

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Bateriový management soustavy trakčních lithiových
baterií**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej DOSTÁL**
Osobní číslo: **E13B0180P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Bateriový management soustavy trakčních lithiových baterií**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

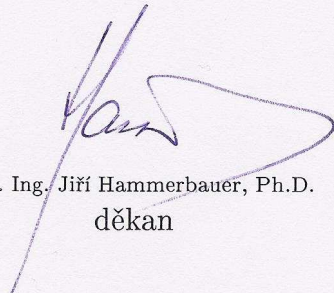
1. Současný stav bateriových technologií.
2. Úloha bateriového managementu.
3. Vypracování blokového návrhu hardware bateriového managementu pro vybrané lithiové baterie.
4. Vypracování vyhodnocovacích algoritmů pro bateriový management.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

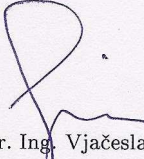
1. Flajtingr J., Kule L.: Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči, Skripta ZČU Plzeň 2005.
2. Firemní dokumentace ŠKODA:
Flajtingr J. a kol.: Bateriové vozy. Technicko-ekonomická studie;
Flajtingr J. a kol.: Řešení problematiky optimálního pracovního bodu a energetických toků sériového hybridu s trakčními bateriemi a superkapacitory;
Flajtingr J. a kol.: Projekční dokumentace elektrovýzbroje sériového hybridního busu;
Flajtingr J. a kol.: Simulace vozidla se sériovou koncepcí vybaveného trakčními bateriemi a superkapacitory;
Flajtingr J. a kol.: Components of electrical equipment for the battery tram.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Dr. Ing. Jiří Flajtingr**
Škoda Electric, Plzeň
Konzultant bakalářské práce: **Petr Dvořák**
Škoda Electric a.s.

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na blokové vytvoření systému bateriového managementu na základě aktuálních požadavků pro trakční vozidla. Poskytuje přehled dostupných trakčních baterií a jejich klíčových vlastností pro danou aplikaci a dále představuje základní průpravu do teorie balancování a vyhodnocování stavu baterií. Cílem práce je vytvoření blokového schématu hardwaru systému bateriového managementu, na jehož základě jsou postaveny vyhodnocovací algoritmy pro obsluhu konkrétních baterií s lithiovým základem společně s vyhodnocením možných kritických stavů systému.

Klíčová slova

Bateriový management, BMS, trakční baterie, Li-Ion, bateriové vozidlo, balancování baterií, trakční lithiová baterie, elektrické vozidlo

Abstract

This thesis is focused on design of battery management system based on actual requirements for traction vehicles. It provides general knowledge of traction batteries including the key properties for traction applications followed by the elementary theory of battery balancing and appraisal of actual battery conditions. The target of this thesis is to create block diagram of hardware for battery management system designed for defined lithium batteries with evaluation of critical conditions of whole system.

Key words

Battery management, BMS, traction battery, Li-Ion, electric battery vehicle, battery balancing, traction lithium battery, pure electric vehicle

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 13.5.2016

Ondřej Dostál

Poděkování

Za cenné rady a připomínky k vlastní realizaci práce a také za metodické vedení bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Flajtingrovi. Dále bych chtěl poděkovat Petrovi Dvořákovi nejenom za velice přínosné a užitečné rady při návrhu blokového schématu a vyhodnocovacích algoritmů. Rád bych také touto cestou poděkoval rodičům nejenom za důkladnou korekturu práce, ale také za poskytnutí zázemí a finančních prostředků na studium.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
ÚVOD.....	12
1 SOUČASNÝ STAV BATERIOVÝCH TECHNOLOGIÍ.....	14
1.1 ELEKTROCHEMICKÉ ČLÁNKY A BATERIE.....	14
1.2 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VELIČINY A VLASTNOSTI BATERIÍ.....	15
1.2.1 Jmenovité napětí.....	15
1.2.2 Jmenovitá kapacita.....	15
1.2.3 Energetická účinnost.....	15
1.2.4 Hustota energie a měrná energie.....	15
1.2.5 Samovybíjení.....	16
1.2.6 Životnost.....	16
1.3 AKUMULÁTORY PRO ELEKTRICKOU TRAKCI.....	16
1.3.1 Olověné baterie.....	17
1.3.2 NiCd baterie.....	17
1.3.3 NiMH baterie.....	17
1.3.4 Lithiové baterie.....	18
1.3.5 ZEBRA baterie.....	19
1.3.6 Superkapacitory.....	19
1.4 ZAPOJENÍ BATERIOVÝCH MODULŮ.....	20
2 ÚLOHA BATERIOVÉHO MANAGEMENTU.....	21
2.1 OBECNÝ PRINCIP FUNKCE.....	21
2.2 KLÍČOVÉ POŽADAVKY NA BMS.....	21
2.2.1 Stav nabití (SoC).....	22
2.2.2 Hloubka vybití (DoD).....	22
2.2.3 Zdravotní stav baterie (SoH).....	22
2.2.4 Nabíjecí proudy.....	23
2.2.5 Vybíjecí proudy.....	23
2.2.6 Provozní teploty.....	23
2.2.7 Balancování bateriového managementu.....	24
2.3 KONCEPCE BALANCERŮ.....	24
2.3.1 Ztrátové (pasivní) BMS.....	25
2.3.2 Pozitivní (aktivní) BMS.....	25
2.3.3 Samostatné balancery.....	26
2.3.4 Sdružené balancery.....	27
3 BLOKOVÝ NÁVRH HARDWARU BATERIOVÉHO MANAGEMENTU.....	28
3.1 ZÁKLADNÍ STAVBA BMS.....	28
3.1.1 Řídící jednotka bateriového managementu.....	28
3.1.2 Lokální monitorovací jednotka.....	29
3.1.3 Bateriový modul.....	29
3.1.4 Vzájemná komunikace BMU a LMU.....	30
3.2 PERIFERIE.....	30
3.2.1 Měřicí obvody a měřené veličiny.....	30
3.2.2 Spínací a řídicí obvody.....	31
3.2.3 Komunikace s dalšími systémy vozidla.....	31
3.2.4 Možnosti propojení více BMU.....	32
3.3 BLOKOVÉ SCHÉMA NAVRŽENÉHO BMS.....	32
3.3.1 Spínací skříňka.....	33
3.3.2 Topení a chlazení bateriových modulů.....	34
3.3.3 Ochranné prvky proti přetížení a kritickým stavům.....	35

3.3.4 Omezovač proudu.....	35
3.3.5 Nabíječ.....	35
3.3.6 Možnosti balancování a monitorování.....	36
3.3.7 Systém napájení.....	36
4 VYHODNOCOVAČÍ ALGORITMY PRO BMS.....	37
4.1 PROVOZNÍ STAVY.....	37
4.1.1 Normální režim.....	37
4.1.2 Nouzový režim.....	37
4.1.3 Poruchový režim.....	38
4.1.4 Vstupní a výstupní proměnné.....	38
4.2 PROVOZNÍ PARAMETRY A JEJICH NASTAVENÍ.....	39
4.2.1 Parametry baterií <i>LecCell G/NMC</i>	39
4.2.2 Nízké napětí.....	41
4.2.3 Balancovací napětí a proud.....	42
4.2.4 Nabíjecí napětí.....	43
4.2.5 Kapacita baterie a kritická úroveň vybití.....	43
4.2.6 Detekce životnosti baterie.....	44
4.2.7 Teplota BM.....	45
4.2.8 Kritická úroveň proudu.....	46
ZÁVĚR.....	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	49
PŘÍLOHY.....	1
PŘÍLOHA A – KOMPLETNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA BMS.....	1
PŘÍLOHA B – KOMPLETNÍ VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRO VYHODNOCOVÁNÍ BMS.....	2

Seznam symbolů a zkratek

Symboly

C_N [Ah].....	Jmenovitá kapacita akumulátorů
E [Wh].....	Elektrická energie
I [A].....	Elektrický proud
U [V].....	Elektrické napětí
U_N [V].....	Jmenovité napětí akumulátorů
U_{cc} [V].....	Napájecí napětí z palubní baterie
U_C [V].....	Celkové napětí bateriového packu
e_m [Wh.kg ⁻¹].....	Hustota energie
m_E [Wh.dm ⁻³].....	Měrná energie

Zkratky

1C.....	Vybíjecí proud je jednonásobkem kapacity baterie
BM.....	Bateriový modul (Battery Modul)
BP.....	Bateriový pack
BS.....	Bateriový stack
BCU.....	Battery Central Unit
BMS.....	Systém bateriového managementu (Battery Management System)
BMU.....	Řídící jednotka bateriového managementu (Battery Master Unit)
CAN.....	Sběrnice CAN (Controller Area Network)
DoD.....	Hloubka vybití (Depth of Discharge)
EDLC.....	Electric Double Layer Capacitors
I/O EXTERNÍ....	Vstupně výstupní brána externích systémů do BMS
LMO.....	Lithium-manganový akumulátor
LMU.....	Lokální monitorovací jednotka (Local Monitoring Unit)
LTO.....	Lithium-titanátový akumulátor
Li-Ion.....	Lithium-iontový akumulátor
Li-Pol.....	Lithium-polymerový akumulátor
LiFePO ₄	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
MCU.....	Mikrokontrolér (Microcontroller Unit)
Na-NiCl ₂	Sodík-nikl-chloridový akumulátor

NiCd.....	Nikl-kadmiový akumulátor
NMC.....	Lithium-nikl-mangan-cobaltový akumulátor
NiMH.....	Nikl-metal hydridový akumulátor
SP.....	Spínač
SoC.....	Stav nabití (State of Charge)
SoH.....	Zdravotní stav baterie (State of Health)
SPB1.....	Spínač balancovacího rezistoru prvního článku
SP_NABÍJEČ.....	Spínač při připojení/odpojení nabíječe k bateriovému packu
SP_ZÁTĚŽ.....	Spínač při připojení/odpojení zátěže k bateriovému packu
TP_BS1.....	Senzor teploty bateriového stacku 1
VC1.....	Proměnná reprezentující napětí na prvním článku
ZEBRA.....	Zeolite Battery Research Africa Project

Úvod

Vzhledem k rostoucím aplikacím čistě bateriových pohonů trakčních vozidel jsou kladeny čím dál vyšší nároky na bateriové systémy. Z hlediska chemické stránky baterií dochází k rozvoji s cílem prodloužit životnost baterií a přistupuje se k využívání nových technologií i materiálů. Vyšší nároky na celkovou kapacitu bateriových systémů navíc vyžadují pokročilejší řídicí elektroniku.

Tato bakalářská práce je věnována návrhu systému bateriového managementu, na jehož základě jsou vytvořeny algoritmy pro vyhodnocování klíčových parametrů. Součástí práce je přehled aktuálně dostupných akumulátorů, přičemž největší důraz je kladen na akumulátory založené na lithiovém základu. To podmínilo také stanovení teoretické průpravy vysvětlující často používané pojmy a postupy v oblasti bateriového managementu.

Cílem práce je blokové sestavení důležitých hardwarových prvků systému bateriového managementu doplněné o základní algoritmy v podobě vývojových diagramů pro vyhodnocování klíčových parametrů a kritických stavů na konkrétních lithiových bateriích.

Důvodem ke vzniku práce jsou chybějící širší podklady v českém jazyku, které by poskytly v daném rozsahu práce dostatečně široký pohled na problematiku z více uhlů. Většinou jsou bateriové systémy know-how každého výrobce, nejčastěji výrobce baterií. Využití podobných řešení přináší patřičná omezení v oblasti škálovatelnosti a konfigurovatelnosti daného systému. Vlastní návrh může být ušitý přesně na míru dané aplikaci.

Samotnou strukturu práce lze rozdělit do čtveřice částí. První část věnovaná přehledu aktuálních technologií v oblasti elektrochemických akumulátorů pro elektrickou trakci poskytuje přehled nejvýznamnějších vlastností jednotlivých akumulátorů a zdůrazňuje důvody využívání aktuálních technologií. Druhá část se věnuje úloze bateriového managementu v bateriových systémech včetně nejdůležitějších požadavků. Zmiňuje také základní koncepce balancovacích obvodů a důvody, proč je v praxi nezbytné jednotlivé

články baterií balancovat. Třetí část obsahuje samotný blokový návrh hardwaru systému bateriového managementu, který aplikuje teoretické poznatky z předchozích dvou částí. V poslední části dochází k interakci navrženého systému s konkrétními bateriemi LecCell G/NMC 43Ah v podobě vyhodnocovacích algoritmů.

Vzhledem k aktuálnosti tématu existuje řada cizojazyčných literárních pramenů [7,8], které poskytly základní postupy při tvorbě systému a podklady k definici nejnezbytnějších veličin. Při tvorbě samotného blokového schématu a následném přehledu základních algoritmů posloužila jako cenný zdroj informací firemní dokumentace ŠKODA ELECTRIC a.s. [2,3,4,5,6].

