

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

System řízení Li-ion baterie

Autor práce: Bc. Michal Rod
Vedoucí práce: Ing. Luboš Streit

2014

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem systému řízení toku energie baterií pro konkrétní aplikaci za využití microcontrolleru STM32F4 Discovery. Stanovením parametrů datové komunikace s ostatními procesory daného zařízení pomocí sběrnice CAN a měřícími členy umístěnými na jednotlivých Li-ion bateriích komunikující na sběrnici RS485. Automatickým ovládním nabíječky bateriového bloku, kontrolou a ukládáním komunikačních dat ze sběrnice CAN na záznamové zařízení. Stanovením vhodných komponent pro realizaci BMS jednotky a souhrnným přehledem druhů Li-ion baterií.

Klíčová slova

Systém řízení baterie, LiFePO₄, Li-ion baterie, matematický model baterie, nabíjecí charakteristika baterie, vybíjecí charakteristika baterie.

Abstract

This diploma thesis deals with issue of the design of the management system of energy flow battery for a specific application using a microcontroller STM32F4 Discovery. By setting data communication with other processors of the device with a CAN bus and measuring individual members placed on each Li-ion batteries communicating on the bus RS485. Automatic control charger battery pack, control and storage of communications data from the CAN bus to a recording device. By setting the appropriate components for the implementation of BMS unit and summary kinds of Li-ion batteries.

Key words

Battery management system, LiFePO₄, Li-ion battery, the mathematical model of the battery, battery charging characteristics, battery discharge characteristics.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 17.5.2014

Michal Rod

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Luboši Streitovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	10
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	12
1 LI-ION BATERIE	13
1.1 KRÁTCE K HISTORII LI-ION BATERÍ.....	13
1.2 LITHIUM IONTOVÉ ČLÁNKY	14
1.3 DRUHY LI-ION BATERÍ.....	15
1.3.1 Lithium oxidu kobaltu ($LiCoO_2$).....	16
1.3.2 Lithium oxidu manganu ($LiMn_2O_4$).....	17
1.3.3 Lithium nikl oxid manganu kobaltu ($LiNiMnCoO_2$).....	18
1.3.4 Lithium nikl kobalt oxid hlinitý ($LiNiCoAlO_2$).....	18
1.3.5 Lithium oxid titaničitý ($Li_4Ti_5O_{12}$).....	19
1.3.6 Přehled typů baterií	20
2 LITHIUM ŽELEZO FOSFÁT (LIFEPO₄)	21
2.1 VÝVOJ TECHNOLOGIE LFP BATERÍ	21
2.2 BEZPEČNOST LFP BATERÍ.....	22
2.3 VÝHODY A NEVÝHODY LI-FOSFÁT.....	23
2.4 SPECIFIKACE LiFePO ₄	24
2.5 VYUŽITÍ BATERÍ LFP.....	24
3 NOVÁ TECHNOLOGIE LI-S	26
4 SYSTÉM ŘÍZENÍ BATERIE	27
4.1 NÁVRH BMS PRO KONKRÉTNÍ APLIKACI	28
4.2 MĚŘENÍ FYZIKÁLNÍCH VELIČIN PRO BMS.....	29
4.2.1 Měření napětí a teploty.....	29
4.2.2 Měření proudu	29
5 NÁVRH MĚŘÍCÍCH A ŘÍDÍCÍCH OBVODŮ BMS	30
5.1 SPECIFIKACE $\mu P3$ – BMS A DATALOGING.....	32
5.2 VOLBA HARDWAROVÝCH KOMPONENT.....	33
5.2.1 Konektory pro datovou komunikaci.....	34
5.2.2 Dobíjecí konektor.....	35
5.2.3 Řídící mikrokontrolér.....	36
5.2.4 CAN Driver.....	38
5.2.5 RS485 Driver	39
5.2.6 Čidlo proudu.....	40

6	NÁVRH SOFTWAREVÉHO ŘEŠENÍ BMS	41
6.1	PŘEHLED KOMUNIKACÍ BMS A JEJICH PARAMETRY	41
6.1.1	<i>Komunikační protokol RS-485</i>	41
6.1.2	<i>Komunikační protokol CAN</i>	44
6.1.3	<i>Komunikace s nabíječkou</i>	46
6.2	ZJEDNODUŠENÝ MATEMATICKÝ MODEL BATERIE	47
6.3	ADAPTACE MODELU BATERIE	49
7	ZÁVĚR.....	50
	POUŽITÁ LITERATURA.....	51
	PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratk

BMS	-	Battery manager system
LiFePO ₄	-	Druh baterie
Li-ion	-	Typ baterie
NiCd	-	Typ baterie
LCO	-	Druh baterie
LMO	-	Druh baterie
LFP	-	Druh baterie
NMC	-	Druh baterie
NCA	-	Druh baterie
LTO	-	Druh baterie
DOD	-	Hloubka vybití
Li-S	-	Druh baterie
LAN	-	Datová komunikační síť
CAN	-	Komunikační sběrnice
RS485	-	Komunikační sběrnice
SOC	-	Stav nabití baterie
μP	-	Mikropočítač
ADC	-	Převodník analogového signálu na digitální
SD	-	Označení záznamového zařízení
USB	-	Komunikační sběrnice
LED	-	Označení druhu svítidla
RJ45	-	Konektor pro LAN

Seznam obrázků a grafů

<i>Název obrázku/grafu</i>		<i>Číslo</i>	<i>Strana</i>
Struktura Li-kobalt	-	1.1	16
Šestiúhelník vlastností Li-kobalt	-	1.2	16
Struktura Li-mangan	-	1.3	17
Šestiúhelník vlastností Li-mangan	-	1.4	17
Šestiúhelník vlastností NMC	-	1.5	18
Šestiúhelník vlastností NCA	-	1.6	19
Šestiúhelník vlastností Li-titan	-	1.7	19
Přehled energetické hustoty baterií	-	1.8	20
Šestiúhelník vlastností Li-fosfát	-	2.1	22
Orientační model struktury LiFePo ₄	-	2.2	25
Porovnání Li-S s ostatními druhy baterií	-	3.1	26
Hlavní části BMS	-	4.1	28
Čidlo proudu LEM HTFS 400-P	-	4.2	29
Blokové schéma motokáry	-	5.1	30
Rozložený konektor Superseal 1,5	-	5.2	34
Konektor REMA pro dobíjení	-	5.3	35
STM32F4 Discovery	-	5.4	37
Architektura STM32F4	-	5.5	37
STM32F4DIS-BB	-	5.6	37
Blokové schéma ADM3053	-	5.7	38
Blokové schéma ADM2687E	-	5.8	39
Hallův generátor	-	5.9	40
Zapojení čidla LEM HTFS 400 P	-	5.10	40
Blokové schéma ovládání nabíječky	-	6.1	46
Blokové schéma matematického modelu baterie	-	6.2	48

Seznam tabulek

<i>Název tabulky</i>		<i>Číslo</i>	<i>Strana</i>
Souhrn druhů Li-ion baterií	-	1.1	15
Tabulka zvolených adres	-	6.1	41
Struktura odesílaného paketu	-	6.2	42
Proměnné a jejich význam v odesílaném paketu	-	6.3	42
Struktura přijímaného paketu	-	6.4	43
Proměnné a jejich význam v přijímaném paketu	-	6.5	43
Formáty přijímaných hodnot	-	6.6	43
Datový rámec CAN 2.0A	-	6.7	44
Identifikátory jednotlivých jednotek pro CAN	-	6.8	44
Proměnné a jejich význam v odesílaném paketu	-	6.9	45

Úvod

Tato práce se zabývá návrhem systému řízení toku energie baterií pro pohon elektrické motokáry.

