkoliv náraz či otřes vozidla. [9]



Obr. 18 Spínač setrvačnosti [9]

2.14 Pedály

Pedály formule musí být, stejně jako ostatní klíčové systémy vozidla, vybaveny bezpečnostními prvky, senzory a blokováními podle pravidel FSAE.

- **Brzdový pedál**

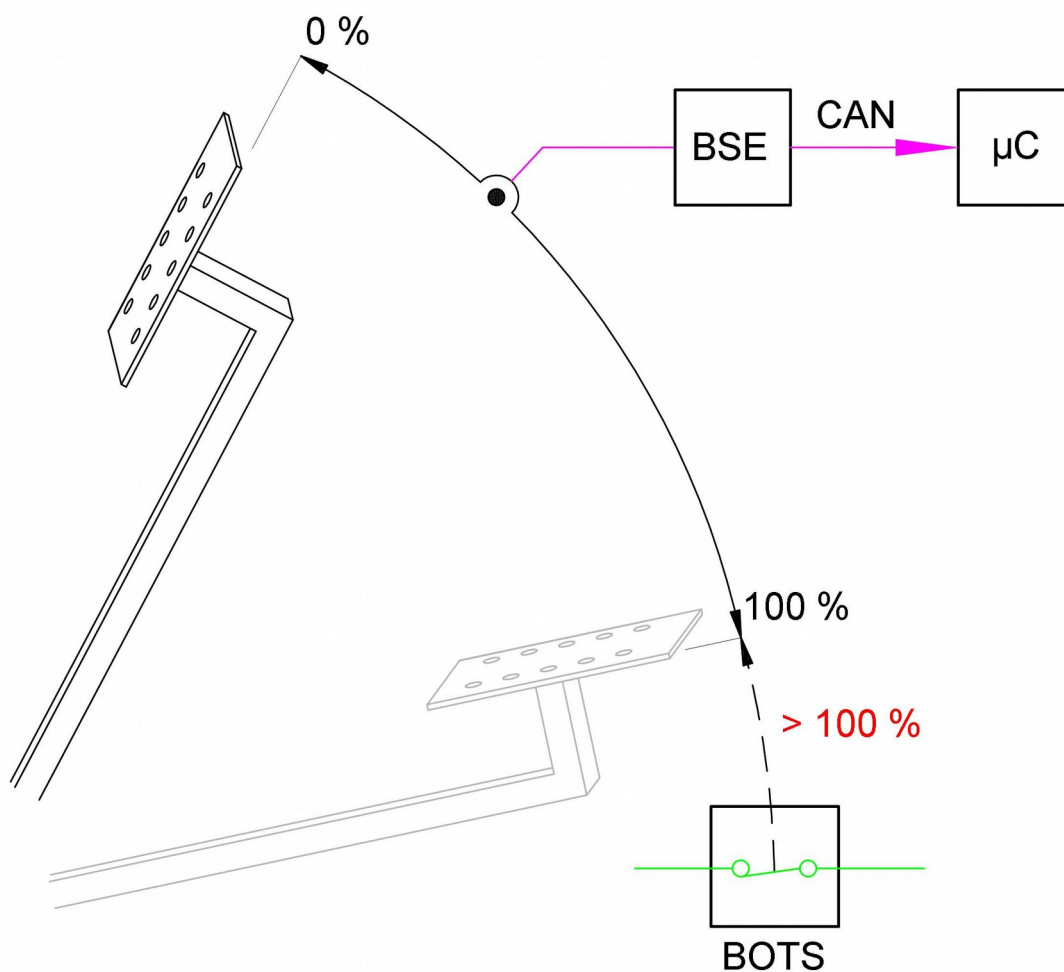
Pozice brzdového pedálu bude měřena snímači (BSE), které budou tuto informaci odesílat do Řídicí jednotky trakčního systému prostřednictvím digitálního signálu přes datovou sběrnici CAN. V Řídicí jednotce bude poté docházet ke zpracování dat ze senzorů brzd a k porovnání s hodnotami ze Senzoru pozice plynového pedálu (APPS). Toto porovnání slouží jako další bezpečnostní prvek, protože může nastat situace, kdy bude řidič vozidla brzdit a zároveň bude sešlapávat plynový pedál. Této situace se snažíme vyvarovat tím, že pokud bude BSE signalizovat prudké brzdění a APPS bude signalizovat, že plynový pedál urazil více než 25 % jmenovité dráhy, musí Řídicí jednotka situaci vyhodnotit jako abnormální a musí přerušit energii do motorů. Energie do motorů bude obnovena poté, co APPS začne signalizovat, že plynový pedál je sešlápnut pod méně než 5 %, bez ohledu na pozici brzd.