1 Současný stav bateriových technologií

1.1 Elektrochemické články a baterie

Elektrochemický článek, často nazývaný galvanický článek, je zdroj stejnosměrného proudu pracující na základě oxidačně-redukční (redoxní) reakce, jejíž produktem jsou mimo jiné volné elektrony mající za následek vznik elektrického potenciálu. Skládá se z kladné elektrody, záporné elektrody, elektrolytu a separátoru. Elektrochemické zdroje lze obecně rozdělit do tří typů: [11, 12]

- **Primární článek** - proces vybití článku je nevratný, neboť je materiál záporné elektrody v průběhu chemické reakce spotřebován.
- **Sekundární článek** - specifickou konstrukcí článku je docíleno možnosti opakovaného nabití a vybití článku, neboť procházející proud při nabíjení způsobuje vratné chemické procesy akumulující elektrickou energii. Následně při vybití probíhají tyto procesy v opačném směru. Na základě toho můžeme sekundární články nazývat akumulátory.
- **Palivový článek** - elektrická energie je přímo získána z reakce paliva s oksyločovadlem, aniž by došlo k porušení struktur elektrod.

Záporná elektroda skládající se z aktivní hmoty v průběhu redoxní reakce uvolňuje volné elektrony, tudíž dochází k oxidaci. Zpravidla jí říkáme katoda.

U **kladné elektrody**, jinak nazývané anoda, v rámci redoxní reakce dochází k redukci, z čehož plyne, že volné elektrony přijímá.

Separátor je porézní membrána, jejíž úkolem je vzájemné oddělení elektrod různých polarit pro zamezení elektrických zkratů. Zároveň zajišťuje propustnost iontů, která je nezbytná pro korektní funkci elektrochemického článku. [28]

Elektrolyt je pevná nebo kapalná látka s vlastností iontové vodivosti. Obsahuje volné ionty nezbytné pro průchod elektrického proudu mezi elektrodami.

1.2 Základní fyzikální veličiny a vlastnosti baterií

Při volbě akumulátorových baterií s požadovanými parametry vycházíme z následujících klíčových vlastností, které jsou společné pro všechny baterie založené na principu elektrochemických reakcí. [11]

1.2.1 Jmenovité napětí

Jmenovité napětí je parametr s označením U_N [V], často udávaný na štítku akumulátorů. Jeho velikost je dle příslušné normy přibližně rovna střední hodnotě vybíjecího napětí za standardních podmínek. [27]

1.2.2 Jmenovitá kapacita

Jmenovitá kapacita C_N [Ah] je výrobcem deklarovaná hodnota stanovená součinem vybíjecího proudu a doby vybíjení. Odpovídá celkovému elektrickému náboji, který může akumulátor při vybíjení za daných podmínek dodat.

1.2.3 Energetická účinnost

Energetická účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu je definována poměrem elektrické energie, která byla z akumulátoru odebrána vybíjením, k elektrické energii dodané do obvodu procesem nabíjení.

1.2.4 Hustota energie a měrná energie

Při výběru trakčních baterií jsou významnými veličinami měrná energie a hustota energie. Udávají elektrické parametry vztažené na jednotku mechanických parametrů, konkrétně na jednotku hmotnosti, či objemu. [11]

Měrná energie [Wh.kg⁻¹] vztahuje k 1 kg hmotnosti akumulátoru maximální množství elektrické energie [Wh], kterou je možné z akumulátoru odebrat.

Hustota energie [Wh.dm⁻³] je dána maximální elektrickou energií, kterou můžeme odebrat z 1 dm³ objemu akumulátoru.

1.2.5 Samovybíjení

Samovybíjení je nežádoucí proces způsobující ztrátu energie uchované v akumulátoru, aniž by baterie byla připojena k vnějšímu elektrickému obvodu. Tento proces nelze zvrátit, neboť je způsobován elektrochemickými reakcemi v akumulátoru. Velikost samovybíjení závisí na chemickém složení článku a vzrůstá s rostoucí teplotou, počtem cyklů a stářím akumulátoru. Jednotkou jsou procenta jmenovité kapacity při pokojové teplotě okolo 20°C. [26,10]

1.2.6 Životnost

Životnost akumulátoru je definovaná jako doba, po kterou je baterie za stanovených podmínek využívána, a je garantována výrobcem. Udává se v čase (měsíce, roky), počtu normalizovaných cyklů nabíjení a vybíjení (nejčastěji) a nebo kapacitou. Na životnost má vliv prostředí, ve kterém baterie operuje, ale také vlastní konstrukce a způsob používání. Zatímco vysoká teplota snižuje životnost, nízká teplota zpravidla jen krátkodobě snižuje kapacitu a vybíjecí proudy. Jako konec životnosti baterií se obecně používá pokles kapacity pod 80 % jmenovité hodnoty, což ve skutečnosti nemusí znamenat ukončení provozu baterie.[10, 11]

1.3 Akumulátory pro elektrickou trakci

Elektrická trakce vyžaduje od baterií odlišné parametry než je tomu například u startovacích baterií, od kterých požadujeme krátkodobý odběr velkého elektrického proudu. U čistě elektrických nebo hybridních elektrických vozidel je nezbytné baterie dimenzovat na nižší, ale dlouhodobější vybíjecí proudy. Dalšími aspekty ovlivňujícími volbu baterie je velikost vozidla, výkon instalovaných motorů a periférií a také trať, po níž se bude vozidlo nejčastěji pohybovat. Z dlouhodobějšího hlediska nás zajímá také životnost, spolehlivost, náročnost údržby a nebo bezpečnost provozu baterií.

Pro tyto účely existují trakční baterie, tedy speciální průmyslové baterie, určené pro hluboké vybití a častější nabíjení a vybíjení. Robustnější elektrody trakčních baterií sice neposkytují tak velké vybíjecí proudy oproti startovacím bateriím, ovšem nestárnou tak rychle častým vybíjením a nabíjením. Využití trakčních baterií je například v elektromobilech, nebo čistě elektrických autobusech. [2, 7, 9, 10]

1.3.1 Olověné baterie

Nejstarším zástupcem trakčních baterií jsou olověné baterie, které se dnes z důvodu nevyhovujících parametrů již nepoužívají.

Výhodou olověných baterií je elektrická robustnost a příznivá cena. Nevýhodami je poté velká hmotnost a rozměry, dlouhá doba potřebná k nabití a malá životnost. Z provozního hlediska je nevýhodná náročná údržba a kapacita citlivá na teplotě.

1.3.2 NiCd baterie

Nikl-kadmiové baterie přinesly podstatně lepší parametry, bohužel také větší zátěž na životní prostředí z důvodu obsahu škodlivého kadmia. Dnes se již nepoužívají.

Jejich výhodou je velký odběrový proud (až 10C), vysoká životnost a široké rozmezí pracovní teploty. NiCd baterie jsou navíc odolné proti přebíjení a kritickému vybití. Nevýhody spočívají především v přítomnosti paměťového efektu, který se podepisuje na poklesu kapacity. Před vybitím baterie navíc prudce klesá napětí. Z konstrukčního hlediska je velkou nevýhodou malá hustota energie.

1.3.3 NiMH baterie

Nikl-metal hydridové baterie byl velice rozšířený typ, neboť nabízel vyšší hustotu energie a neobsahoval škodlivé kadmium. Dříve šlo o výrazně rozšířený typ trakčních baterií, který své uplatnění našel například v hybridních vozidlech. Dnes se v trakčních aplikacích nepoužívá.

Jednoznačnou výhodou je vyšší hustota energie oproti předchozím zástupcům a malý paměťový efekt oproti NiCd. Na druhou stranu nabízí pouze omezený rozsah pracovních teplot a nižší mechanickou odolnost. Dalšími nevýhodami je menší životnost, nízká účinnost nabíjecích a vybíjecích cyklů a také vyšší samovybíjení spojené s velkou vnitřní impedancí, která omezuje vybíjecí proud při špičkovém odběru.

1.3.4 Lithiové baterie

Lithiové baterie v současnosti znamenají nejmodernější konstrukci trakčních baterií. Jejich použití je velice široké a mnoho jejich parametrů smazává nevýhody starších konstrukcí baterií. Obecně nabízejí velice dobrou hustotu energie, vysokou účinnost nabíjecího a vybíjecího cyklu a také vyšší jmenovité napětí jednotlivých článků. Oproti NiMH a NiCd nemají baterie na bázi lithia paměťový efekt.

Lithium-Iontové baterie (**Li-Ion**) nabízejí vysokou hustotu energie a měrnou energii společně s vysokou účinností nabíjecího a vybíjecího cyklu. Nevýhodou je citlivost na vysoké teploty a přebíjení. Navíc Li-Ion baterie ztrácejí postupem času svoji kapacitu, i když nejsou používány. Vybíjecí proudy jsou nižší a dosahují pouze 2C až 3C. Při úplném vybití může dojít k jejich zničení. V oblasti trakčních pohonů jde o překonanou technologii.

Lithium-polymerové baterie (**Li-Pol**) jsou další fází vývoje lithiových baterií. Jejich největší výhodou je jejich tvarovatelnost a nízká hmotnost při zachování vysoké hustoty energie a měrné energie. Vedle toho mají také výbornou účinnost nabíjecího a vybíjecího cyklu. Z hlediska nevýhod je nejdůležitějším aspektem možnost exploze při přetížení, či mechanickém poškození. Li-Pol baterie jsou také charakteristické nižší životností a malou elektrickou robustností.

LiFePO₄ a LiFeYPO₄, jinak zvané lithium-železo-fosfátové baterie jsou v trakčních aplikacích v současnosti široce používány. Oproti Li-Pol bateriím jsou bezpečné, a to i v extrémních podmínkách. Díky malému vnitřnímu odporu nabízejí až 95% účinnost a jsou schopné dodávat vysoké vybíjecí proudy i při náhlých špičkách. Navíc nabízejí dlouhou životnost. Nevýhodou je ovšem vysoká cena a nízká hustota energie a nízká měrná energie. [16, 19]

Baterie **LTO** (lithium-titanátové) jsou jistou evolucí baterií LiFePO₄. Nabízejí především široké spektrum pracovních teplot, dlouhou životnost a vysokou účinnost vybíjecího a nabíjecího cyklu, které jsou symetrické. Podobně jako LiFePO₄ jsou LTO baterie bezpečné. [18, 15]

Dalšími aktuálně široce používaným zástupcem lithiových baterií jsou takzvané **LMO** baterie (lithium-manganové). Výhodou je možnost odebírat rychle velké vybíjecí proudy a díky nízkému vnitřnímu odporu LMO baterie disponují malým samovybíjením. Na druhou stranu nabídnou nižší kapacitu společně s velkou citlivostí na vysoké operační teploty. [21]

Velice perspektivní technologií jsou lithiové baterie **NMC** (lithium-nikl-mangan-cobaltové), které na rozdíl od LMO baterií mají vyšší životnost a hustotu energie. Společnou vlastností s LMO je nízká hodnota samovybíjení. Menší nevýhodou je omezenější spektrum operačních teplot. NMC baterie, často v kombinaci s technologií LMO, jsou využívány v elektromobilech, jako například v Nissanu Leaf, Chevroletu Volt, či BMW i3. [13,21]

1.3.5 ZEBRA baterie

Sodík-nikl-chloridové baterie (**Na-NiCl₂**) jsou charakteristické nutností udržovat uvnitř článků teplotu až 300°C, která je nezbytná pro elektrochemickou reakci. Z tohoto důvodu mají ZEBRA baterie obrovské samovybíjení. Jejich efektivita je tedy nízká a cena vysoká. Výhodou je, že jsou ekologické a poskytují velkou hustotu energie. Název si získaly v rámci pilotního projektu Zeolite Battery Research Africa Project (ZEBRA). [29, 24, 14]

1.3.6 Superkapacitory

Superkapacitory (**EDLC** – Electrochemic Double Layer Capacitor) jsou v současnosti nedílnou součástí trakčních pohonů, neboť jsou schopné rychle přijímat, nebo dodávat elektrickou energii, kterou uchovávají v elektrostatickém poli. Oproti akumulátorům uchovávajícím energii v chemické formě, z níž je opětovné získání energie podstatně pomalejší a ztrátové. Díky tomu pokryjí nárazové požadavky nebo dodávky energie, čímž prodlužují životnost baterií.

Vyznačují se vysokou účinností a širokým rozsahem pracovních teplot. Aktuální velikost napětí navíc prozrazuje velikost naakumulované energie. Nevýhodou je bohužel malá kapacita (oproti elektrochemickým akumulátorům) a současně i vysoká cena.

Z důvodu zlepšení klíčových parametrů elektrochemických zdrojů se využívá vhodného spojení dvou a více elektrochemických článků. Takovému seskupení říkáme baterie. [2, 11, 25]

1.4 Zapojení bateriových modulů

Pro zvýšení nízkého jmenovitého napětí jednotlivých článků využíváme jejich sériové zapojení, přičemž je nezbytné dodržet několik zásad. Jednotlivé články musí být stejného typu a se shodnou jmenovitou kapacitou a stářím. Kapacita celku je dána kapacitou jediného článku a výsledné napětí zapojení je dáno prostou sumou všech napětí jednotlivých článků.