Jádrem celé aplikace se pro své technické parametry a s ohledem na pořizovací náklady stal microcontroller STM32F4 Discovery, člen rodiny procesorů využívaných v mnoha moderních zařízeních, jako například v mobilních telefonech či tabletech. Pro tuto konkrétní aplikaci je vybraný microcontroller značně naddimenzovaný, ale to s ohledem na možnost budoucího rozšíření funkčnosti a požadovaných schopností řídicí jednotky, která dále umožní přejímání některých funkcí ostatních slabších procesorů systému, respektive poskytnutí svého výpočetního výkonu, bude-li to potřeba, je vhodné.

Dále se práce zabývá návrhem technického řešení BMS systému, jak z hlediska hardwarového, tak i softwarového. Možnostmi realizace a hledáním nejvhodnějšího uspořádání řídicí jednotky elektrické motokáry potažmo elektromobilu. Souhrnem komunikačních protokolů a jejich parametrů pro účely BMS.

V první části práce je vytvořen přehled druhů Li-ion baterií s jejich základními parametry, vyzdvižením výhod daného typu baterie a nastíněním chemické a fyzikální podstaty těchto baterií. Závěrem této části je zmínka o novém typu baterie, Li-S, který má s výhledem do budoucna slibné vlastnosti.

1 Li-ion baterie

Lithiové články patří do skupiny elektrochemických zdrojů, jejichž principem je přeměna energie vzniklé chemickou reakcí na energii elektrickou bez mezistupně, která se uvolňuje ve formě stejnosměrného elektrického proudu. K této reakci dochází v galvanických článkách, ty jsou tvořeny dvěma elektrodami a elektrolytem na ně působícím, nazývají se primární elektrochemický zdroj. Napětí jednotlivých článků se pohybuje od 0,5V do 4V, pro získání většího napětí jsou jednotlivé články řazeny do série, jejich spojením vzniká galvanická baterie.

Základní dělení galvanických článků, dle druhu elektrolytu:

- *Suché*
- *Mokrý*
- *Nálevné*

[1]

1.1 Krátce k historii Li-ion baterií

Vznik samotných baterií je datován dávno před vynálezem dobíjecí baterie, o který se zasloužil francouzský fyzik Gaston Planté v roce 1859, tato baterie byla olověná a její princip se zachoval dodnes. Zásadním zlomem byl vynález nikl-kadmiové baterie (NiCd), i když to tak z počátku nevypadalo a první modely se setkávaly s velkými obtížemi. Tento průlom patří Waldemaru Jungnerovi ze Švédska. Okolo roku 1990 se začal stupňovat tlak ohledu na životní prostředí vzhledem k likvidaci nikl-kadmiových baterií, vznikají baterie nikl-metal-hydridové (NiMH) a ty dávají základ vývoji lithium-iontových baterií. V roce 1991 uvedla společnost SONY (Japonsko) na trh lithium-iontové baterie pro komerční využití. O pět let později uvádí na trh společnost Moli Energy z Kanady li-ion s manganou katodou (LiMn_2O_4). Od roku 1996 probíhá vývoj Li-fosfátu (LiFePO_4) na University of Texas (USA) a o její výrazné zlepšení se zaslouhuje University of Montreal v roce 2002.

1.2 Lithium iontové články

Lithiové napájecí články jsou v současné době velmi využívaným zdrojem stejnosměrného proudu. Na rozdíl od Alkalických článků jsou dobíjecí, je tedy možné obnovit množství reaktantů účastnících se chemické reakce a tím obnovit kapacitu článku na původní hodnotu. Baterie, které jsou schopny absorbovat energii stejnosměrného elektrického proudu, se nazývají akumulátorové baterie a jedná se o sekundární elektrochemický zdroj. S možností dobíjení baterií se zavádí pojem *nabíjecí cyklus*, který se skládá z vybití a opětovného nabití článku, resp. baterie na původní hodnotu kapacity. Četnost nabíjecích cyklů určuje ze strany výrobce jednotlivých baterií garanci udržení původních elektrických parametrů v příslušné toleranci udané výrobcem. Na straně uživatele slouží tento údaj k určení životnosti a možného opotřebení baterie.

V případě zanedbání materiálových vad, nebo vad článků vzniklých během výroby, je důležitým faktorem určujícím životnost baterie míra vybití, resp. přebíjení, dojde-li k úplnému vyčerpání energie baterie, dojde k zániku chemické reakce v jednotlivých člancích a tato takto zaniklá reakce je neobnovitelná.

Přebíjením jednotlivých článků v baterii, se články přehřívají a dochází k degradaci materiálu, ze kterého jsou konstruovány, u některých typů baterií i k poklesu napětí. V příštích dobíjecích cyklech pak není možné do článku naakumulovat původní množství energie a vlastní nadměrné přehřátí ohrožuje okolí baterie jejím roztavením, nebo možností vzniku požáru.

Jev vznikající opakovaným vybitím NiCd akumulátorů na malou, vždy stejnou hloubku vybití se nazývá paměťový efekt, tento jev nastává po cca 50 – 100 vybíjecích cyklech. Podstatou paměťového efektu jsou změny krystalické struktury záporné elektrody a jeho projevem je tzv. druhý vybíjecí stupeň, který se projevuje poklesem napětí při vybití, na tomto stupni nedochází k poklesu kapacity článku. Jedná se o reverzibilní jev, který je možné odstranit hlubokým vybitím článku a vyskytuje se pouze u akumulátorů, kde je kadmium elektrochemicky aktivní složkou záporné elektrody.

[4]

1.3 Druhy Li-ion baterií

Přes to, že je na trhu mnoho Li-ion baterií nejedná se o jeden stejný druh, jak by se mohlo na první pohled jevit. Lithium iontové baterie se nejčastěji dělí podle aplikovaného materiálu katody. To je na první pohled patrné z názvů jednotlivých typů baterií, které jsou nejčastěji pojmenovány chemickým názvem použitého materiálu. Mezi nejvíce rozšířené druhy Li-ion baterií patří články na bázi kobaltu, které jsou díky své vysoké měrné kapacitě rozšířeny v mobilní elektronice jako např. v mobilních telefonech, notebookách, fotoaparátech a tabletech. Druhým, jistě ne méně rozšířeným materiálem článků je mangan. Tyto články disponují velkou bezpečností a vysokou kapacitou, která je ale nižší než u baterií s kobaltem. Dále disponují vysokým měrným výkonem a dlouhou životností, zejména kvůli těmto vlastnostem jsou užívány v energeticky náročnějších zařízeních jako např. elektrické nářadí, elektrická jízdní kola, UPS systémy a v lékařství. V následující tabulce jsou pro úplnost zahrnuty i NCA a LTO baterie, které jsou oproti předešlým dvěma typům aplikovány jen v omezené míře zejména v elektrických pohonech, anebo slouží ke krátkodobému uskladnění energie, rozumějme relativní pojem krátkodobému jakožto uložení energie pro terciální záložní napájecí zdroje budov, jejich částí, nebo k napájení vojenských aplikací.