Signály z BSE budou také v Řídicí jednotce trakčního systému porovnávány také se signálem, který bude reprezentovat proud tekoucí ze střídače do motoru. Toto porovnání bude provedeno v obvodu (BSPD), který bude obsažen v Řídicí jednotce a který bude tyto dva signály porovnávat. Protože pokud nastane situace, kdy bude BSE signalizovat prudké brzdění a signál se senzoru proudu do motoru bude signalizovat kladný směr proudu (pohyb vozidla vpřed) ekvivalentní 5 kW dodaných z Baterie vysokého napětí do motorů, musí dojít k odpojení Baterie vysokého napětí, pokud tato situace přetrvává déle než 0,5 s. Z tohoto důvodu musí být BSPD vybaven NO kontaktem, který je součástí Vypínacího obvodu.

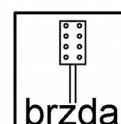
Obě bezpečnostní opatření pedálů (BSE/APPS a BSPD) popsané výše lze nazvat jako bezpečnostní blokování plynového a brzdového pedálu.

Dalším bezpečnostním prvkem, kterým disponuje brzdový pedál je Bezpečnostní spínač brzdění (BOTS). Tento jednopólový spínač je součástí Vypínacího obvodu, takže při rozepnutí BOTS dojde k odpojení Baterie vysokého napětí. K rozepnutí BOTS dojde, pokud brzdový pedál překročí dráhu svého jmenovitého pohybu. Reálná situace bude vypadat tak, že řidič sešlápne brzdový pedál tak silně, že pedál tzv. prošlápne, čímž se rozepne BOTS a dojde k odpojení Trakčního systému a řidiči nesmí být umožněno resetovat BOTS.

Brzdový pedál



- (0 - 100 %) - jmenovitá dráha pohybu pedálu
- (> 100 %) - překročení jmenovité dráhy pedálu
- BSE - Snímač brzdového systému
- BOTS - Bezpečnostní spínač brzdění
- CAN - datová sběrnice
- μC - Řídící jednotka Trakčního systému