Výsledkem paralelního zapojení článků je vyšší kapacita baterie daná počtem paralelně připojených článků. Zásadou pro paralelní zapojování je dodržení stejného typu a jmenovitého napětí jednotlivých článků. Velikost jmenovitého napětí baterie je rovno napětí jediného článku.

Vzájemnou kombinací dvou předchozích typů zapojení získáme sérioparalelní zapojení, díky kterému dosáhneme jak vyšší kapacity, tak i vyššího jmenovitého napětí. Jednotlivé články se nejprve zapojují sériově do sériového celku pro dosažení vyššího napětí a následně se sériové celky spojí paralelně pro zvýšení kapacity. [10]

Typ akumulátoru	Hustota energie [Wh/kg]	Jmenovité napětí [V/článek]	Doba nabíjení [hod]	Životnost [cyklů]	Samovybití za měsíc [%]	Pracovní teploty [°C]
Olověný	30 – 50	2	2-5	400	5	-20 až +50
NiCd	50 – 80	1,2	1	1500	20	-40 až +70
NiMH	60 – 110	1,2	2-3	500	30	-30 až +50
Li-Ion	200	3,7	1-3	2000	5	-20 až +40
Li-Pol	100-250	3,65	1-1,5	800	3	-20 až +60
LiFePO₄	100-180	3,25	0,5-2	8000	2	-40 až +60
LTO	106	2,26	0,15	16000	2,5	-40 až +55
NMC	150-220	3,7	3	4500	1	-20 až +55
LMO	100-150	3,7	4,5	700	1	-30 až +60
ZEBRA	90 – 100	2,58	6	1000	14	-270 až +350
Superkapacitor	2,5	2,3 – 2,7	řád sekund	1000000	neměřitelné	-40 až +65

Tab. 1.1: Souhrnný přehled aktuálně dostupných řešení trakčních baterií.[6, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 19]

2 Úloha bateriového managementu

2.1 Obecný princip funkce

V elektrické trakci je aktuálně nemožné využití pouze jediného bateriového článku pro napájení celého zařízení, a proto se k dosažení požadovaných parametrů používají jejich sérioparalelní kombinace. Obecně je celá soustava baterií včetně bateriového managementu označována jako bateriový pack. V aplikacích elektrické trakce se nejčastěji celý systém rozděluje na bateriové stacky, jejichž paralelní spojení dá dohromady kompletní bateriový pack. Samotné bateriové stacky obsahují několik zcela elementárních jednotek v uvažování bateriových systémů – tedy bateriové moduly, které se skládají ze sériového spojení jednotlivých článků. Ke každému bateriovému modulu je zpravidla přidružena měřicí a balancovací jednotka, pojistky, chladicí systém a protipožární ochrana. Jednotlivé bateriové moduly jsou rozmístěné napříč celým vozidlem a jsou spojené paralelně v množství závislejícím na maximální přípustné hmotnosti celého vozidla, ale také na požadavcích zákazníka na dojezd daného vozidla. Rozmístění bateriových modulů se samozřejmě odvíjí od navrženého rozložení hmotnostního zatížení vozidla.

Spojování jednotlivých článků do celků ovšem přináší řadu problémů, přičemž příkladem může jít o různý stav nabití každého článku, či jejich unikátnost vzniklá technologií výroby a povolenými tolerancemi. Navíc je robustnost celku dána tím nejslabším článkem. Tyto nerovnoměrnosti parametrů článků je nutné vyrovnávat, což je jedním z úkolů bateriového managementu, zkráceně označovaného jako BMS (Battery Management System). Hlavními úkoly BMS je monitorování a kontrola provozu celého bateriového packu, ale také jejich ochrana před kritickými stavy. [7, 11]

2.2 Klíčové požadavky na BMS

Pro dosažení maximální životnosti baterií v běžných provozních podmínkách je nutné dodržet výrobcem stanovené meze především klíčových parametrů, což je dalším úkolem bateriového managementu. Navíc tyto parametry mohou posloužit jako zdroj důležitých informací pro další systémy a periferie bateriového managementu.

2.2.1 Stav nabití (SoC)

Stav nabití, často uvádění zkratkou SoC (State of Charge), podává informaci o aktuálním stavu baterie, respektive poměru aktuálně zbývající energie a využitelné energie. Udává se zpravidla v procentech jmenovité kapacity, přičemž 0% odpovídá zcela vybité baterii, zatímco 100% plně nabité baterii.

Na základě SoC vyhodnocuje bateriový management řadu provozních i kritických stavů. Informační charakter SoC odpovídá palivoměru u běžných vozidel se spalovacím motorem. Pokud je tedy stav nabití příliš nízký, může bateriový management informovat uživatele o zkracujícím se dojezdu a zároveň omezit výstupní proudy z bateriových packů. [7, 8, 9, 16, 23]

2.2.2 Hloubka vybití (DoD)

Hloubka vybití, zkráceně označovaná jako DoD (Depth of Discharge), je alternativou k SoC, přičemž představuje poměr energie využitelné k energii instalované. Používanou jednotkou jsou opět procenta jmenovité kapacity, avšak v případě DoD odpovídá 0% plně nabité baterii, zatímco 100% baterii úplně vybité. [7]

2.2.3 Zdravotní stav baterie (SoH)

Zdravotní stav baterie, zkráceně SoH (State of Health), představuje míru schopnosti baterie splňovat svůj definovaný výkon. Reflektuje tedy obecně aktuální kondici baterie oproti nové baterii. Uvádí se v procentech, kdy 100% představuje stav nové baterie. Na rozdíl od SoC, které udává stav baterie v jednom cyklu nabíjení a vybíjení, SoH slouží k dlouhodobějšímu posuzování stavu baterie a na základě toho je možné určit aktuální stáří a zbývající životnost baterie.

Z hlediska měřících postupů a algoritmů není SoH přesně definován. Je tak založen na sledování a zaznamenávání historie provozu baterie za pomoci parametrů, jako je počet cyklů, maximální a minimální napětí, teploty a maximální vybíjecí a nabíjecí proudy. Z těchto údajů se následně vyhodnocuje stárnutí bateriového packu a lze tedy odhadovat životnost celého packu. [7, 16, 19, 22]

2.2.4 Nabíjecí proudy

Při nabíjení ukládáme náboj do baterie a je nezbytné dodržovat výrobcem stanovené maximální hodnoty nabíjecího napětí a proudu. Nabíjecí proud může být v průběhu nabíjení proměnný, či konstantní. Důležitým parametrem je tak jeho střední hodnota, čemuž je nutné přizpůsobit příslušné měřicí systémy a algoritmy. Navíc je možné režimy nabíjení v průběhu procesu měnit dle potřeby. Hojně využívána možnost variabilního nabíjení baterií vděčí aktuálně nepoužívanějším lithiovým bateriím se zanedbatelným paměťovým efektem. U starších technologií baterií, tedy u NiCd, NiMH, je variabilita nabíjení z důvodu výrazného paměťového efektu nevhodná. Velikost nabíjecího proudu je udávána pomocí absolutní hodnoty v ampérech, případně vyjádřením násobku jmenovité kapacity dané baterie (například 1C). [13]

2.2.5 Vybíjecí proudy

Vybíjení je analogickým procesem k výše zmíněnému nabíjení, kdy trakční baterie dodává do zátěže stejnosměrný proud. Obdobně platí i stanovené meze, které nesmí být při provozu překročeny. Bateriový management tak nesmí připustit překročení trvalého vybíjecího proudu stanoveného výrobcem baterií. Překročení maximálního vybíjecího proudu by mělo za následek poškození baterie.

Výrobce udává také špičkový vybíjecí proud, který je možné z baterie odebírat po velmi omezenou dobu do poklesu napětí na určitou hodnotu. Délka intervalu špičkového proudu se pohybuje řádově v desetinách sekund. [13,15, 16]

2.2.6 Provozní teploty

Provozní teploty definují rozsah teplot, ve kterých může být bateriový pack provozován s parametry zaručovanými výrobcem baterií. Za změnou teploty baterií stojí nejenom vnější vlivy (například vysoké letní teploty, či zimní mrazy), ale také samotný provoz baterií, které se důsledkem jejich činnosti ohřívají a uvolňují tak teplo. Zdrojem je elektrochemická reakce uvnitř baterií a Joulovy ztráty v elektrolytu a elektrodách. S nárůstem proudu protékajícího baterií roste také uvolněné teplo a tedy i teplota baterií.

Zatímco nízká teplota, mající za následek snížení vybíjecího proudu vlivem rostoucího vnitřního odporu a zpomalení elektrochemické reakce, nemá zásadní vliv na životnost

trakčních baterií, vysoká teplota již životnost rapidně snižuje. Dochází totiž k urychlení elektrochemických reakcí, což způsobuje nežádoucí růst kapacity akumulátoru společně se samovybíjením. [13,15]

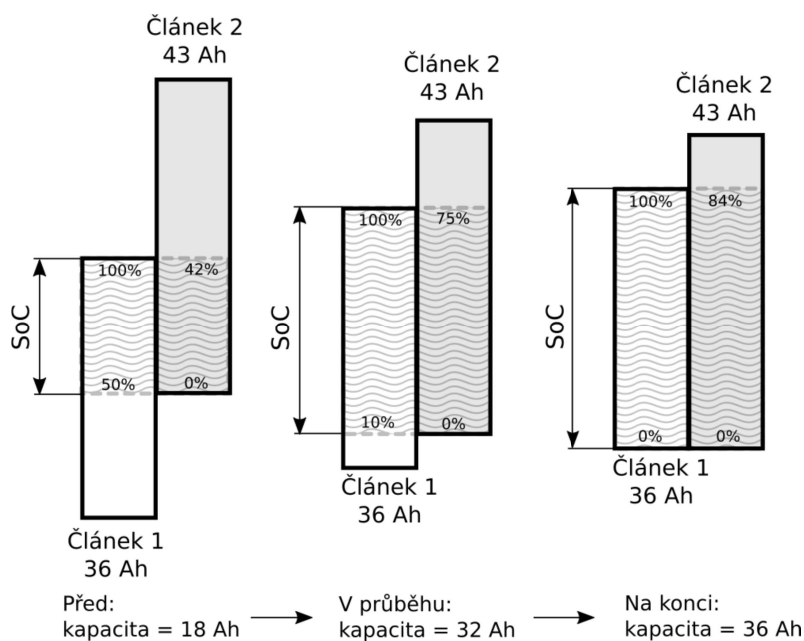
2.2.7 Balancování bateriového managementu

Vzhledem k jisté unikátnosti každé baterie v bateriovém packu, která byla nastíněna již v úvodu této kapitoly, je nutné provádět balancování napříč všemi bateriemi v packu za účelem uvedení proměnných parametrů jednotlivých baterií na stejnou úroveň. Dlouhodobá nežádoucí rozdílnost jednotlivých parametrů by totiž kladla rozdílné nároky na jednotlivé baterie a následkem toho by se rapidně zkracovala životnost celého bateriového packu.

Balancování zpravidla probíhá od stanovených hranic, nejčastěji napěťových, které se odvíjí od typu použitých baterií a jejich charakteristik vybíjecích cyklů. Maximální dovolené napětí se poté bateriový management automaticky snaží udržovat na všech bateriích, či jejich paralelních soustavách. Neméně důležité je správné dimenzování balancovacího výkonu, který nesmí být ani příliš velký, ani příliš malý. V prvním případě by v celé soustavě docházelo k velkým výkonovým ztrátám na řídicích tranzistorech a odporech. Naopak v případě malého balancovacího výkonu by soustava nebyla schopna zareagovat na neočekávané výkyvy napětí, což by navíc ztížilo manuální dobalancování. [7]

2.3 Koncepce balancerů

Základem systémů bateriového managementu jsou takzvané balancery, tedy zařízení starající se o vybalancování proměnných parametrů baterií v bateriových pacích. Jejich úkolem je získat z baterií potřebná data a předat vyhodnocovací jednotce. Sami tedy rozhodovací úlohu zpravidla nemají. Existuje celá řada konceptů s odlišnými principy, dostupnými funkcemi a vlastnostmi. Na základě výhod a nevýhod jednotlivých řešení lze následně zvolit ideální technologicko-ekonomický kompromis. [7]



Obr. 2.1: Zjednodušené zobrazení průběhu balancování, které má za následek také lepší využití baterií.