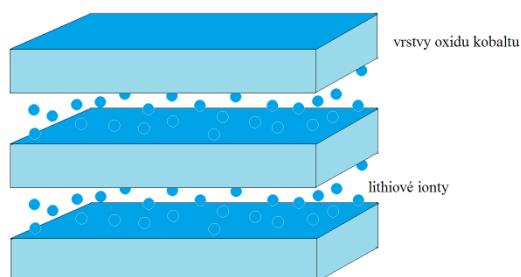
Chemický název	Materiál	Zkratka	Krátká forma názvu
Lithium oxidu kobaltu¹ Lithium Kobalt lithium-ion-kobalt	LiCoO ₂ (60% Co)	LCO	Li-kobalt
Lithium oxidu manganu¹ Lithium Manganu lithium-ion-mangan	LiMn ₂ O ₄	LMO	Li-mangan, nebo Spinel
Lithium železo fosfát¹	LiFePO ₄	LFP	Li-fosfát
Lithium nikl-manganové oxid kobaltu¹ lithium-mangan-kobalt-oxid	LiNiMnCoO ₂ (10 až 20% Co)	NMC	NMC
Lithium nikl kobalt oxid hlinitý¹	LiNiCoO ₂ (9% Co)	NCA	NCA
Lithium oxid titaničitý²	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LTO	Li-titan

Tab. 1.1 Souhrn druhů Li-ion baterií

¹ katodový materiál ² anodový materiál

1.3.1 Lithium oxidu kobaltu (LiCoO₂)

Díky své vysoké měrné energii se stal Li-kobalt populárním napájecím zdrojem mnoha mobilních elektronických zařízení. Článek se skládá z katody oxidu kobaltu a grafitové anody uhlíku. Katoda má vrstvenou strukturu, ve které se při vybíjení lithiové ionty přesouvají od anody ke katodě. Směr toku iontů se při nabíjení otáčí proti směru přesunu iontů při vybíjení. Nevýhodou těchto baterií je relativně krátká životnost a limitovaná možnost zatížení.

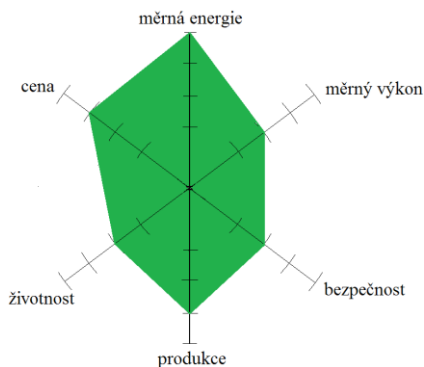


Obr. 1.1 Struktura Li-kobalt

Vrstvená struktura katody, kde se při vybíjení pohybují od anody ke katodě.

Nevýhodou lithium kobaltové struktury je to, že nemůže být nabíjena a vybíjena větším proudem než je její jmenovitá kapacita. To znamená, že baterie s kapacitou 2400 mAh může být nabíjena a vybíjena maximálním proudem o velikosti 2400 mA. V případě rychlého nabíjení, nebo větším zatížením baterie dochází k jejímu přehřívání a zbytečnému namáhání. Obvykle bývá zapojena v baterii ochrana článků, která omezuje velikost proudu pod jeho maximální hodnotu.

Následující obrázek orientačně shrnuje vlastnosti lithium kobaltové baterie z hlediska měrné energie, kapacity, měrného výkonu, životnosti, bezpečnosti a produkce. Tvar šestiúhelníku poskytuje rychlý a jednoduchý náhled na vlastnosti baterií Li-kobalt.



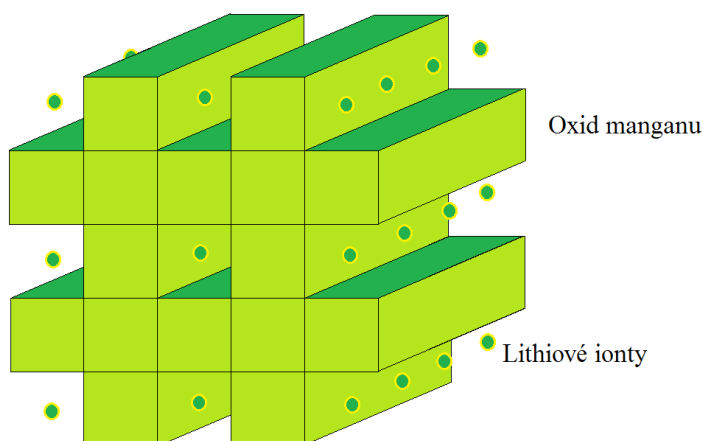
Obr. 1.2 Šestiúhelník vlastností Li-kobalt

Li-kobalt vyniká díky vysoké měrné energii, ale poskytuje malý měrný výkon a nízkou životnost navzdory poměrně vysoké ceně.

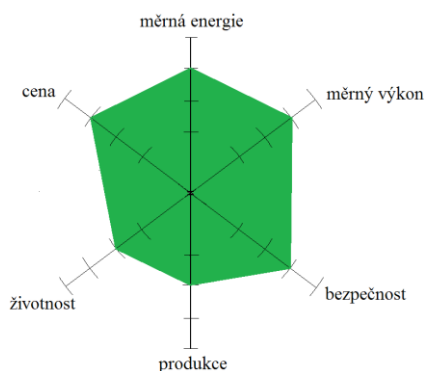
1.3.2 Lithium oxid manganu (LiMn₂O₄)

Architekturu těchto článků tvoří struktura trojrozměrných spinel, která zlepšuje tok iontů na elektrodě, následkem tohoto je snížení vnitřního odporu a lepší manipulovatelnost s baterií. Další výhodou spinel je vysoká teplotní odolnost, stabilita a vyšší bezpečnost, tyto vlastnosti jsou na úkor počtu dobíjecích cyklů a životnosti. Nízký odpor vede k rychlému dobíjení a vysokým vybíjecím proudům baterie s minimálním oteplením. Vybíjecí proudy těchto článků jsou v řádech desítek Ampér a mezní teplota článku se pohybuje okolo 80°C. Li-mangan se používá v lékařství, elektrických nástrojích a v neposlední řadě i v hybridních a elektrických automobilech.

Li-mangan disponuje kapacitou zhruba o třetinu nižší v porovnání s Li-kobaltem. Oproti článkům na bázi niklu má však kapacitu o polovinu vyšší. Strukturální flexibilita umožňuje konstruovat baterie s ohledem na maximální životnost (life span), nebo maximální proudové zatížení (měrný výkon), nebo vysokou kapacitu (měrná energie). Každý výrobce pak může zohlednit požadavky aplikace baterie a vybrat typ s vhodnými parametry.