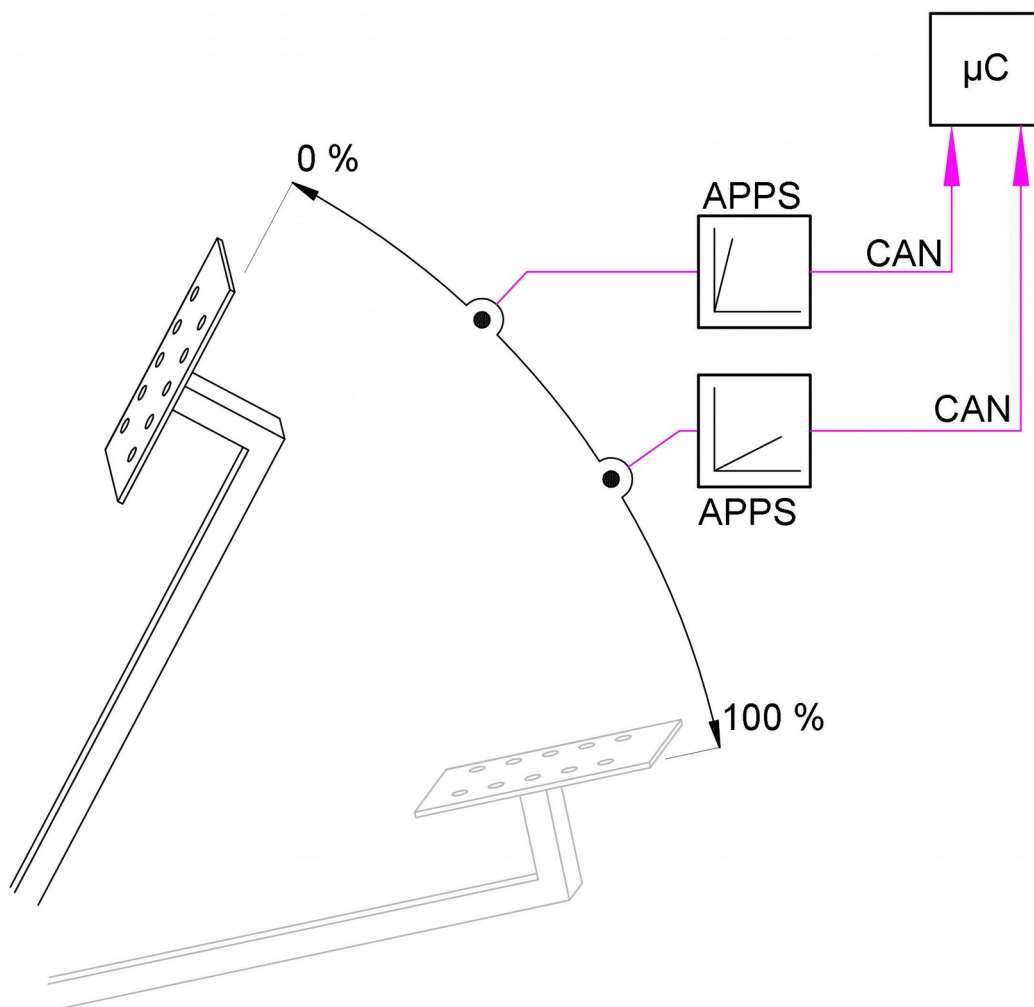
Obr. 19 Schéma brzdového pedálu

- **Plynový pedál**

Podobně jako u brzdového pedálu, tak i plynový pedál musí být osazen snímači, které snímají polohu plynového pedálu (APPS). Signály ze senzorů budou odesílány před digitální datovou sběrnici CAN do Řídicí jednotky trakčního systému. APPS bude realizováno dvěma nebo třemi senzory, přičemž senzory musí pracovat na rozdílných přenosových funkcích (rozdílný gradient, offset).

Přivedené hodnoty z APPS budou porovnávány mezi sebou v Řídicí jednotce, protože pokud se budou tyto hodnoty rozdílné o 10 % déle než 100 ms musí dojít k odpojení motorů.

Plynový pedál



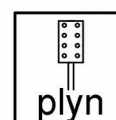
(0 - 100 %) - jmenovitá dráha pohybu pedálu

BSE - Snímač brzdového systému

BOTS - Bezpečnostní spínač brzdění

CAN - datová sběrnice

μC - Řídící jednotka Trakčního systému

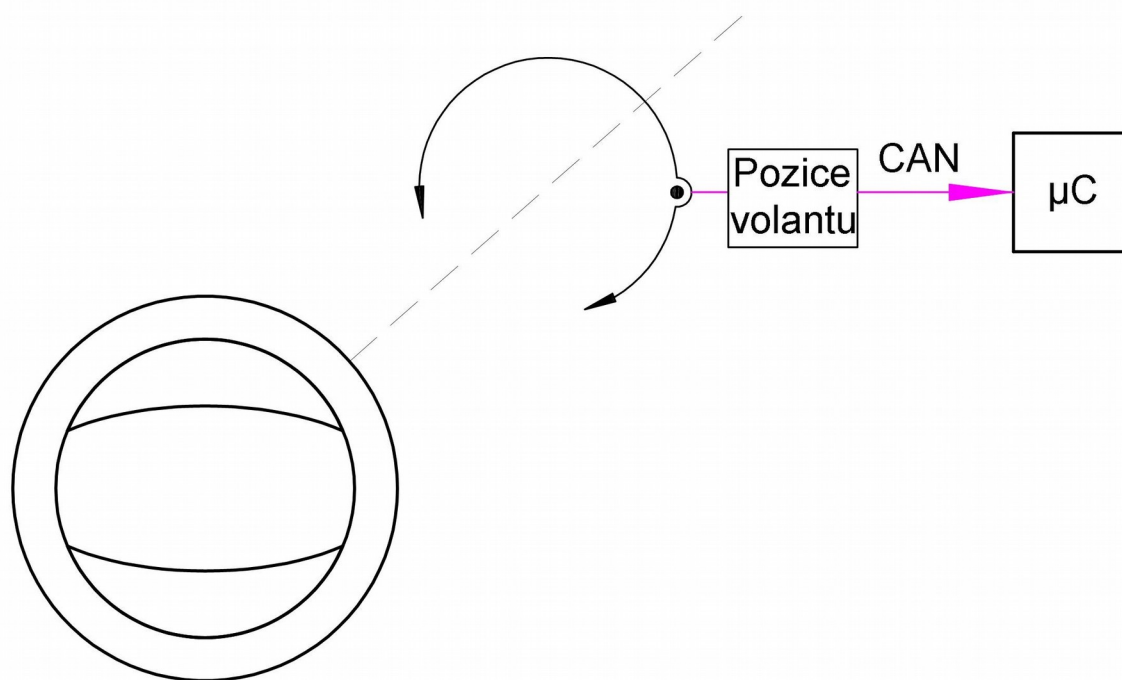


Obr. 20 Schéma plynového pedálu

2.15 Volant

Ve formuli bude elektronický diferenciál, avšak pro jeho funkci je zapotřebí znát polohu, ve které se právě nachází volant. Abychom znali přesnou polohu (natočení) volantu, tak je zapotřebí umístit v blízkosti volantu snímač, který bude snímat natočení volantu. Tuto informaci bude předávat Řídicí jednotce Trakčního systému.