2.3.1 Ztrátové (pasivní) BMS

V současnosti nejčastěji používanou koncepcí jsou ztrátové, nebo-li pasivní BMS. Jejich princip spočívá v maření nadbytečné energie z nejvíce nabitých baterií v rezistorech, tedy ve výsledku do podoby tepla. Nespornou výhodou ztrátových systémů bateriového managementu je nižší počet výkonových součástí a s tím i nižší cena celého systému. Snazší je poté i řízení balancování a menší možnost poruchy, neboť poruchovost chemických článků je menší než poruchovost řídicí elektroniky. Všechna nadbytečná energie se sice promění v teplo, jehož cena je ale mnohonásobně nižší než cena složitých aktivních balancerů. Navíc lze vyzářené teplo využít v dalších systémech vozidla. Maření nadbytečné energie lze z provozního hlediska označit za nevýhodu, z hlediska ekonomického to nicméně nevýhoda není. [7]

2.3.2 Pozitivní (aktivní) BMS

Druhou koncepcí aktuálně spojenou s řadou nevýhod je aktivní, či-li pozitivní BMS, spočívající v aktivním využívání nadbytečné energie pro dobíjení nejméně nabitých článků v řetězci baterií. Přestože je všechna energie pohybující se v rámci bateriových modulů využita, což lze označit jako výhodu, její správné zpracování a distribuce vyžaduje nadbytečné množství řídicích a výkonových součástí, s nimiž úměrně roste cena a značně

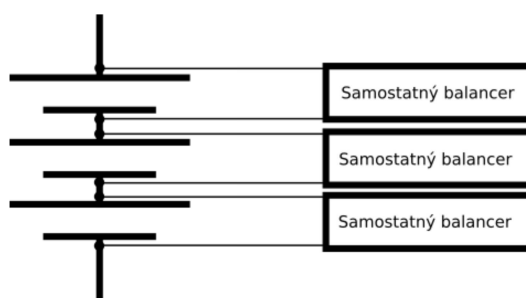
klesá spolehlivost. Selhání řídicích systémů aktivních BMS může způsobit zničení bateriových packů, což je z ekonomického hlediska nepřijatelné.

Výrobci mnohdy své BMS systémy v dokumentaci označují jako aktivní, nicméně ve smyslu možnosti změn parametrů BMS. Nikoli tedy aktivní výměnou energie v rámci bateriových modulů. Využití skutečných aktivních BMS je v současnosti malé. [7]

2.3.3 Samostatné balancery

Celý systém bateriového managementu je složen z centrální řídicí jednotky, která provádí vyhodnocovací činnost na základě informací získaných ze samostatných balancerů, přičemž v tomto případě připadá jeden balancer na jeden bateriový článek. Centrální řídicí jednotka získává separátně potřebná data, mezi která patří napětí článku, kapacita článku, či třeba nabíjecí a vybíjecí proud. Jednotlivé balancery jsou adresovány, což je nezbytné pro další vyhodnocování dat, ale také vhodné při poruše, neboť je snadno možné určit konkrétní vadný článek, či balancer. Adresování jednotlivých balancerů je řešeno hardwarově, tedy unikátní kombinací mechanických spínačů nastavených na plošném spoji měřící a balancovací jednotky. Druhou možností jak balancery adresovat je cesta softwaru, kdy je adresa jednotlivých balancerů dána řídicím systémem. Samostatný balancer nemá za úkol vyhodnocovat aktuální stav, pouze předává data a balancuje. Výhodou samostatných balancerů jsou vyšší balancovací proudy pohybující se v řádu ampér, díky snazšímu odvodu tepla. Je tak možné balancovat až 10 A a na každý balancer zvlášť připojit dostatečně dimenzovaný chladič.

Nevýhodou tohoto řešení jsou celkové vyšší obvodové nároky a vyšší možnost poruchy. S vyššími obvodovými nároky navíc značně stoupá i výsledná cena řešení systému bateriového managementu se samostatnými balancery. [7]



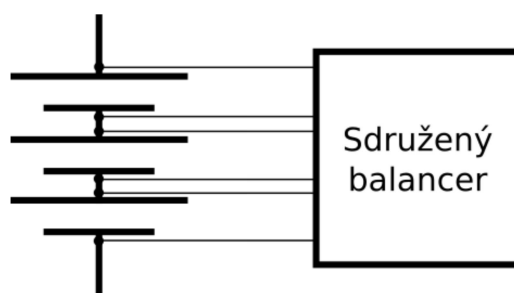
Obr. 2.2: Příklad zapojení samostatných balancerů.

2.3.4 Sdružené balancery

Rozdíl sdružených a samostatných balancerů spočívá v seskupení jednotlivých měřících a balancovacích obvodů do jediné jednotky. Sdružený balancer, stejně jako samostatný, je schopen získávat potřebná data separátně z každého bateriového článku v bateriovém modulu. Nenastává tedy nevýhoda menší přesnosti měření způsobené měřením více článků najednou. Zjistit také lze konkrétní místo poruchy, pokud porucha nastane na měřící jednotce. Ani sdružený balancer neobsahuje pokročilejší řídicí elektroniku, která by předzpracovala data a následně odeslala hlavní řídicí jednotce. Z ekonomického hlediska je snazší postavit jedinou řídicí jednotku a připojit k ní více jednoduchých měřících a balancovacích jednotek.

K jednotlivým článkům vedou ze sdruženého balanceru jen vodiče, což přináší obrovskou výhodu v lepších možnostech krytí jediného obvodu proti nepříznivým vlivům a znatelné snížení obvodových nároků. Tudíž není nutné rozvádět separátní napájecí větve k jednotlivým balancerům. Výhodou bezesporu je také možnost obsluhy více článků jedinou centrální řídicí jednotkou díky dané hierarchii.

Mezi nevýhody tohoto řešení patří odpojení více článků najednou při poruše jedné měřící a balancovací jednotky. Další nevýhodou sdružených balancerů je také horší řešení odvodu tepla, které má za následek značné omezení balancovacích proudů, které se zpravidla pohybují v řádu stovek miliampér. [7]



Obr. 2.3: Příklad zapojení sdružených balancerů.

3 Blokový návrh hardwaru bateriového managementu

3.1 Základní stavba BMS

Z hlediska systému bateriového managementu pro trakční aplikace se uvažuje v zásadě rozdělení bateriového packu na několik paralelně spojených bateriových stacků, které obsahují určitý počet bateriových modulů. Řízení celého systému obstarává v předešlé kapitole zmíněná centrální řídicí jednotka, kterou budeme dále nazývat řídicí jednotka bateriového systému, respektive BMU (z anglického originálu Battery Master Unit). Balancovat a měřit má za úkol lokální monitorovací jednotka, tedy LMU (z anglického originálu Local Monitoring Unit). Z důvodu širší aplikace a celé řady výhod stanovených ve třetí kapitole bude při návrhu uvažován systém bateriového managementu se sdruženými balancery. Bateriové moduly budou složeny z článků s lithiovým základem, což vychází z výhod a vlastností tohoto typu baterií zmíněných v druhé kapitole. [1, 7]

3.1.1 Řídicí jednotka bateriového managementu

Řídicí jednotka bateriového managementu, dále ve zkratce BMU, je centrem veškerého vyhodnocování a distribuce řídicích signálů v rámci celého systému bateriového managementu, neboť obsahuje řídicí obvody a výpočetní elektroniku. Potřebné informace získává z různých částí systému za pomoci soustavy senzorů, měřících prvků, lokálních balancerů a monitorovacích jednotek. Na základě toho BMU vyhodnocuje stav systému a vydává povely k balancování a řízení jednotlivých částí BMS.

K vyhodnocení stavu dochází na základě předem nakonfigurovaných algoritmů, které dovolují výpočet parametrů, jako jsou SoC, DoD, SoH, aktuální dojezd vozidla a další informace. Řadu dat následně předává dalším systémům vozidla, mezi které patří například palubní počítač či řídicí elektronika trakčních pohonů.

Dojde-li k poruše, či jinému nestandardnímu stavu, obstarává BMU správné korekční pokyny pro návrat do standardního provozního režimu. Omezí například vybíjecí proudy z baterií, pokud se hodnota SoC snižuje k dovolenému minimu, nebo se baterie nestandardně přehřívají. V případě závažných poruch může BMU odpojit bateriové stacky, či celé packy.

BMU nemá zpravidla zvýšené nároky na krytí, neboť se umísťuje poblíž palubního počítače, tedy do prostor nevystavených nepříznivým okolním vlivům či rušení pocházejícího například od spínací výkonové elektroniky. [2, 4, 6]

3.1.2 Lokální monitorovací jednotka

Lokální monitorovací jednotka, dále ve zkratce jen LMU, je připojena k jednotlivým bateriovým modulům a jejím hlavním úkolem je monitorování stavů jednotlivých článků. Monitoruje konkrétně teplotu jednotlivých článků, teplotu celého bateriového modulu, napětí každého článku, ale také teplotu vlastních obvodů.

Sdružené LMU zajišťuje také balancování článků v bateriových modulech. V návrhu je využito pasivní balancování z důvodů uvedených ve třetí kapitole. Balancování jednotlivých článků je prováděno do balancovacích rezistorů na základě SoC. Nadbytečná energie se následně přeměňuje na teplo, a proto je nutné monitorovat teplotu balancovacího rezistorů. Zároveň LMU měří i balancovací proudy. Proces balancování je ukončen na základě měřených veličin, pokud balancovací proud přesáhne nastavené maximum, nebo balancovací obvody LMU dosahují příliš vysoké teploty.

Na rozdíl od BMU se LMU nacházejí v blízkosti bateriových modulů. K vlastním článkům následně vedou pouze vodiče pro měření výše zmíněných veličin a balancování. Přestože LMU neobsahují složitou výpočetní elektroniku, je nutné v dostatečné míře řešit ochranné krytí proti nepříznivým vlivům včetně rušení. [17]

3.1.3 Bateriový modul

Bateriový modul je složen ze sériového spojení mnoha článků, jejichž počet se odvíjí od požadavků dané aplikace, ale také od možností konektivity použité LMU. Bateriové moduly jsou přímo připojené v cestě trakčního proudu, a proto je lze při lokalizaci ve vozidle snadno rozpoznat robustními přívodními vodiči.

3.1.4 Vzájemná komunikace BMU a LMU

Pro komunikaci jednotlivých LMU s BMU je vhodné použití průmyslové sběrnice CAN (Controller Area Network), která obecně v automobilovém průmyslu doznává velké popularity. V dostupných řešení není využití sběrnice tohoto standardu pravidlem, ovšem v mém návrhu využívám CAN i pro komunikaci mezi LMU a BMU. Jako alternativa může posloužit například průmyslová sběrnice RS485.

Jeden bateriový pack obsahuje velké množství modulů a tedy i LMU. Z tohoto důvodu je nutné řešit adresaci, která je zpravidla zajištěna unikátní kombinací mechanických přepínačů na desce LMU. Za provozu není nutné adresy měnit, tudíž nastavení mechanickými přepínači plně dostačuje. [17]

3.2 Periferie

Před vlastním popisem a návrhem BMS v podobě blokového schématu je nutné stanovit důležité periferie. Půjde především o měření klíčových veličin, očekávané vstupy a výstupy BMU i LMU a v neposlední řadě propojení více modulů a připojení BMS ke zbylým systémům vozidla.

3.2.1 Měřicí obvody a měřené veličiny

Pro zjišťování stavu celého bateriového systému je nutné měřit řadu veličin. Majoritně je to napětí ve stanovených částech systému, balancovací a trakční proudy a teploty ovlivňující provozuschopnost i životnost baterií.

Především pro potřeby výpočtů SoC, DoD, SoH se měří napětí na jednotlivých článcích, celých modulech, ale také na celém bateriovém packu. Dle SoC jednotlivých článků se totiž provádí balancování. Měření napětí má dále za úkol kontrolu správné polarizace, přepětí a podpětí při nabíjení či vybíjení baterií. Měření může být prováděno diskrétně na každém článku, nebo s využitím multiplexeru, díky kterému ušetříme množství instalovaných A/D převodníků a dalších obvodů pro zpracování. Vybíjecí charakteristika lithiových baterií dlouhodobě zaznamenává pouze malý pokles napětí, jehož výrazný spád přichází až při nízké hladině SoC. Je tedy nutné zajistit dostatečně přesné měřicí přístroje v závislosti na použité metodě výpočtu výsledných parametrů.

Obvyklá přesnost BMS je 10 až 30 mV, ve výjimečných případech i vyšší, tedy v jednotkách mV.

Pro správné fungování lithiových baterií je nutné dodržet jejich pracovní teploty stanovené výrobcem daných článků. Dlouhodobě příliš vysoká teplota zkracuje životnost baterie, zatímco příliš nízká teplota zpomaluje elektrochemické reakce uvnitř článků a omezuje tak výstupní proudy baterie. Měření se provádí zpravidla na několik místech – na jednotlivých člancích, v bateriových modulech, ale i v bateriových stacích. Pokud LMU nedovoluje měřit separátně teplotu jednotlivých článků, je nutné zvážit strategická místa, ke kterým by se připojil dostupný počet senzorů. Nejčastěji se tedy měří teplota vespod, navrchu a uprostřed bateriového modulu. Teplotu je nutné měřit také na balancovacích obvodech LMU. Měřicími senzory jsou zpravidla pozistory.