Obr. 1.3 Struktura Li-mangan
Katodová krystalická struktura lithia oxidu manganu má trojrozměrný mřížový charakter.

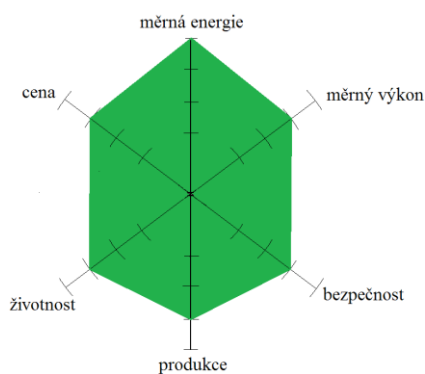


Obr. 1.4 Šestiúhelník vlastností Li-mangan

Přes to, že je z šestiúhelníků zřejmá nízká produkce, dochází k zlepšování nabídky a technologie zajišťující vyšší životnost.

1.3.3 Lithium nikel oxid manganu kobaltu (LiNiMnCoO_2)

Přední výrobci se zaměřují na tuto technologii, která kombinuje na katodě materiály nikel mangan a kobalt (NMC). Podobně jako u Li-manganu lze strukturu článků navrhnout tak, aby baterie dosahovaly vysoké měrné energie, nebo vysokého měrného výkonu, ale nikdy ne obojího najednou. Principem technologie NMC je optimální kombinace niklu a manganu, nikel má vysokou měrnou energii a nízkou stabilitu, mangan tvoří strukturu spinel s velmi nízkým vnitřním odporem a nízkou měrnou energií, jejich kombinací je možné využít lepší z vlastností obou. Stejně jako Li-mangan se baterie NMC využívají v elektrickém nářadí, elektromobilech a dalších aplikacích.

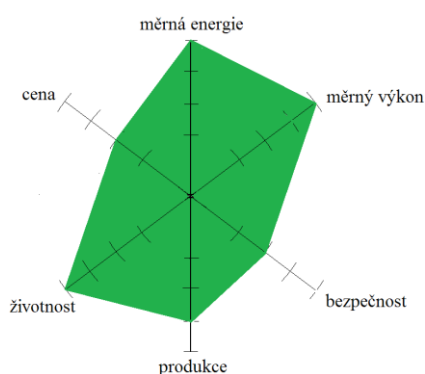


Obr. 1.5 Šestiúhelník vlastností NMC

NMC má dobrou celkovou energii a vyniká měrnou energií. Tyto baterie jsou přednostní kandidáti pro aplikaci v elektromobilech.

1.3.4 Lithium nikel kobalt oxid hlinitý (LiNiCoAlO_2)

Tato struktura článku je označována zkratkou NCA, v praxi je méně rozšířená na spotřebitelském trhu, ale díky své vysoké měrné energii se zachováním vysokého měrného výkonu a dlouhé životnosti, nevýhodou těchto baterií je jejich bezpečnost při provozu a vysoké náklady na její zvýšení. Zatím nachází své uplatnění v konceptech automobilového průmyslu.

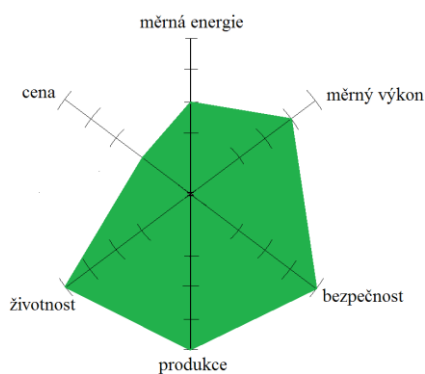


Obr. 1.6 Šestiúhelník vlastností NCA

U NCA je patrná vysoká měrná energie a měrný výkon baterií s nízkou bezpečností.

1.3.5 Lithium oxid titaničitý ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Baterie s lithiem titaničitým na anodě jsou známy od roku 1980. Titan nahrazuje grafit v anodě klasické lithium-iontové baterie a vytváří spinelovou strukturu. Li-titan má nominální napětí článku 2,4V, který může být rychle nabíjen, tedy vysokým proudem a vybíjecí proudy tohoto typu baterií dosahují až desetinásobku hodnoty jmenovité kapacity baterie za současného udržení nízkého oteplení článků při takovémto vybílení. Další nespornou výhodou Li-titanu je udržení kapacity baterie nad hranicí 80% při teplotách okolního prostředí -30°C , zmíněné vlastnosti doplňuje vysoká bezpečnost článků.

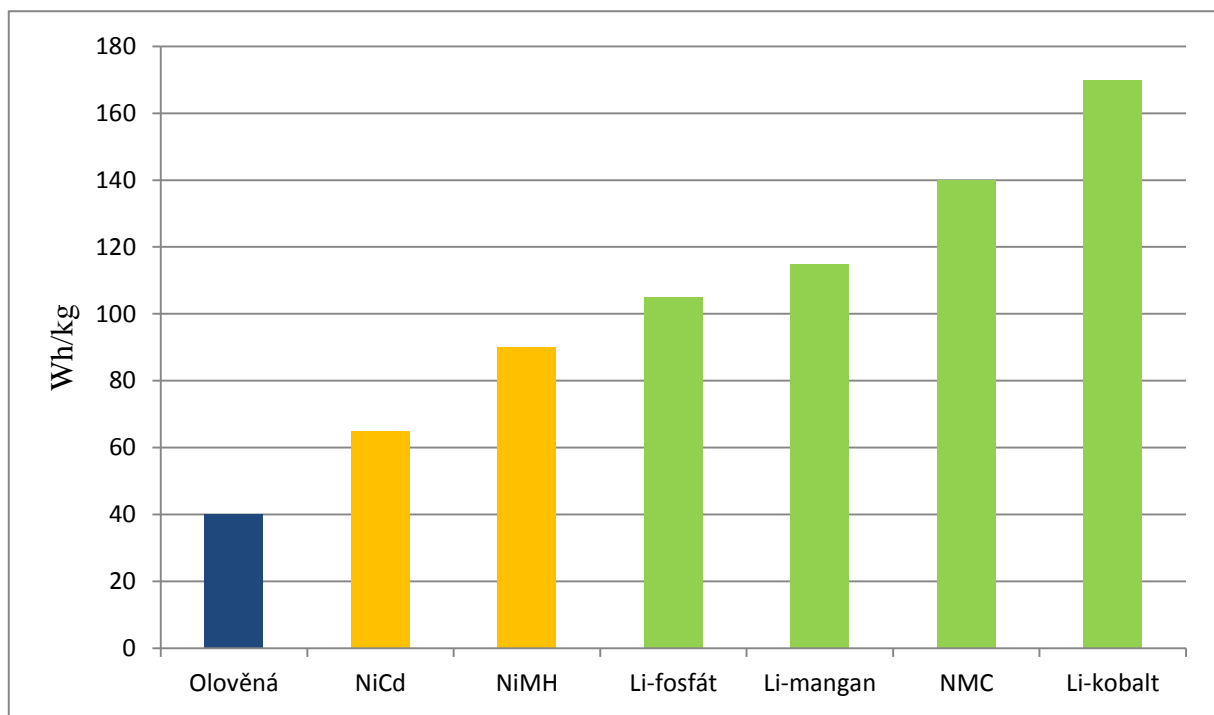


Obr. 1.7 Šestiúhelník vlastností Li-titan

Li-titan vyniká v oblasti bezpečnosti, výkonu při nízkých teplotách a životnosti.