Volant



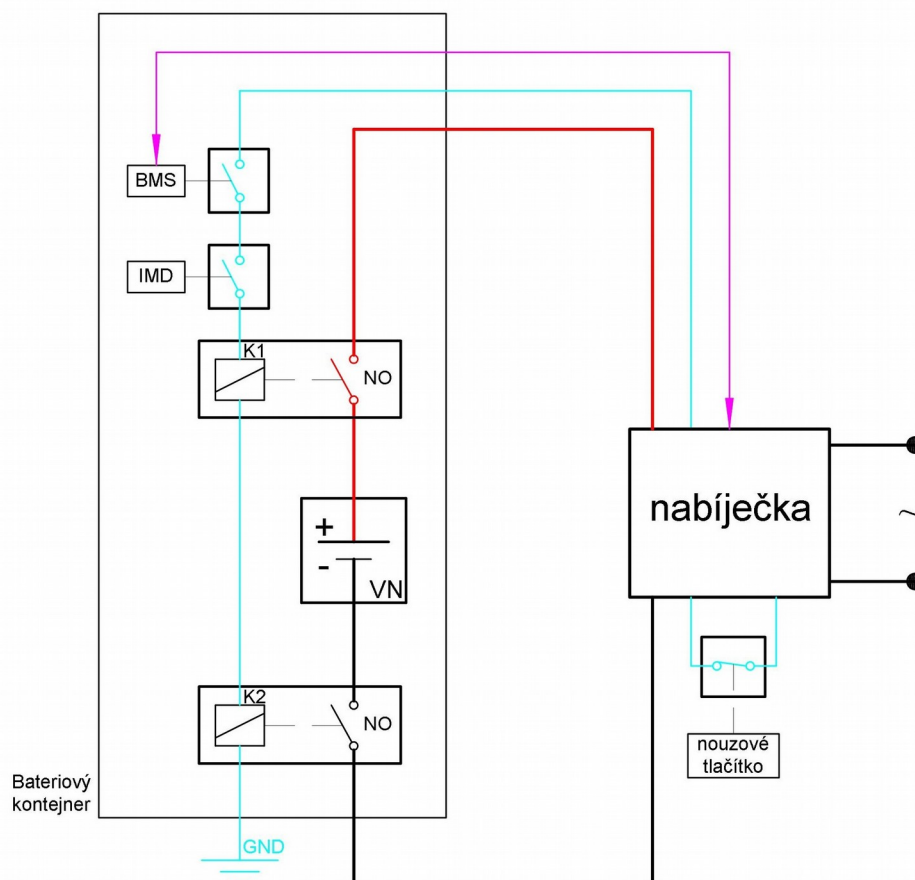
Obr.21 Čidlo snímající polohu volantu

2.16 Nabíjení

Během nabíjecího procesu musí zůstat aktivní BMS kvůli sledování parametrů článků a kvůli komunikaci s nabíječkou a také IMD, které musí zůstat v provozu i při odpojení Trakčním systému. Tyto dva komponenty lze provozovat v Bateriovém kontejneru.

Jelikož bude nabíjení baterie realizováno bez jejího vyjmutí z Bateriového kontejneru a to pouze v místech k tomu určených, musí být Izolační stykače baterie napájeny z vnějšího zdroje napětí, aby se energie dostala až k baterii. Proud do AIRs musí ale procházet skrz Nabíjecí vypínací obvod, ve kterém jsou obsaženy IMD a BMS reprezentovány jako NO kontakty a nouzové tlačítko umístěné na nabíječce.

Nabíjecí vypínací obvod



Obr. 22 Schéma Nabíjecího vypínacího obvodu

2.17 Řídicí jednotka Trakčního systému (μC)

Do Řídicí jednotky Trakčního systému (obr. 23) budou odesílány informace přes CAN z čidel brzdového a plynového pedálu, z čidla snímající polohu volantu a z čidla umístěném na napájecím fázovém vodiči motoru. Dále bude do Řídicí jednotky zapojený Spínač „Připraveno k jízdě“. Řídicí jednotka také komunikuje s BMS a s logickými obvody střídače přes datovou sběrnici CAN.

Schéma Řídicí jednotky by se dalo považovat spíše za náhradní schéma, protože nakreslené uspořádání a porovnávání signálů je kresleno z funkčního hlediska s respektováním pravidel FSAE. Nakreslený systém v Řídicí jednotce je spíše k pochopení správné funkce čidel a bezpečnostní blokování signálů dané pravidly.

Obvod BSPD je samostatným bezpečnostním obvodem na vozidle, avšak je nakreslený jako součást Řídicí jednotky trakčního systému, protože jsou do něj přivedeny signály z BSE a z proudového čidla motoru. Tyto dva signály bude BSPD kontrolovat a v případě nežádoucího stavu odpojí Trakční systém.