Vybíjecí a nabíjecí proudy se měří z důvodu výpočtu DoD, bezpečného odpojení baterií při kritických stavech, či z důvodu snížení velikosti trakčního proudu při klesajícím SoC. Chybět nesmí ani měření balancovacích proudů pro účely případného omezení aktivity balancovacích obvodů. [4, 6, 7, 17, 19]

3.2.2 Spínací a řídicí obvody

Řízení systému bateriového managementu obstarává soustava spínacích prvků, které jsou řízené dle pokynů BMU. V tomto návrhu je využito obecných spínačů s ideálními charakteristikami. V praxi jsou ale nejčastěji využívány polovodičové spínače, jako například IGBT tranzistory i mechanické spínače. Použití zmíněných druhů spínačů se odvíjí od nároků dané aplikace. Spínače jsou připojené na sběrnici CAN, prostřednictvím které je zajištěna komunikace s BMU. [1, 17]

3.2.3 Komunikace s dalšími systémy vozidla

Pro správnou funkci celého systému je nezbytné zajištění komunikace mezi BMU, respektive celým systémem bateriového managementu a dalšími systémy vozidla. BMU může od ostatních systémů dostávat konfigurační příkazy či data z externích senzorů. V opačném směru může BMU vydávat například povely pro omezení výstupního proudu, či odpojení zátěže.

3.2.4 Možnosti propojení více BMU

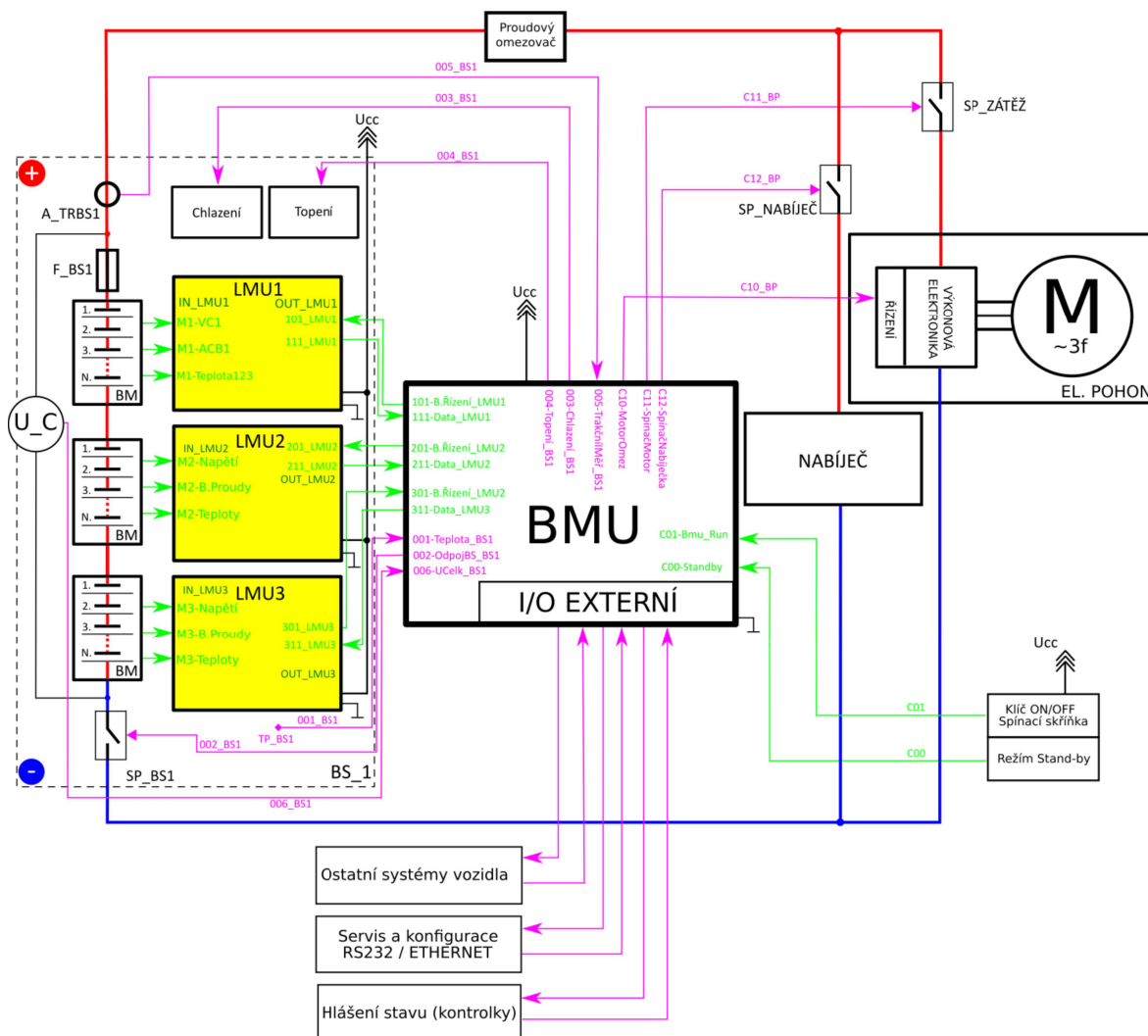
S požadavky na větší dojezd, či vyšší výstupní proudy stoupají i nároky na řízení celého systému. Jediné BMU má navíc omezený počet připojitelných LMU, tudíž je nutné do systému zavést nadřazenou jednotku, která řídí kompletně celý bateriový systém daného vozidla. K tomuto účelu slouží takzvaná BCU (Battery Central Unit), která řídí celý bateriový systém a zároveň i jednotlivé BMU. V tomto případě je nutné jednotlivým BMU modulům přiřadit unikátní adresu, podobně jako v případě LMU. Adresa se nejčastěji přiřazuje mechanickými přepínači přímo na desce BMU, neboť ji zpravidla není nutné měnit za chodu. Komunikace mezi BMU a BCU je opět zprostředkována sběrnici CAN.

3.3 Blokové schéma navrženého BMS

Tato podkapitola se věnuje vlastnímu návrhu systému bateriového managementu v podobě blokového schématu. V návrhu jsou použity prvky, jejichž výhody jsou zvýrazněny v předešlých kapitolách, a proto zde nebudou podrobně popisovány vlastnosti jednotlivých bloků, pokud to nebude nutné.

Navržené BMS jsou oproštěny od opakujících se prvků, tudíž popisují jediný bateriový stack s trojicí bateriových modulů, které obsahují N článků. Jde o modulární řešení, ke kterému lze paralelně připojovat další bateriové stacky, či jejich vnitřní strukturu obohacovat o dalších moduly. Základní principy jednotlivých řešení jsou ale stejné.

Na nejvýše umístěném bateriovém modulu s přilehlým LMU je vysvětlen konkrétní princip balancovacího a monitorovacího obvodu. V rámci přehlednosti jsou další LMU od těchto podrobností oproštěny. Vzhledem k obvodové složitosti jsou uvedeny u BMU pouze vstupní a výstupní informace. Rozsáhlejší konstrukce více BMU a nadřazeného BCU z důvodu rozsahu této práce není uváděna.



Obr. 3.1: Blokové schéma hardwaru systému bateriového managementu.

3.3.1 Spínací skříňka

O uživatelské řízení režimů chodu systému bateriového managementu se stará blok „Spínací skříňka“. Neslouží jako úplný vypínač, protože BMS musí být alespoň částečně aktivní i pokud je vozidlo zaparkované v depu delší dobu. Používáním „Spínací skříňky“ tak ideálně není možné přivodit systém do kritického, či jinak nestandardního stavu.

Po zasunutí klíčku jsou k dispozici dvě aktivní polohy. Poloha „Klíč ON/OFF“ představuje přivedení BMS do plnohodnotného chodu za normálních provozních podmínek. Všechny systémy tedy pracují, senzory jsou aktivní a BMU komunikuje s okolními systémy. Druhá aktivní poloha tohoto bloku, tedy „Režim Stand-by“, slouží pro zavedení BMU a jednotek LMU do úspornějšího režimu. I přes značné omezení činnosti celého BMS je nutné neustálé monitorování stavu baterií s případným balancováním.

Jednotlivé systémy BMS jsou tedy i nadále napájené z palubní baterie a připravené k případnému zásahu, pokud by se příslušný bateriový pack dostal do kritického stavu vlivem poruchy.

Dalším stavem, který ovšem není podmíněný funkcí spínací skříňky, je připojení externího nabíječe baterií, či třeba externí datové připojení pro konfiguraci a servisní úkony na BMS. [4]

3.3.2 Topení a chlazení bateriových modulů

Současné baterie s lithiovým základem nabízejí široké pracovní teploty, konkrétně v rozmezí -40°C až $+60^{\circ}\text{C}$, nicméně vlivem jejich činnosti a vnějších vlivů je nutné, aby systém BMS byl vybaven dostatečně dimenzovaným chlazením i topením, o což se starají bloky „Chlazení“ a „Topení“.

Blok „Topení“ bude hrát svoji roli zejména v zimních obdobích, či podmínkách vystavujících baterie teplotám okolo nebo pod bodem mrazu. Nízké teploty sice baterie ve větší míře přímo nepoškozují, zpomalují ale elektrochemické reakce uvnitř článků, což má za následek omezení výstupních proudů a snížení velikosti nabíjecích proudů. Způsobuje to především s teplotou rostoucí vnitřní odpor článků.

Blok „Chlazení“ je důležitý především při vysokém zatížení baterií vybíjecími proudy, při rychlém i delším nabíjení a také v letním období, kdy jsou bateriové packy vystavené velkým vnějším teplotám. Různá kombinace těchto vlivů totiž může přivést teplotu baterií mimo pracovní oblast, což by mohlo mít za následek nežádoucí zkrácení životnosti baterií, jak je popisováno v první kapitole.

Nároky na chlazení se dále mohou odvíjet od rychlosti nabíjení. Při standardním dobíjení vyžaduje BMS pouze přítomnost vzduchového chlazení. Jde o levnější a spolehlivější systém, který je ovšem nedostatečný v náročnějších podmínkách, nebo při rychlonabíjení. Zvýšením nabíjecích proudů se totiž ve větší míře projevuje vnitřní odpor článků, které pak produkují více tepla. Je tedy nutné využít sofistikovanější způsob chlazení, v našem případě chlazení kapalinou. Díky lepšímu rozvodu chladicího média je tento způsob efektivnější. [7, 13]

3.3.3 Ochranné prvky proti přetížení a kritickým stavům

Navržený bateriový systém obsahuje řadu ochranných prvků, které baterie odpojí od okolních systémů v případě poruchy či neočekávaného stavu. Jako základní ochrana slouží pojistka F_BS1, která v případě vnějšího zkratu a selhání ostatních ochranných prvků odpojí bateriový modul. Tato situace může nastat při zkratu na zátěži, nebo při poruše nabíječe. Ostatní ochranné prvky jsou spínače umožňující odpojení zátěže, nabíječe či bateriového packu. O odpojení zátěže, tedy zpravidla elektrického pohonu, se stará spínač SP_ZÁTĚŽ, zatímco odpojení nabíječe má na starost spínač SP_NABÍJEČ. Pro přímé odpojení celého bateriové stacku slouží spínač SP_BS1.

Spínání ochranných prvků řídí BMU na základě připojených LMU, měřících senzorů (ve schématu A_TRBS1, U_C) a povelů externích systémů. Pokud by návrh obsahoval více bateriových stacků, předpokládá se, že při poruše jednoho stacku dojde ke snížení kapacity bateriového packu, ale ne k úplnému zastavení vozidla.

3.3.4 Omezovač proudu

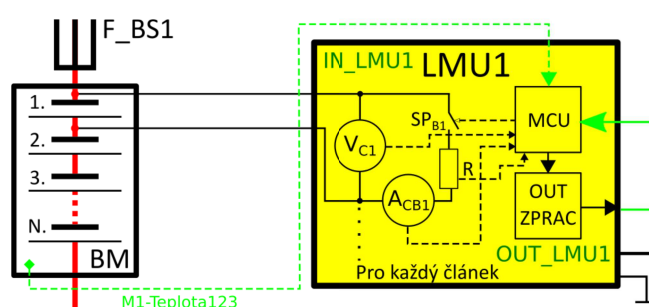
Dojde-li k přílišnému poklesu SoC, vydá BMU informaci dalším systémům, které svoji funkci aktuální kapacitě baterií mohou přizpůsobit a omezit vlastní spotřebu. V rámci bateriového systému jsou ovšem k dispozici omezovače proudu v podobě rychlých polovodičových pojistek, které nepotřebují externí řízení. Pokud by aplikace vyžadovala specifický druh řízeného proudového omezovače, je možné jej do systému zavést a pro jeho funkci využívat například Hallovu sondu pro měření proudu (zde A_TRBS1). V praxi se to ale nedělá. [7, 19]

3.3.5 Nabíječ

Blok „Nabíječ“ představuje externí zdroj energie pro dobíjení bateriového packu. V rámci systému bateriového managementu nevyžaduje komunikaci s BMU. K rozlišení vybíjení a nabíjení si vystačí BMU pouze s informací o směru proudu z proudové sondy, která měří trakční proud. Zde konkrétně A_TRBS1.