1.3.6 Přehled typů baterií

Přehled typů baterií graficky znázorňuje měrnou energii olověných, niklových a lithiových struktur. Zatímco Li-kobalt, díky své měrné kapacitě, předčil ostatní druhy baterií, porovnáváme-li baterie pouze na základě měrných kapacit. Při zohlednění konkrétních výkonů a stability baterií jsou Li-mangan a Li-fosfát lepší. Při vývoji baterií pro elektrické pohonné jednotky se stává důležitými parametry bezpečnost a počet dobíjecích cyklů.



Obr. 1.8 Přehled energetické hustoty baterií

[1] [2]

2 Lithium železo fosfát (LiFePO₄)

Lithium železo fosfátová baterie, také nazývaná LFP baterie, je dobíjecí lithium iontová baterie, která využívá sloučeniny LiFePO₄ jakožto materiálu katody. Tyto baterie mají nižší měrnou energetickou hustotu než běžnější LiCoO₂ využívané v oblasti spotřební elektroniky, ale nabízejí delší životnost a vyšší hustotu měrného výkonu, v neposlední řadě je jejich předností vysoká bezpečnost. Z těchto důvodů je jejich aplikace zaměřena na automobilový průmysl, respektive jsou využívány jako zdroj energie pro elektromobily. Druhým odvětvím využití LFP baterií je záložní napájení systémů.

2.1 Vývoj technologie LFP baterií

LiFePO₄ je přírodní minerál z rodiny Olivínů. Jeho využití jako elektrody baterie bylo poprvé popsáno v odborné literatuře Johnem Goodenoughem z výzkumné skupiny University of Texas v roce 1996, jako katodového materiálu pro dobíjecí lithiové baterie. Tento materiál si získal podíl na trhu díky své ne toxicitě, nízkým pořizovacím nákladům, velkému zastoupení železa v přírodě, elektrochemickému a měrnému výkonu, dobré teplotní stabilitě a tím i vysoké bezpečnosti.

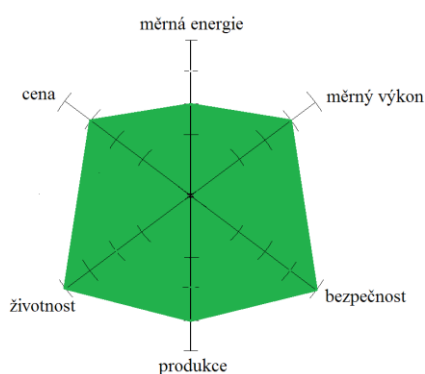
Hlavní překážkou pro komercializaci byla nízká elektrická vodivost materiálu. Tento problém se podařilo překonat zmenšením částic, potahováním částic LiFePO₄ vodivými materiály, jako je uhlík, a umělým znečišťováním kationty z hliníku, niobu a zirkonu. Tento technologický postup byl vyvinut panem Yet-Ming Chiangem a jeho spolupracovníky na MIT. Takto technologicky zpracované baterie jsou dnes využívány na komerčním trhu například společnostmi Black and Decker's (elektrické nářadí), Cessna (letecký průmysl), Daimler (automobilový průmysl), BAE Systems a dalšími.

Na MIT byl vyvinut nový nátěr, který umožňoval iontům lepší pohyb v rámci baterie. „Beltway baterie“ využívají bypass systém, který umožňuje rychlý pohyb lithiových iontů a baterii je tak možné nabít za čas kratší než jedna minuta. Další vývoj se ubírá směrem využívajícím potažení lithium železo fosfátových částic sklovitou hmotou, takto modifikované články se nazývají lithium pyrophosphate, ionty se díky této technologii mohou pohybovat ještě rychleji a doba plného nabití takového článku, resp. celé baterie je 10 až 20 sekund. Tato technologie je zatím ve fázi testování prototypu malého článku.

2.2 Bezpečnost LFP baterií

Jednou z důležitých předností LFP baterií oproti jiným lithium iontovým chemickým bateriím je tepelná a chemická stabilita, což zvyšuje jejich bezpečnost. Tento jev je způsoben silnější chemickou vazbou fosfátu železa oproti oxidovým vazbám jiných druhů baterií.

Při migraci lithiových iontů z LiCoO_2 buněk dochází k nelineární expanzi v CoO_2 což má vliv na strukturální integritu buňky. Zatímco u LiFePO_4 jsou oba stavy, před migrací i po ní, strukturálně podobné, to znamená, že buňky LiFePO_4 jsou konstrukčně stabilnější než LiCoO_2 buňky. Tyto baterie jsou také vysoce odolné při ztrátě kyslíku, která obvykle vede k exotermické reakci lithia v jiných buňkách. Díky tomuto jsou lithium fosfátové buňky mnohem hůře zapalitelné v případě nesprávného zacházení s baterií (zejména při nabíjení). Ani tato technologie neochrání baterii proti úmyslnému zneužití.



Obr. 2.1 Šestiúhelník vlastností Li-fosfát

Vysoká bezpečnost a životnost jsou nespornou výhodou baterií LFP, v určitých odvětvích, kde je kladen důraz právě na bezpečnost to převáží poměrně nízkou měrnou energii baterie.

2.3 Výhody a nevýhody Li-fosfát

LiFePO₄ baterie využívá lithium-ion-deriváty podobné s jinými lithium iontovými chemickými bateriemi. I přes to, že mají mnoho výhod i nevýhod podobných existujících mezi nimi značné rozdíly.

LFP chemie nabízí delší životní cyklus než jiné lithium iontové technologie. Stejně jako baterie na bázi niklu a na rozdíl od ostatních li-ion baterií, LFP baterie mají konstantní vybíjecí napětí. Toto napětí zůstává po celou dobu vybíjení článku těsně u hodnoty 3.2V, dokud není baterie zcela vybitá, to umožňuje baterii dodávat prakticky plný výkon do úplného vybití, což umožňuje v aplikaci užití jednodušších obvodů pro regulaci napětí.

Vzhledem k tomu, že nominální napětí jednoho článku je 3.2V, stačí pro dosažení napětí 12.8V zařadit do baterie čtyři články oproti šesti které by byly potřeba u olovo-kyselinových baterií. Při uvážení bezpečnostních vlastností LFP se z nich stává dobrá náhrada olovo-kyselinových baterií v mnoha aplikacích, jako například automobilový průmysl a solární aplikace.

Využití fosforečnanů snižuje potenciální ekologické riziko při neodborné likvidaci baterie, také zjednodušuje následnou ekologickou likvidaci oproti kobaltovým bateriím.