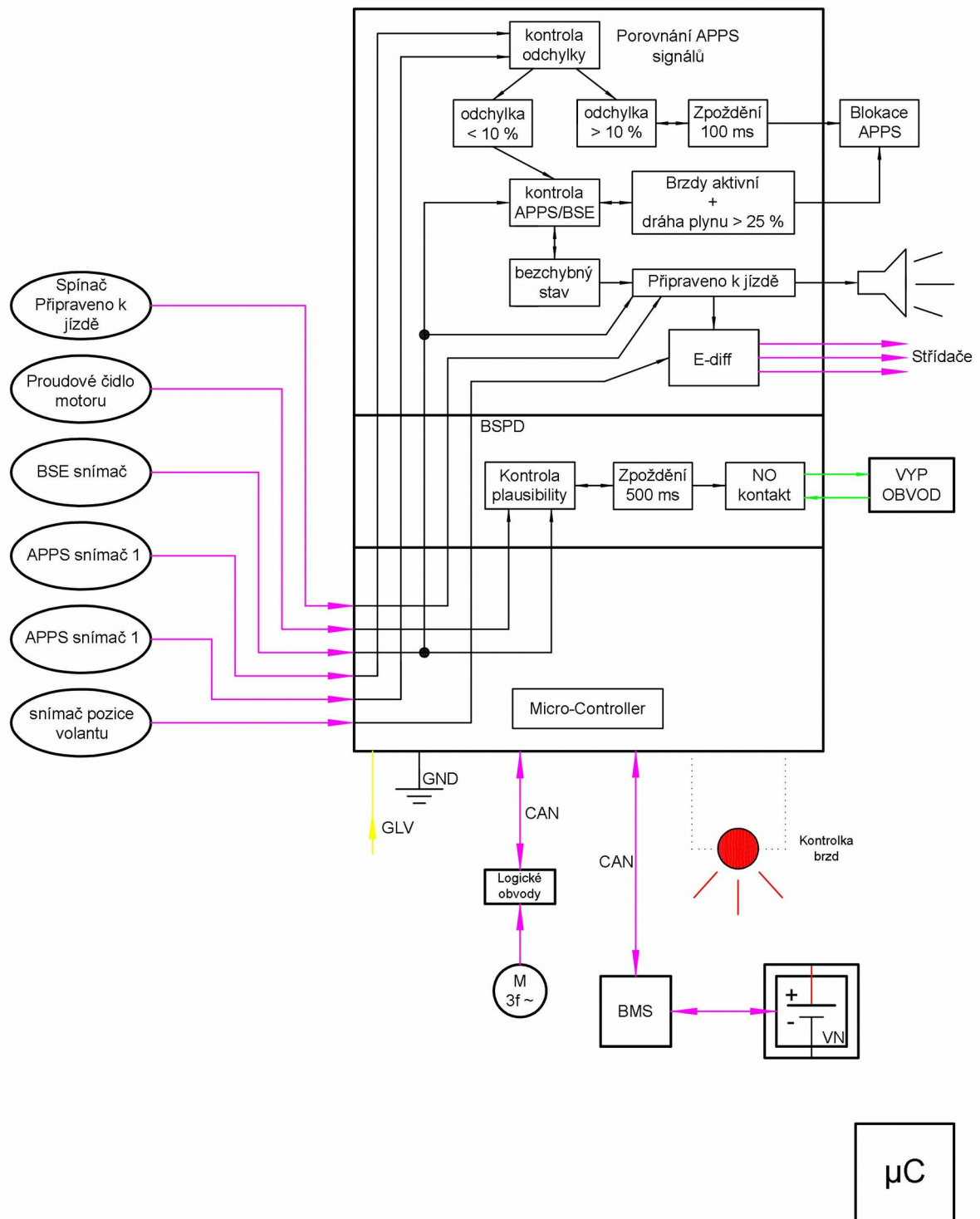
APPS signály jsou z obou čidel přivedeny do Řídicí jednotky Trakčního systému, kde jsou porovnány a v případě odchylky vyšší než 10 % déle než 100 ms nesmí být z Řídicí jednotky Trakčního systému vyslány řídicí signály na požadovanou rychlost do regulátorů střídačů (Blokace APPS). V případě odchylky menší než 10 % budou APPS signály porovnávány se signály z BSE a pokud nastane stav, že BSE bude signalizovat brzdění a zároveň bude APPS signalizovat stlačení plynového pedálu z více než 25 % jmenovité dráhy pedálu, bude tento stav vyhodnocený jako chybový stav a musí opět dojít k blokování APPS signálů. Avšak pokud kontrola signálů vyhodnotí stav jako bezchybný.