3.3.6 Možnosti balancování a monitorování

Detail bloku „LMU1“ představuje monitorovací a balancovací schopnost použitých sdružených LMU. Je možné měřit teplotu článků, teplotu bateriového modulu, napětí jednotlivých článků (blok VC1) a také balancovací proudy (blok ACB1), které se zpravidla neměří v plném rozsahu, nýbrž pouze jako indikace překročení nastavené hladiny. Všechny naměřené informace jsou zpracovány blokem „MCU“, který na základě naměřených hodnot a příkazů od BMU vyhodnocuje spouštění balancování. Navíc MCU měří teplotu balancovacích rezistorů. Z MCU dále putují data ke zpracování pro příslušný komunikační systém, v našem případě pro sběrnici CAN.



Obr. 3.2: Detail blokového schématu lokální monitorovací jednotky s balancerem připojené k bateriovému modulu.

Je využito pasivního balancování, z důvodu výhod uvedených ve 2. kapitole, přičemž pro jedno LMU je k dispozici výkonový rezistor pro každý článek zvlášť. Výkonové rezistory jsou samozřejmě chlazené a při příliš vysoké teplotě může MCU proces balancování dočasně pozastavit. [4]

3.3.7 Systém napájení

Napájení řídicích obvodů obstarává palubní baterie, jejíž napětí se dle aplikace pohybuje zpravidla na hodnotách 12 V a 24 V. Vzhledem k zacílení návrhu na bateriový autobus je uvažováno palubní napětí 24 V. Pro správnou funkčnost systému je nezbytné zajistit napájení řídicích systémů i bez zasunutého klíčku do spínací skříňky, tedy v době kdy je BMU a LMU v režimu stand-by. Použití sdružených LMU přináší jednodušší rozvod napájení pro jednotlivé LMU.

4 Vyhodnocovací algoritmy pro BMS

4.1 Provozní stavy

V předchozí kapitole navržený systém bateriového managementu vyžaduje ke svému chodu přednastavení mezních parametrů. Na základě těchto parametrů následně celý systém operuje v rámci trojice režimů indikujících aktuální stav baterií a jednotlivých částí systému. Každý z režimů představuje určitý soubor stavů a případných poruch systému, na jejichž základě provádí patřičné zásahy a případně informuje další systém vozidla.

4.1.1 Normální režim

Normální režim představuje stav systému, ve kterém celý systém pracuje korektně a bez poruch. Jednotlivé LMU tedy měří napětí, proudy, teploty a získaná data předávají BMU, která vyhodnocuje stav jednotlivých článků a vydává příkazy k případnému balancování na integrovaných balancerech v jednotkách LMU. BMU dále zpracovává a vyhodnocuje klíčové parametry, jako jsou SoC, SoH, či DoD, které následně distribuuje prostřednictvím externí CAN komunikace dalším systémům. V normálním režimu lze bateriový pack běžně vybíjet i nabíjet (včetně rekuperace) dle potřeby ostatních systémů.

4.1.2 Nouzový režim

Když jednotlivé parametry vybočují z úzkého pásma definovaného pro normální režim, je nutné přizpůsobit chování jednotlivých prvků systému. Komunikace prostřednictvím CAN sběrnice funguje jak pro interní komunikaci s jednotlivými prvky systému, tak i pro komunikaci s externími systémy. Dochází ovšem k méně závažným poruchám a neočekávaným stavům, mezi něž patří například výraznější rozbalancování jednotlivých článků v bateriových modulech. Na základě naměřených hodnot se provádí patřičné zákroky, jako například omezení vybíjecích, či nabíjecích proudů. V tomto režimu lze tedy omezeně bateriový pack vybíjet i nabíjet.

4.1.3 Poruchový režim

Pokud nevyhovují naměřené parametry systému normálnímu, ani nouzovému režimu, přepíná se bateriový management do poruchového režimu. V systému tedy nastaly závažnější poruchy, které vedou k odpojení celého bateriového packu od zbytku trakčního obvodu. Komunikace mezi BMU a jednotlivými LMU nemusí fungovat, a tak nelze bateriový pack ani nabíjet, ani vybíjet. Při nefunkční komunikaci nelze balancovat jednotlivé články a jednotlivé LMU jednotky přechází do pohotovostního stavu. BMU je ovšem stále aktivní a vyhodnocuje aktuální stav z dostupných informací. Pokud funguje externí komunikace, může předávat informace dalším řídicím systémům. [4]

4.1.4 Vstupní a výstupní proměnné

Následující tabulka obsahuje výčet všech proměnných veličin, které budou dále využívány při návrhu algoritmů pro vyhodnocování a obsluhu systému bateriového managementu. Každá z nich je úzce spjata s určitými prvky v blokovém schématu z předchozí kapitoly. V tabulce je popsán charakter každé proměnné, tedy zda-li se jedná o vstupní, či výstupní proměnnou veličinu. Dále pak její přiřazení k LMU, či BMU z důvodu zachování hierarchie celého systému a nakonec také priorita, přičemž číslo 4 znamená prioritu nejvyšší. Některé parametry jsou pro správný a bezpečný chod celého systému klíčové, a proto mají vyšší prioritu. Pokud se jedná pouze o informativní proměnné, při poruše je lze snadno vynechat z chodu systému.

Proměnná	Jednotka	Charakter	Priorita	Úloha
M1-V_C1	LMU	IN	4	Měření napětí jednotlivých článků
M1-Teplota123	LMU	IN	3	Měření teplot bateriového modulu
M1-TeplotaR1	LMU	IN	3	Měření teplot bateriového modulu
M1-A_CB1	LMU	IN	2	Měření balancovacího proudu
M1-SP_B1	LMU	OUT	2	Připnutí balancovacího rezistoru
101-B.řízení_LMU1	BMU	OUT	3	Řízení balancování LMU
111-Data_LMU1	BMU	IN	4	Informace o napětí, teplotách, balancování od LMU
001-Teplota_BS1	BMU	IN	2	Měření teploty bateriového stacku
002-Odpoj_BS1	BMU	OUT	4	Odpojení/Připojení bateriového stacku
003-Chlazení_BS1	BMU	OUT	3	Zapni/Vypni chlazení bateriového stacku
004-Topení_BS1	BMU	OUT	3	Zapni/Vypni topení bateriového stacku
005-TrakčníIMěř_BS1	BMU	IN	4	Měření výstupního proudu bateriového stacku
006-Ucelk_BS1	BMU	IN	2	Měření celkového napětí bateriového stacku
C00-Standby	BMU	IN	2	Informace o stavu spínací skříňky – výchozí hodnota
C01-Bmu_Run	BMU	IN	2	Aktivace plného chodu BMU klíčkem
C10-MotorOmez	BMU	OUT	4	Omezení výstupního proudu
C11-SpínačMotor	BMU	OUT	4	Odpojení zátěže od baterií
C12-SpínačNabíječka	BMU	OUT	4	Odpojení nabíječe od baterií
I/O_EXTERNÍ	BMU	IN/OUT	2	Komunikace s dalšími systémy vozidla

Tab. 4.1: Seznam proměnných používaných ve vyhodnocovacích algoritmech a v blokovém schématu.

4.2 Provozní parametry a jejich nastavení

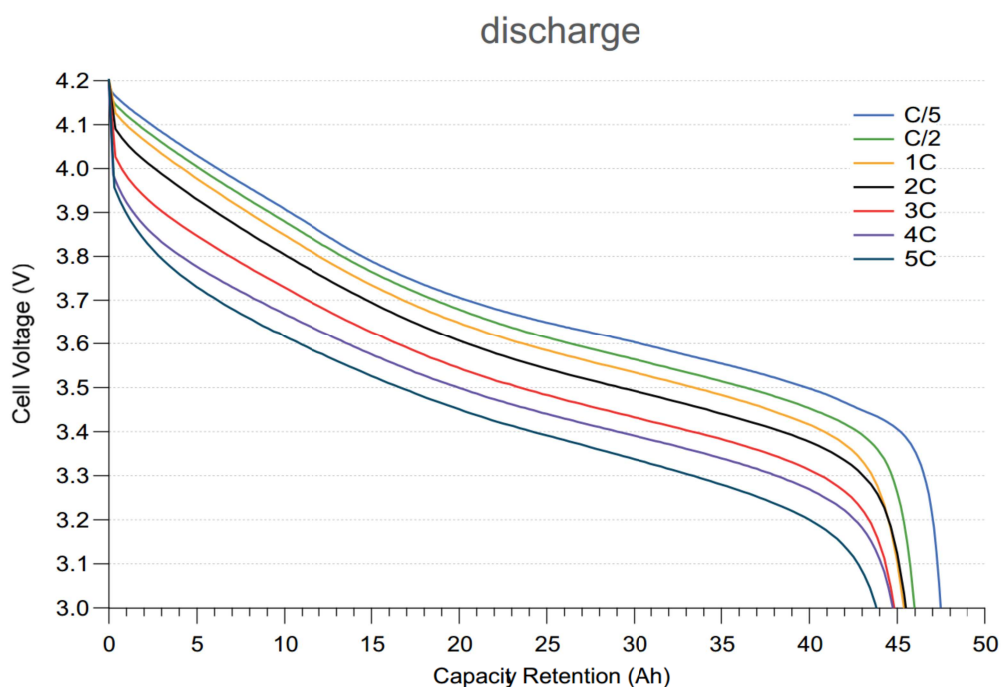
Jak je již avizováno na začátku této kapitoly, pro správný chod celého systému je nutné přednastavit rozsahy a hodnoty jednotlivých klíčových parametrů, dle kterých systém vyhodnocuje jednak aktuální režim chodu, jednak případné poruchy. Provozní parametry jsou navrženy pro systém s instalovanými lithiovými bateriemi NMC, konkrétně výrobce Leclanché. Jedná se o baterie LecCell G/NMC 43Ah/160Wh.

4.2.1 Parametry baterií LecCell G/NMC

- Jmenovitá kapacita – 43 Ah
- Měrná energie – 160 Wh/kg
- Jmenovité napětí – 3,65 V
- Pracovní napětí – 3,0 V až 4,2 V
- Pracovní teploty:
 - nabíjení: 0°C až +45°C
 - vybíjení: -20°C až +55°C
- Nabíjecí proudy:
 - doporučený: 43 A (1C)

- maximální: 86 A (2C)
- Vybíjecí proudy:
 - doporučený: 43 A (1C)
 - maximální: 129 A (3C) / po dobu 30 sekund až 4,5 C
- Životnost – 4500 cyklů / 10 let (100% DoD)

Dalším z důležitých parametrů při vyhodnocování různých stavů systému je také nabíjecí a vybíjecí charakteristika, kterou udává výrobce baterií. Na jejím základě je možné vysledovat průběh napětí v závislosti na zbývající kapacitě baterií. Díky tomu lze následně určit, jaká bude k dispozici zbývající kapacita při určitém napětí. [13]



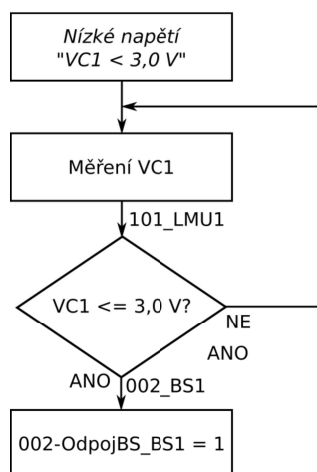
Obr. 4.1: Charakteristika vybití baterií LecCell G/NMC při různých vybíjecích prouděch. [13]

4.2.2 Nízké napětí

Přestože BMU dostává informaci o napětí celého systému prostřednictvím signálu 006-UCelk_BS1, pro vyhodnocování nízkého napětí je nutné vycházet z přesnějších údajů naměřených jednotlivými sdruženými LMU. Algoritmy vycházejí z rozkreslené LMU 1, kde je měřeno napětí na prvním článku – VC1. Výrobce pro zvolený typ baterií udává napěťový rozsah 3,0 až 4,2 V, což znamená, že při vybíjení nikdy nesmí hodnota napětí článků klesnout pod zmíněné 3 V.

Přestože se lithiové baterie vyznačují nízkým poklesem napětí v celém rozsahu vybíjecí charakteristiky, využívá se jeho strmějšího poklesu, když se DoD blíží k 80%, respektive 100% v závislosti na požadované životnosti baterií. Navíc je měřené napětí článků jedním z parametrů nezbytným pro vyhodnocování SoC a dalších parametrů.