Oproti LiCoO₂ disponuje Li-fosfát vyšším jmenovitým proudem a vyšším špičkovým výkonem, který baterie dodá. Při těchto stavech nedochází k nebezpečnému přehřívání baterie.

V neposlední řadě patří mezi přednosti LFP baterií nízká míra samovybíjení baterie v odloženém stavu, je udáváno, že si LiFePO₄ baterie udrží svou kapacitu až jeden rok skladování.

2.4 Specifikace LiFePo₄

- Napětí článků:
 - Napětí vybité baterie = 2,8 V
 - Pracovní napětí = 3,0 - 3,2 V
 - Maximální hodnota napětí nabité baterie = 3,6 V
- Objemová hustota energie = 220 Wh/dm³ (790kJ/dm³)
- Měrná hmotnost energie = 90 Wh/kg (>320 J/g)
- 100% DOD životnost (počet cyklů na 80% původní kapacity) = 2 000 – 7 000
- 90% DOD životnost (počet cyklů na 80% původní kapacity) > 10 000
- Katodové složení:
 - 90% C-LiFePo₄, Phos-Dev-12
 - 5% Carbon EBN-10-10 (superior grafit)
 - 5% PVDF (polyvinyliden fluoride)
 - Velikost katody v článku = 1,54 cm²
- Elektrolyt: Ethylene carbonát - Dimethyl carbonát (EC-DMC) 1-1 LiClO₄ 1M
- Anoda: Grafit nebo těžký Uhlík s příměsí LiFe

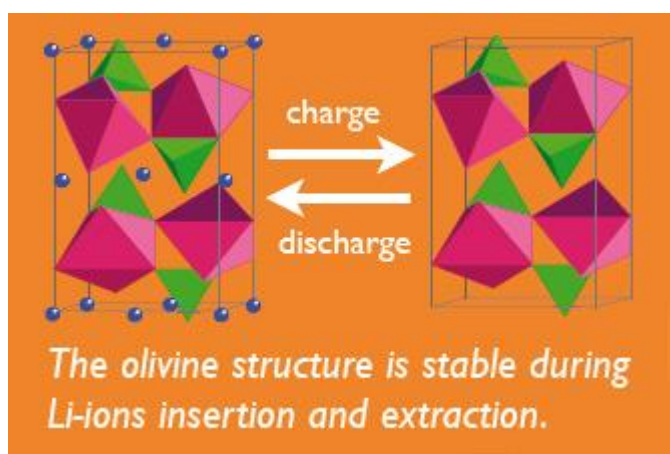
2.5 Využití baterií LFP

Baterie LFP se díky již zmíněným vlastnostem, tedy schopnosti dodání vysokého okamžitého výkonu, nižší hmotnosti a dlouhé životnosti, hodí pro aplikace v rozmáhající se osobní elektro-dopravě, stávají se hlavním napájecím zdrojem elektrických jízdních kol a elektromobilů.

Tyto baterie využívá do svých vozidel americká společnost Aptera Motors, která se zabývá vývojem sportovních kompozitních vozidel. Li-fosfát využívá i nejrychlejší elektrický motocykl na světě, KillaCycle. V neposlední řadě našli uplatnění u výrobce golfových vozíků Golfskatecaddy, který díky těmto bateriím vyvinul dopravní prostředek schopný objet všech osmnáct jamek golfového hřiště.

Díky vyššímu napětí jednotlivých článků je LFP baterie vhodná jako napájecí zdroj LED svítidel, bez nutnosti užití step-up obvodů.

Uplatnění LiFePO_4 není jen v průmyslových aplikacích či v dopravě, tyto baterie jsou využívány i v elektronických cigaretách díky svým bezpečnostním parametrům a ne toxicitě článků. V modelech RC aut nahrazují NiMH, nebo LiPo baterie, protože není potřeba regulátor napětí, neboť tyto konkrétní baterie poskytují 6,6V jmenovitého napětí a nedochází k jeho postupnému poklesu v průběhu vybíjení.



Obr. 2.2 Orientační model struktury LiFePO_4

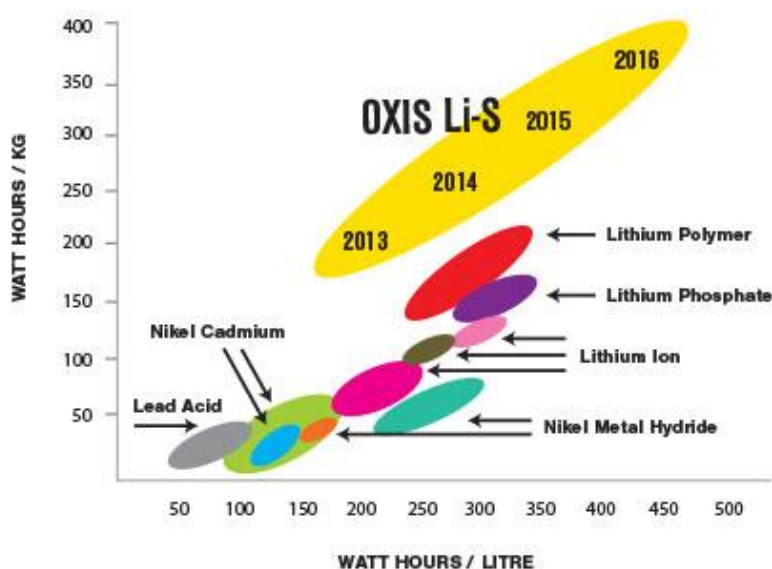
Téměř neměnná struktura LiFePO_4 během nabíjení a vybíjení z ní činí jeden z nejbezpečnějších článků na trhu.

Zdroj: http://www.phostechlithium.com/images/prf_lifepower.jpg

[2] [3]

3 Nová technologie Li-S

Na trhu se objevila technologie budoucnosti z hlediska napájecí bateriové technologie. Tyto baterie mají označení Li-S a přes to, že jsou stále ve vývoji, už teď šokují některými parametry. Tato technologie je dokonce označována za další generaci baterií, mohlo by se tak v budoucnu jednat o revoluci na poli přenosných zdrojů elektrické energie stejně jako při nástupu Li-ion baterií. Vývojem této technologie se zabývá společnost OXISenergy a pro své články udává následující parametry. Anodová elektroda je tvořena Lithiem a katodová elektroda je na bázi Síry. Toto spojení materiálů vytváří velmi bezpečný a stabilní zdroj elektrické energie, pro který je udávána měrná energie až 2500 Wh/kg, což je zhruba pětkrát více než u konvenčních lithium iontových baterií. V roce 2013 bylo dosaženo u článků energie 200Wh/kg a příslibem během tří let je hodnota 400 Wh/kg. Očekávaným počtem dobíjecích cyklů pro pokles kapacity na standardní hodnotu 80% je 2000, i to je bezkonkurenční s ohledem na li-ion baterie. Ovšem nespornou výhodou této technologie je možnost úplného vybití baterie, tedy hloubka vybití baterie není v tomto případě žádným pojmem a může docházet k využití veškeré energie baterie, to by mohlo mít vliv na počet baterií v některých aplikacích. Další nespornou výhodou této vlastnosti je možnost uložení baterie na neomezenou dobu protože nedojde vlivem podbití k poničení baterie, jako je tomu u Li-ion baterií, které je potřeba udržovat každých 3-6 měsíců.