Další bezpečnostní prvek v Řídicí jednotce je obvod „Připraveno k jízdě“, který se skládá ze spínače, který stiskne řidič a zároveň stlačí brzdový pedál. Proto jsou do tohoto bloku přivedeny signály z BSE a signál ze spínače. Pokud není tento

system aktivován, nesmí motory reagovat na vstup z APPS. Při úspěšném aktivování tohoto systému se ozve z vozidla charakteristický zvuk, který oznámí že vozidlo je připraveno k jízdě a řidič je od této chvíle schopný uvést vozidlo do pohybu stlačením plynového pedálu.

Posledním blokem v Řídicí jednotce je Elektronický diferenciál (E-diff), do kterého jsou přivedeny APPS signály a signál z čidla detekující natočení volantu. Elektronický diferenciál by měl být naprogramovaný tak, aby posílal do regulátorů měničů, které napájí motory na předních kolech, rozdílné požadavky na otáčky motoru v závislosti na poloze, ve které se volant nachází.

Řídicí jednotka Trakčního systému (μC)



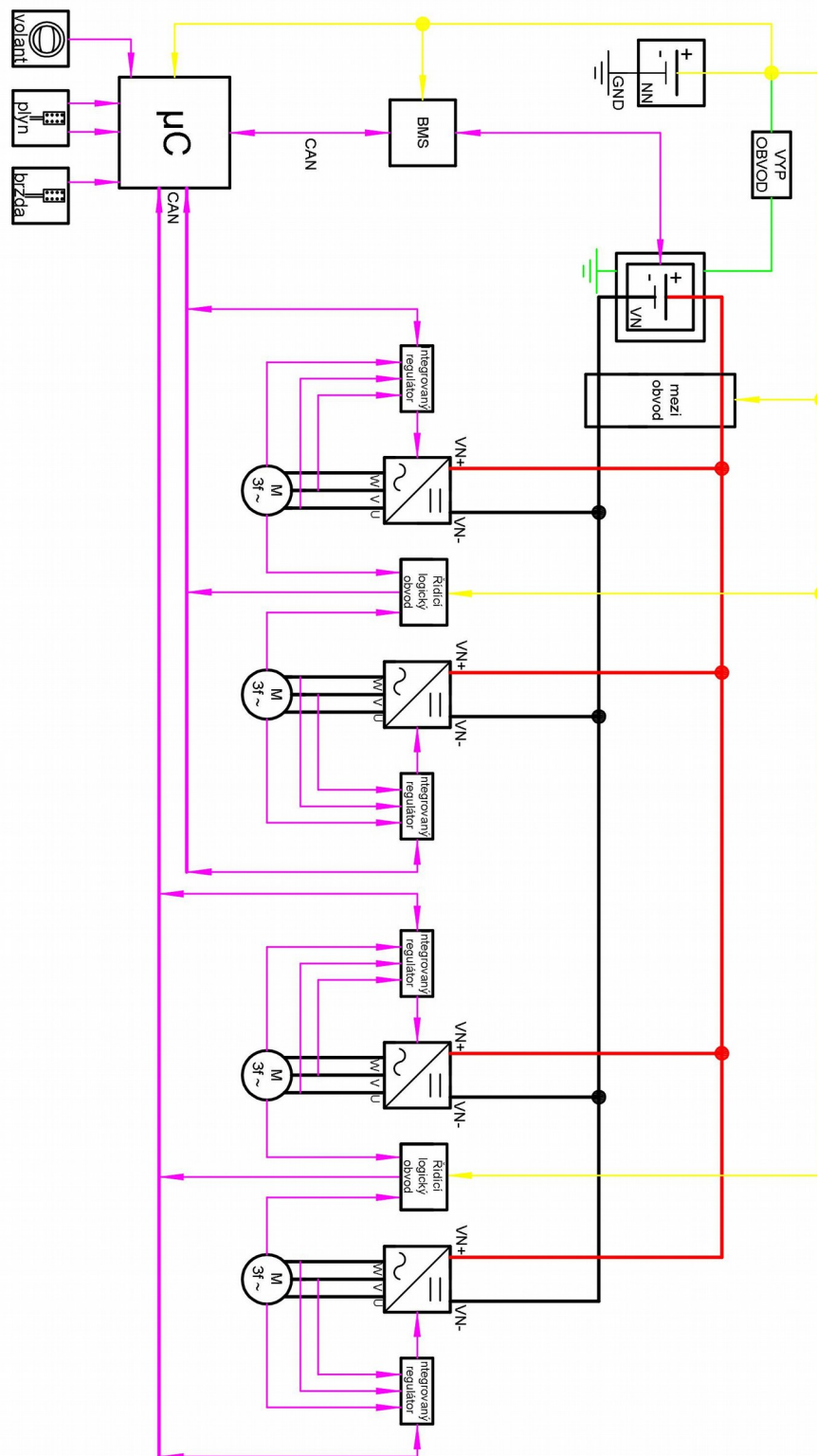
Obr. 23 Schéma Řídicí jednotky systému

3 Celková topologie formule

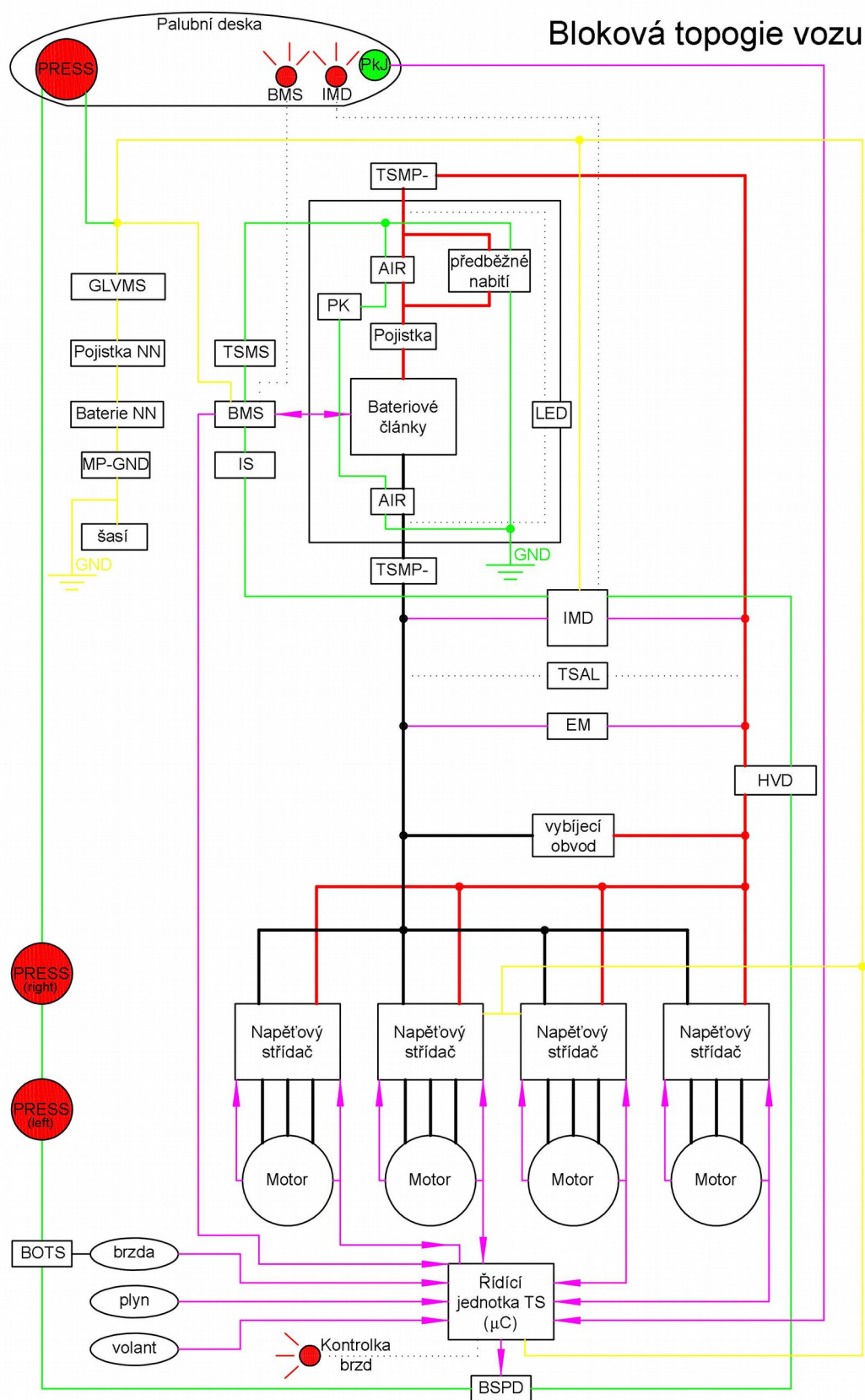
V poslední kapitole je obsaženo kompletní schéma topologie formule, kde se spojily dílčí systémy z předchozí kapitoly a bude zde se pohlížet na formuli jako na jeden funkční systém sestavený z dílčích systémů, které jsou mezi sebou propojeny a které si mezi sebou předávají informace.