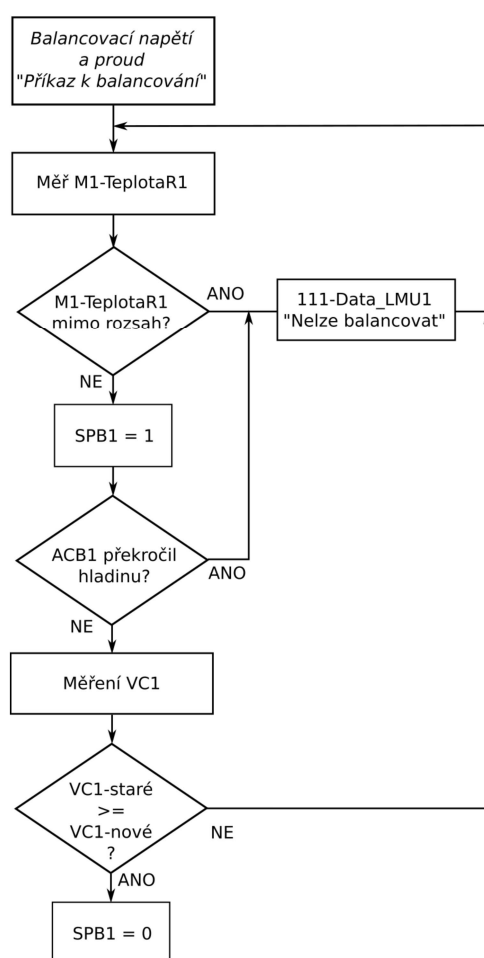
Dojde-li k poklesu mimo dovolený rozsah napětí, je nutné provést patřičný zásah, nejčastěji odpojením bateriového stacku spínačem SP_BS1, což je zajištěno prostřednictvím signálu 002-OdpojBS_BS1. [4, 7]



Obr. 4.2: Vývojový diagram pro vyhodnocování nízkého napětí na jednotlivých článcích.

4.2.3 Balancovací napětí a proud

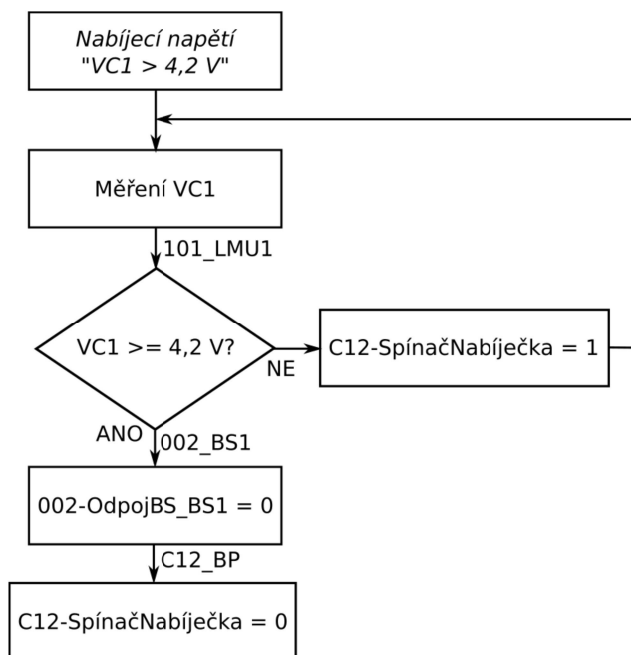
Pro snazší výklad jsou uvedeny algoritmy pro obsluhu LMU1, který je v blokovém schématu podrobně rozkreslen. LMU měří napětí každého článku a informaci dále předává BMU. Pokud BMU vydá patřičný příkaz pro balancování, dojde k sepnutí spínače SPB1 signálem M1-SP_B1, který připojí balancovací rezistor k danému článku. LMU snímá jednak teplotu balancovacího rezistoru, jednak překročení hladiny balancovacího proudu ACB1. Dojde-li k překročení proudu (signál M1-ACB1), nebo přehřívání rezistoru (signál M1-TeploR1), LMU spínač SPB1 odepne. Po celou dobu balancování je neustále měřeno napětí a pokud napětí článku klesne na stanovenou mez, spínač SPB1 je opět odepnut.



Obr. 4.3: Vývojový diagram pro řízení a vyhodnocování balancovacího procesu.

4.2.4 Nabíjecí napětí

Zatímco při vybíjení je nutné řešit minimální hodnotu napětí v povoleném rozsahu, při nabíjení je klíčovým parametrem maximální povolená hodnota napětí na bateriovém stacku, respektive přesněji na jednotlivých člancích. Výrobce vybraných baterií stanovil maximální napětí na 4,2 V, a tedy je nutné při jeho překročení odpojit nabíječ od bateriové packu spínačem SP_NABÍJEČ, který je řízen signálem C12-SpínačNabíječka.



Obr. 4.4: Vývojový diagram pro řešení vyššího, než-li povoleného nabíjecího napětí.

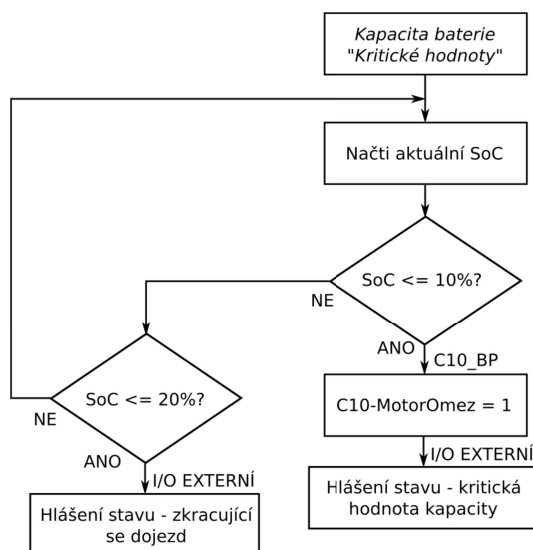
4.2.5 Kapacita baterie a kritická úroveň vybití

Na základě kapacity baterie je vyhodnocována řada parametrů a jde tedy o klíčový parametr. Aktuální kapacitě odpovídá především parametr SoC, respektive DoD. Obě tyto veličiny jsou BMU přepočítávány z řady naměřených parametrů, přičemž pro další výpočty má BMU k dispozici jedno konkrétní číslo, díky kterému může vyhodnocovat dojezd, či údaje pro omezení výstupních proudů.

Na rozdíl od měření napětí zohledňuje SoC více parametrů dohromady, a tak v závislosti na použitých výpočetních algoritmech podává přesnější informace o zbývající energii v bateriích. Například při 20% SoC BMU vyhodnotí blížící se vybití baterií a informuje tedy obsluhu o zkráceném dojezdu. Pomocí modulu I/O EXTERNÍ předá informaci ostatním systémům vozidla a do bloku Hlášení stavu (kontrolky). Na palubní

desce se obsluze rozsvítí kontrolka, podobně jako je tomu v případě spalovacích vozidel, a indikace využití rezervy paliva. Při 10% SoC je navíc možné signálem C10-MotorOmez omezit výstupní proud z baterií. Dojde-li na kritickou hodnotu SoC v jednotkách procent, může dojít k úplnému odpojení baterií od zátěže spínačem SP_ZÁTĚŽ, respektive signálem C11-SpínačMotor.

Také při nabíjení má vyhodnocování kapacity baterie své místo. Pokud se totiž SoC pohybuje v rozmezí 85% až 100 %, BMS by nemělo povolit rychlé nabíjení vysokými proudy a často ani rekuperaci. Došlo by totiž ke zbytečnému přetěžování baterií s možným následkem v podobě zkracování životnosti. Není tedy možná ani plná rekuperace, a tak je nadbytečná energie odváděna do odporů, neboť plně nabitá baterie již nepojmou více energie.



Obr. 4.5: Vývojový diagram indikace nízké hodnoty SoC.

4.2.6 Detekce životnosti baterie

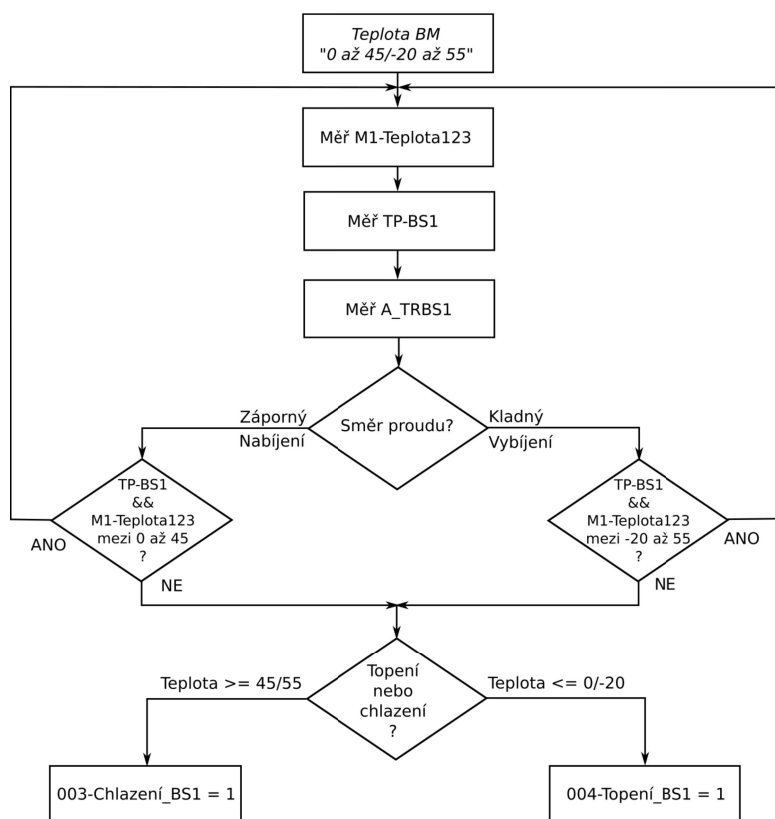
Detekce životnosti baterií vychází z vyhodnocování SoH. Lze tedy využít jednak měření aktuálního vnitřního odporu s následným srovnáním s vnitřním odporem nové baterie. Další možností je spíše orientační vyhodnocení SoH dle následujícího vztahu:

$$SoH = \left(1 - \frac{\text{Aktuální cyklus}}{\text{Předepsané množství cyklů do konce životnosti}}\right) * 100 \quad (4.1)$$

Životnost baterie pak bude zobrazena uživateli, respektive vypočtená hodnota bude prostřednictvím I/O EXTERNÍ předána do bloku Hlášení stavu (kontrolky). Úkolem tohoto parametru je ukázat obsluze, jaký aktuální nájezd dané baterie mají. Na základě toho je možné provádět údržbu, či plánovat výměnu. [7, 4]

4.2.7 Teplota BM

Problematiku teplot bateriových modulů je nezbytné rozdělit do dvojice režimů – nabíjení a vybíjení. Na základě toho se totiž mění rozsah operačních teplot. Výrobce u zvolených baterií uvádí rozsah teplot 0°C až 45°C, pokud je baterie nabíjena. V opačném případě je možné baterie provozovat v rozsahu -20°C až 55°C. Rozlišení režimu lze provést na základě polarity trakčního proudu, který je měřen sondou A_TRBS1. V závislosti na teplotě je následně zapínáno topení, případně chlazení v rámci celých bateriových stacků. Měření teploty je prováděno v bateriových modulech a je představeno proměnnou M1-Teplota123. BMU hlídá také teplotu celého bateriového stacku měřením na senzoru TP_BS1, který do BMU posílá informace prostřednictvím proměnné 001-Teplota_BS1. [7, 13, 20]



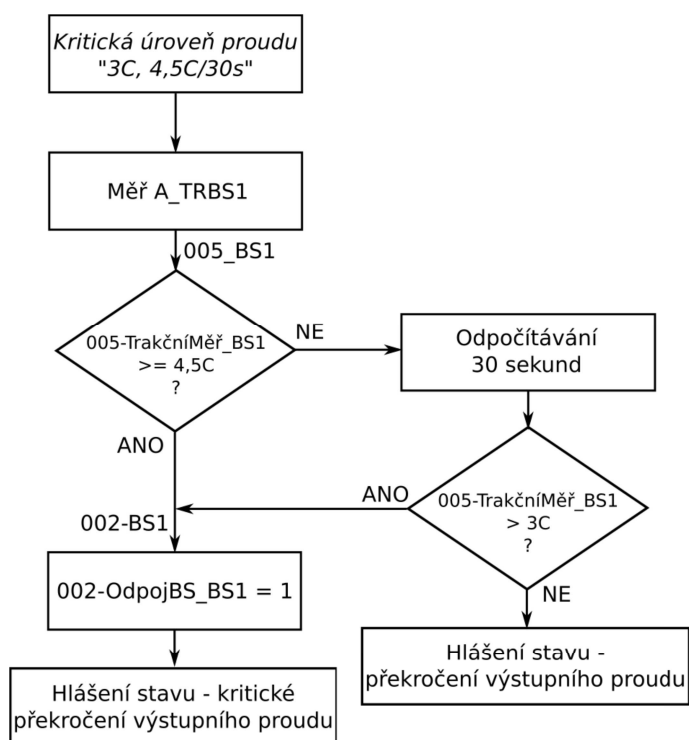
Obr. 4.6: Vývojový diagram vyhodnocování teplotních poměrů v rámci bateriových stacků

Blíží-li se teplota k 0°C , respektive k -20°C , vyšle BMU signál 004-Topení_BS1, který zajistí sepnutí topení celého bateriového stacku.