Obr. 3.1 Porovnání Li-S s ostatními druhy baterií

Zdroj: <http://www.oxisenergy.com/technology>

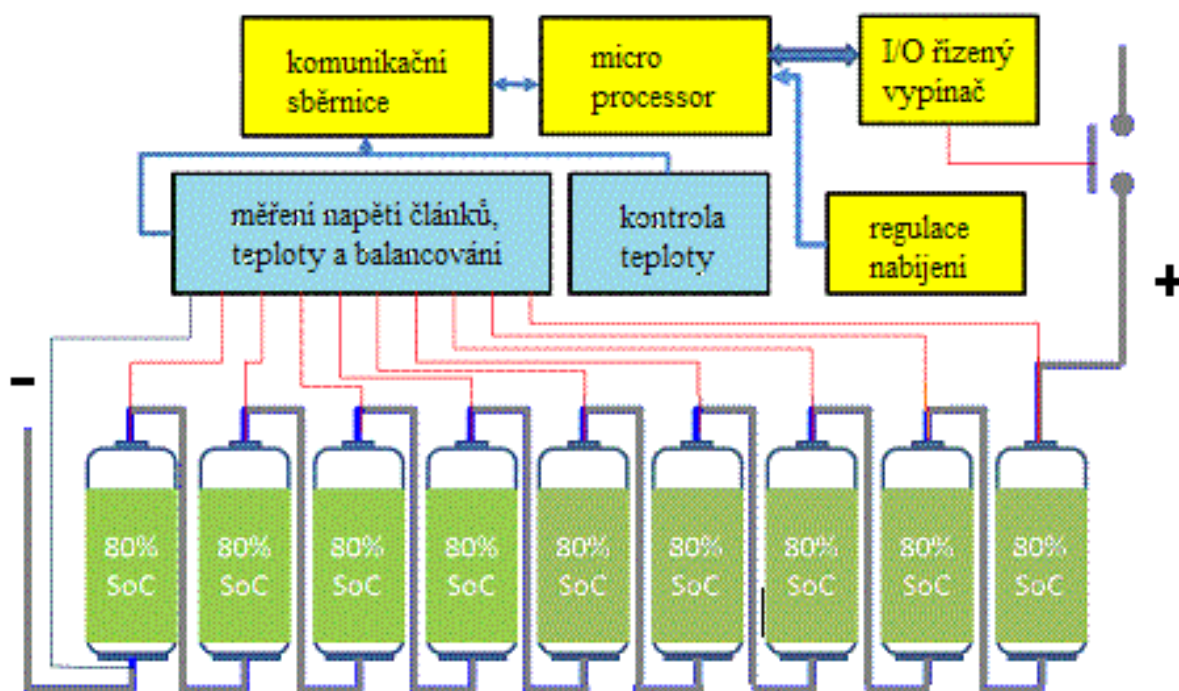
[6]

4 Systém řízení baterie

Systém řízení baterií, z anglického Battery Management Systems, je označován zkratkou „BMS“. Jedná se o elektronický systém, který řídí nabíjecí baterie (jednotlivé články, nebo celé baterie). Vlastní fyzická podoba BMS je dvojího druhu, v prvním případě je BMS subsystémem řídicí jednotky zařízení, ve druhém je sám řídicí jednotkou s dalšími podružnými funkcemi.

Fyzické provedení je závislé na konkrétní aplikaci a funkcích řídicího systému, provedení BMS jako subsystému některé aplikace se využívá u drobné elektroniky (s ohledem na efektivitu vlivu konstrukčního uspořádání) a jednoduchých aplikací, kde je jeho úlohou pouze ochrana baterie proti jinému než bezpečnému provozu. Konstrukční uspořádání do samostatné řídicí jednotky je využíváno u systémů programově, nebo konstrukčně náročnějších a zejména u aplikací kladoucích vysoké požadavky na bezpečnost.

Softwarová kompozice systému řízení baterie se odvíjí, obdobně jako fyzická podoba, od druhu aplikace, pro kterou je určen. U jednodušších zařízení je měřeno napětí baterie a BMS vyhodnocuje výsledky měření z hlediska provozních a nepřijatelných stavů baterie, jako nepřijatelný se u zmiňovaného typu zařízení považuje obvykle jen hluboké vybití baterie. U aplikací technologicky složitějších a zejména u těch náročných na bezpečnost provozu, ať celého zařízení, tak jen bezpečnost provozu baterií, jako jsou například elektromobily, je BMS značně programově rozšířenější, zpravidla zahrnuje datovou komunikaci pro připojení tzv. inteligentních baterií (jedná se o typy se systémem pro správu baterií s externí komunikační sběrnici). Dále analogovou, nebo digitální periferii pro ovládání nabíjecí stanice, toto připojení bývá, z hlediska efektivity a zábrany poškození baterií, sdruženo se silovým dobíjecím konektorem. Vyhodnocená data se ukládají do paměti tzv. LogBook, nebo jsou odesílána nadřazené řídicí jednotce ať už k uložení, nebo k dalšímu zpracování, to může být hlášení SOC (state of charge) na informačním segmentu celého systému. V elektromobilech je pro svou odolnost proti rušení a nízkou chybovost užívána pro komunikaci mezi jednotlivými jednotkami sběrnice CAN. Trendem vývoje je sběrnice, která by kombinovala datové vlastnosti sítě LAN a odolnost sběrnice CAN.



Obr. 4.1 Hlavní části BMS

[5]

4.1 Návrh BMS pro konkrétní aplikaci

Pro návrh BMS je potřeba předem znát poměry na zařízení pro které je tento návrh realizován. Zda se jedná o samostatnou jednotku, nebo bude systém řízení baterie podsystémem řídicí jednotky pohonu. Předpokládanou znalost zařízení obsluhou a stavy ve kterých bude zařízení provozováno. Toto udává prvotní představu o složitosti a obsáhlosti BMS, případně jeho podsystémů. Následující návrh je realizován pro projekt Elektromotokára KEV/FEL. Vzhledem k tomu, že na vozidle se již nachází hlavní řídicí jednotka měniče respektive pohonu a tzv. řídicí jednotka komfortní, která obsahuje display, bude BMS jednotka třetí, tedy samostatná. Dále jsou na vozidle montované dvě sady baterií LiFePO_4 a to tak, že se nacházejí na obou bocích vozidla, tyto baterie jsou v rámci realizace projektu vybaveny inteligentními sdruženými senzory napětí a teploty. Komunikační sběrnice pro tyto senzory byla, vzhledem k požadavku na konstrukční jednoduchost, zvolena RS 485.

4.2 Měření fyzikálních veličin pro BMS

Systém řízení baterií využívá pro svou plnohodnotnou činnost informaci o třech fyzikálních veličinách. Jsou to velikost elektrického napětí jednotlivých baterií, velikost odebíraného resp. dodávaného proudu a teplota baterie. Na základě znalosti těchto veličin je řídicí systém schopen reagovat na všechny stavy, ve kterých se baterie mohou během provozu nacházet a v případě vyhodnocení poruchy včas a účinně reagovat.