Třetí kapitola je tvořena dvěma topologickými schémata. První (obr. 24) obsahuje bloky, které reprezentují dílčí systémy z druhé kapitoly. V tomto schématu je sice rozkreslená komunikace mezi střídači, motory a Řídicí jednotkou, ale částečně zaniká komunikace a propojení mezi zbylými systémy vlivem použití bloků dílčích systémů. Proto vzniklo druhé schéma (obr. 25), které je čistě blokové a kde je obsaženo kompletní propojení mezi klíčovými komponenty formule. Druhá topologie navíc obsahuje Palubní desku, kde jsou schématicky znázorněny kontrolky a tlačítka, která zde budou umístěna. V obou schématech je dodrženo barevné odlišení systémů pro větší přehlednost.

Topologie vozidla



Obr. 24 Topologie vozidla



Obr. 25 Bloková topologie vozidla

Závěr

Cílem této práce bylo nakreslit schématické uspořádání komponentů v elektroformuli.

V první kapitole práce je provedena rešerše aktuálních pravidel závodů, protože vozidlo, které se účastní závodu musí splňovat bezpečnostní pravidla a ustanovení, které organizátor závodu kontroluje. Pokud vozidlo nesplňuje pravidla, nebude připuštěno do závodu. Z tohoto důvodu bylo při návrhu topologie nutné dodržovat tato pravidla.

Druhá kapitola se zabývá samostatnými systémy formule, funkcí jednotlivých komponentů a návrhu komunikace mezi komponenty. Jako prostředek pro komunikaci bude použita datová sběrnice CAN. U některých komponentů jsou návrhy na možné produkty, které odpovídají pravidlům a které by bylo možné použít na formuli. Ke každému systému nebo bezpečnostnímu prvku je přiděleno funkční schéma, které by mělo jasně definovat jeho funkci a jeho komunikaci s ostatními systémy.

Třetí kapitola je věnována celková topologie vozu. V kapitole jsou obsažena dvě topologická schémata. První schéma navazuje na druhou kapitolu sestavením bloků jednotlivých systémů z druhé kapitoly a jejich zapojením. Toto schéma lépe znázorňuje CAN komunikaci ve formuli, ale kladl se menší důraz na zbylá zapojení. Proto vzniklo druhé topologické schéma, které je čistě blokové a definuje kompletní zapojení všech systémů na formuli včetně jejich signalizace. Ve schématech se kladl důraz na přehlednost a jednoznačnost, které napomáhá barevné odlišení jednotlivých zapojení.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] FSAE International. Formula SAE® Rules 2019 Version 2.1. *FORMULA SAE* [online]. Spojené státy americké: SAE International, 2018 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: <http://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [2] BRENIER, A., J. MCDOWALL a C. MORIN. A new approach to the qualification of lithium-based battery systems. *2004 10th International Workshop on Computational Electronics (IEEE Cat. No.04EX915)* [online]. IEEE, 2004, , 12-18 [cit. 2019-06-02]. DOI: 10.1109/INTLEC.2004.1401438. ISBN 0-7803-8458-X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1401438/>
- [3] PEC Automotive Fuse Catalogue. In: *PEC* [online]. Japonsko: Pacific Engineering Corporation, 2016 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: https://www.pecj.co.jp/fuse/files/PEC_Fuse_Catalogue_en.pdf
- [4] RATNAPALASARI, Christian, Williem KARTASASMITA a Foad MUNIR. *MUR5: Accumulator Design for an FSAE Electric Car* [online]. Melbourne, Australia, 2017 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: https://www.academia.edu/35563442/MUR5_Accumulator_Design_for_an_FSAE_Electric_Car. Akademická práce. The University of Melbourne.
- [5] GIGAVAC Manual Battery Switch BD. In: *GIGAVAC* [online]. Velká Británie, 2017 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: http://www.gigavac.com/sites/default/files/catalog/spec_sheet/bd.pdf
- [6] Indicator light on an F1 car. In: *Euro Circuits* [online]. Belgie: Head of Electronics, 2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.eurocircuits.com/blog/formula-electric-belgium-own-electronic-control-unit-with-eurocircuits-pcbs-3/>
- [7] AMK RACING KIT 4 wheel drive "Formula Student Electric". *AMK group* [online]. Německo: AMK Arnold Müller GmbH & Co., 2017 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: <http://www.keymol.com/filedownload/48149>
- [8] BENDER ISOMETER® IR155-3203/IR155-3204. *BENDER* [online]. Německo: Bender GmbH & Co., 2004 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/d/e/IR155-32xx-V004_D00115_D_XXEN.pdf
- [9] First Inertia Switch Vehicle crash sensor. *EV WORKS* [online]. Austrálie, 2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.evworks.com.au/first-inertia-switch-vehicle-crash-sensor-8-14g>