Pokud se naopak teplota přibližuje k hodnotám 45°C , respektive 55°C , je nutné zapnout chlazení celého bateriového stacku, což se provede přivedením signálu 003-Chlazení_BS1.

4.2.8 Kritická úroveň proudu

Vybíjecí proud je další aspekt ovlivňující životnost baterií. Výrobce doporučenu hodnotou zvolených baterií je 43 A (1C), nicméně baterie mohou poskytnout maximálně 3C, respektive 4,5 C po dobu 30 sekund. Kritická úroveň proudu může nastat při extrémní zátěži elektrického pohonu nebo při neočekávané poruše. Základní ochranu zajišťuje neřízený proudový omezovač popsany v minulé kapitole společně s pojistkou. Řízené odpojení je možné na základě trakčního proudu změřeného sondou A_TRBS1, která posílá informaci na vstup 005-TrakčníMěř_BS1. Pokud je proud mimo stanovený rozsah je možno signálem C11-SpínačMotor odpojit zátěž od baterií.



Obr. 4.7: Vývojový diagram pro omezení maximální kritické úrovně trakčního proudu.

Závěr

Cílem práce byl, vedle rešerše aktuálně dostupných trakčních baterií, blokový návrh hardwaru systému bateriového managementu doplněný o vyhodnocovací algoritmy možných kritických stavů celého systému s bateriemi Leclanché LeCell G/NMC 43Ah/160Wh. Výsledkem je škálovatelný systém bateriového managementu v podobě blokového schématu, který je v rámci názornosti složený z jednoho bateriového packu obsahujícího jediný bateriový stack s trojicí bateriových modulů. Navržené algoritmy řeší nejdůležitější kritické stavy celého systému a použité proměnné obsahují indexaci pro možnost systém rozšiřovat.

Na základě konzultace byl zvolen konkrétní typ baterií NMC od švýcarského výrobce Leclanché. Zvolené baterie jsou perspektivní pro trakční použití, neboť oproti dalším možným kandidátům nabízejí lepší klíčové parametry. Zejména jde o vysokou hustotu energie (až 220 Wh/kg) společně s dlouhou životností (4500 cyklů při 100% DoD, respektive 8000 cyklů při 80% DoD). Jistá univerzalita systému ovšem dovoluje aplikaci více typů baterií s lithiovým základem, jejichž elementární vlastnosti se vzájemně do jisté míry přibližují.

Určitým problémem při návrhu systému bateriového managementu bylo řešení interní komunikace prostřednictvím sběrnice CAN, která je pro toto použití vhodná. Nicméně na základě konzultací nejde v praxi o zcela běžné řešení, přestože touto cestou vývoj směřuje. Také navržený omezovač proudu je z praktického hlediska nadbytečný, ale pro názornost a pochopení problematiky je jeho umístění do blokového schématu vhodné.

Pro celkový návrh bateriového managementu je klíčový parametr SoC, který je sice v práci principiálně vysvětlen, ale z důvodu neexistujících obecných vztahů pro výpočet mu není věnován širší prostor. Jednotlivé postupy jsou navíc často obchodním tajemstvím výrobců jednotlivých řešení bateriového managementu.

Problematika systémů bateriového managementu je co do hloubky řešení velice rozsáhlá, a tak bylo nutné k samotnému řešení přistupovat na základě dostupného rozsahu bakalářské práce. Některé prvky bylo potřeba vyškrtnout, nebo se o nich zmínit pouze

okrajově. Do budoucna lze jednotlivým blokům hardwaru, nebo jednotlivým vyhodnocovacím algoritmům věnovat podstatně více prostoru. Nutné bude širší studium a definice zmiňovaných algoritmů pro zjištění SoC.

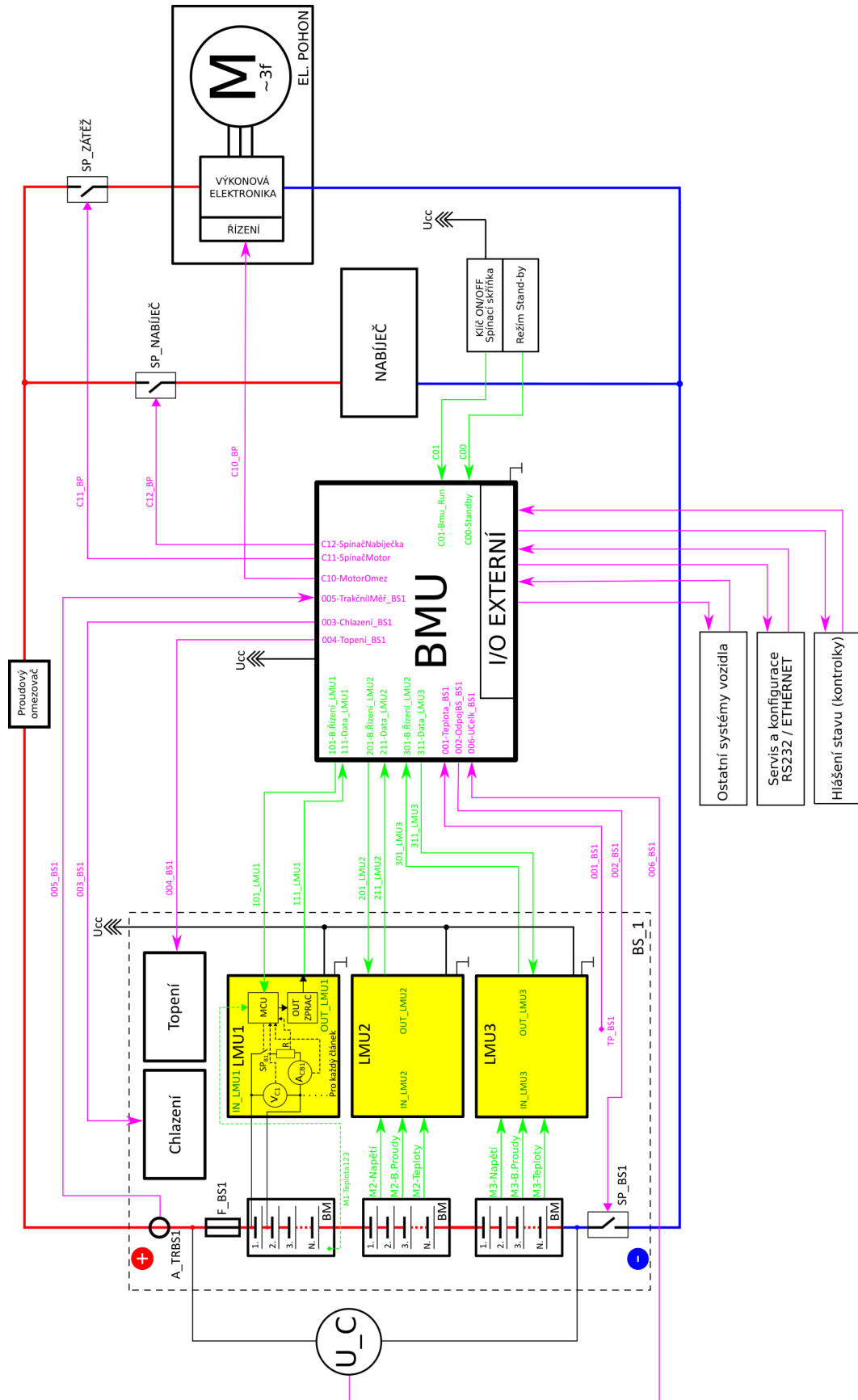
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] FLAJTINGR, Jiří a Lumír KULE. *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 80-7043-354-X
- [2] FLAJTINGR, Jiří a kol.: *Bateriové vozy - Technicko-ekonomická studie*. Firemní dokumentace ŠKODA
- [3] FLAJTINGR, Jiří a kol.: *Řešení problematiky optimálního pracovního bodu a energetických toků sériového hybridu s trakčními bateriemi a superkapacitory*. Firemní dokumentace ŠKODA
- [4] FLAJTINGR, Jiří a kol.: *Projekční dokumentace elektrovýzbroje sériového hybridního busu*. Firemní dokumentace ŠKODA
- [5] FLAJTINGR, Jiří a kol.: *Simulace vozidla se sériovou koncepcí vybaveného trakčními bateriemi a superkapacitory*. Firemní dokumentace ŠKODA
- [6] FLAJTINGR, Jiří a kol.: *Components of electrical equipment for the battery tram*. Firemní dokumentace ŠKODA
- [7] ANDREA, Davide. *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston: Artech House, c2010. ISBN 978-1-60807-104-3
- [8] POP, Valer. *Battery management systems: accurate state-of-charge indication for battery powered applications*. Dordrecht: Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-6945-1
- [9] FABIO CODECÀ, Pierfrancesco Spagnol. *Lithium-ion batteries for electric vehicles: characterization, modeling, state-of-charge estimation and disequalization phenomena*. Saarbrücken, Germany: VDM Verlag, 2010. ISBN 978-3-639-29463-7
- [10] EDITED BY KATERINA E. AIFANTIS, STEPHEN A. HACKNEY, R. VASANT KUMAR., edited by Katerina E. Aifantis, Stephen A. Hackney, R. Vasant Kumar. *High energy density lithium batteries materials, engineering, applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. ISBN 978-3-527-63001-1
- [11] SCHWARZ, Jaroslav. *Dimenzování trakčních baterií pro vozidla MHD*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie
- [12] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 1. vyd. Plzeň, 1996. Skriptum. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická
- [13] LecCell G/NMC 43Ah/160Wh 946A01, Leclanché
- [14] ZEBRA SoNick Battery Type Z5, FZ SONICK
- [15] 24 V 60 Ah NANO LITHIUM-TITANATE BATTERY, altairnano

- [16] Languang, Lu. *LiFePO₄ battery performances testing and analyzing for BMS* [Internet]. Beijing (Čína): Tsinghua University; 2011 [citace 2016-03-07]. 36 s. Dostupné z: [http://www.cse.anl.gov/us-china-workshop-2011/pdfs/batteries/LiFePO₄%20battery%20performances%20testing%20for%20BMS.pdf](http://www.cse.anl.gov/us-china-workshop-2011/pdfs/batteries/LiFePO4%20battery%20performances%20testing%20for%20BMS.pdf)
- [17] LITHIUM BALANCE Scalable Battery Management System (s-BMS v6) Data sheet, LITHIUM BALANCE A/S
- [18] Kolb, Cynthia. *Electrochemical differences of Altairnano's nLTO*. Anderson, Indiana (USA): Altairnano; 2013
- [19] Poznar T., Collins R., Canada M., Patterson M., Hamilton B., Istre J., Nema J., Silk B., Hartzog Ch., Frossard M., Wiles B. *ENERDEL Lithium-Ion Battery System Training 22-26 September 2014*. Greenfield (USA): EneDel Technical Centre; 2014. 564 s.
- [20] *BU-410: Charging at High and Low Temperatures* [online]. Richmond (Kanada): Cadex Electronics Inc., 2016 [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures
- [21] *BU-808b: What causes Li-ion to die?* [online]. Richmond (Kanada): Cadex Electronics Inc., 2015 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_808b_what_causes_li_ion_to_die
- [22] *State of Health (SOH) Determination* [online]. Chester (United Kingdom): Woodbank Communications Ltd., 2005 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/soh.htm>
- [23] *Stav nabíť (SOC)* [online]. Slaný (Česká republika): BATTEX, spol. s r. o., 2016 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.battex.info/?p=slovnicek-a-pojmy&id=567>
- [24] *Zebra Batteries* [online]. Chester (United Kingdom): Woodbank Communications Ltd., 2015 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/zebra.htm>
- [25] *Ultracapacitor & Supercapacitor Frequently Asked Questions* [online]. San Diego (USA): Tecate Group, 2015 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <https://www.tecategroup.com/ultracapacitors-supercapacitors/ultracapacitor-FAQ.php>
- [26] *BU-802b: What does Elevated Self-discharge Do?* [online]. Richmond (Kanada): Cadex Electronics Inc., 2016 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge
- [27] *Napětí akumulátoru* [online]. Slaný (Česká republika): BATTEX, spol. s r. o., 2016 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/nap%C4%9Bt%C3%AD+akumul%C3%A1toru>
- [28] *Bateriové separátory* [online]. Liberec: Elmarco s.r.o., 2015 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/aplikace/bateriove-separatory/>
- [29] *ZEBRA High-Energy Battery* [online]. Längenbold (Švýcarsko): Woodbank Communications Ltd., 2015 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.solartaxi.com/technology/zebra-battery/>

Přílohy

Příloha A – Kompletní blokové schéma BMS



Příloha B – Kompletní vývojový diagram pro vyhodnocování BMS