4.2.1 Měření napětí a teploty

Jedná se o dvě ze tří základních vstupních informací BMS, tyto data poskytují jednotce dva měřící obvody Li-ion baterií, pro každý pár baterií jeden. Data jsou předávána k dalšímu zpracování sběrnici RS-485. Více v následujících kapitolách.

4.2.2 Měření proudu

Pro měření proudu bylo zvoleno čidlo proudu LEM HTFS 400-P (dále jen LEM), pomocí kterého je možné měřit proud galvanicky oddělený a tím chránit signálové obvody proti rušení a zabránit možnosti nežádoucího rozšíření destruktivního nadproudu do těchto obvodů. Čidlo LEM bylo zvoleno na základě svých měřicích rozsahů a optimalizovanému výstupnímu signálu pro zpracování mikrokontrolérem. Více k zapojení měřicího obvodu proudu v následujících kapitolách.



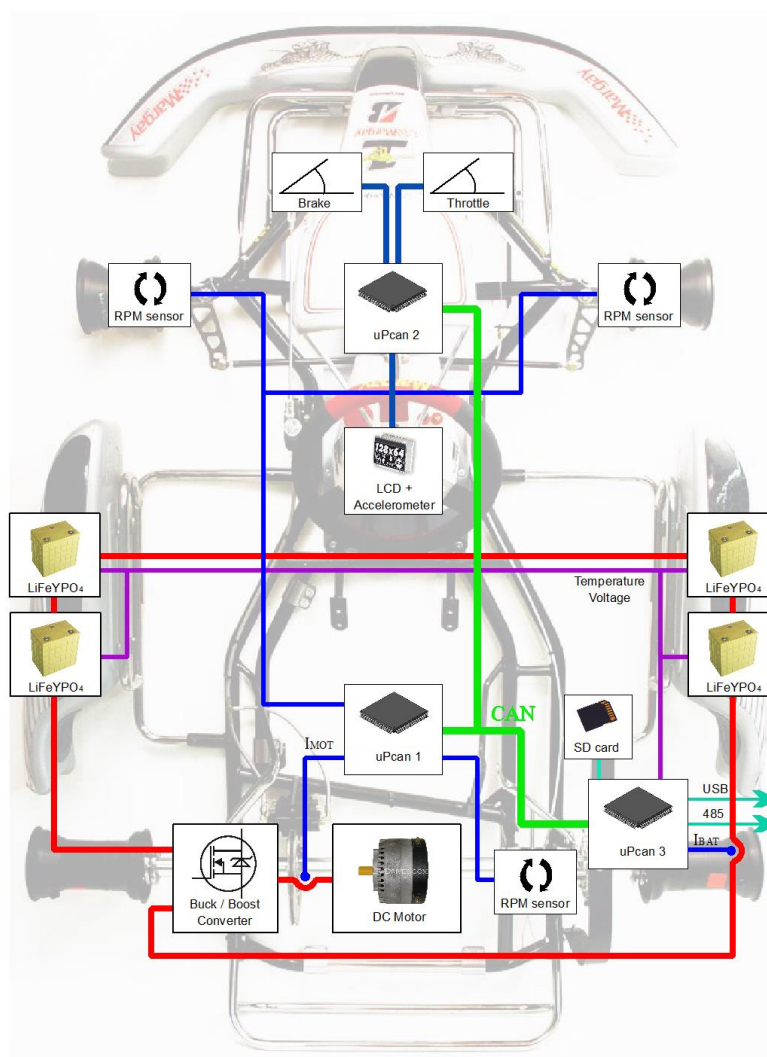
Obr. 4.2 Čidlo proudu LEM HTFS 400-P

Zdroj:

http://www.mercateo.cz/mimegallery.jsp?ViewName=live_cz~showGrossColumn&CatalogID=115CZ&SKU=241727&image=0

5 Návrh měřících a řídicích obvodů BMS

Reálné provedení výsledného uskupení jednotlivých řídicích jednotek by se mělo podle původního návrhu projektu „Elektromotokára“ skládat ze tří mikroprocesorů. Hlavní řídicí jednotkou je $\mu P1$, jedná se o procesor řízení měniče resp. motoru. Zobrazovací jednotku obsluhuje $\mu P2$. BMS a ostatní „komfortní“ funkce jsou implementovány návrhem $\mu P3$. Na obrázku níže je vidět rozložení jednotek pro vozidlo.



Obr. 5.1 Blokové schéma motokáry [17]

Nabízelo by se sloučení řídicích jednotek $\mu P1$ a $\mu P3$ do jedné, toto řešení je logické z několika zřejmých hledisek. BMS jednotka by měla zprostředkovávat nejen kontrolu a signalizaci parametrů energie tekoucí při nabíjení do baterií, ale také kontrolovat toky energie z baterií do měniče a v případě vyhodnocení nežádoucího stavu by měl $\mu P3$ vypnout dálkově řízený stykač, který odpojí motokáru od baterií. I přes to, že je komunikace CAN velmi

bezpečná z hlediska chybných zpráv, vedlo by sloučení těchto řídicích jednotek k omezení rizika ztráty krizové zprávy. K tomu by mohlo dojít i vlivem mechanického poškození komunikační linky mezi procesory.

Dalším hlediskem pro sjednocení řídicích jednotek je volba mikroprocesoru ARM od firmy STmicroelectronics, STM32F4 (specifikace tohoto procesoru bude popsána níže), který disponuje nadměrným výpočetním výkonem pro každou z těchto aplikací, tedy sloučená jednotka by z hlediska výpočetního výkonu obsáhla obě aplikace s dostatečnou rezervou a z hlediska konstrukčního by došlo ke zjednodušení fyzické architektury elektrických systémů elektromotokáry, to by vedlo k úspoře konstrukčního materiálu, snížení nákladů na realizaci projektu a eliminovalo pravděpodobnost poruchy vlivem přerušení komunikace mezi fyzicky separovanými řídicími jednotkami, nebo poruchy vlivem výrobní vady jednotlivých komponent.

Pro úplnou komunikace-schopnost měla být elektromotokára osazena novým měničem resp. řídicí jednotkou $\mu P1$. Proto se bude další návrh ubírat z fyzického hlediska návrhem komponent, které by využíval u sdružené řídicí jednotky, battery management system. Dále návrhem výpočtů kapacity baterií, algoritmu adaptace modelu a návrhem komunikací. Následující kapitoly by měli sloužit jako ucelený podklad pro implementaci BMS do sdružené řídicí jednotky pohonu.

5.1 Specifikace μ P3 – BMS a dataloging

Měření:

- Proud baterie ADC0 (čidlo LEM HTFS-400 + dif. zesilovač)

Komunikace:

- RS485 – μ P_bat (na bateriích)
- CAN
- SD karta
- USB

Výpočet:

- Ovládání nabíjení (po hlášení čidel o dosažení „max_bat_U“ sníží nabíjení na balancovatelný proud 0,5A)
- SOC – Integrace proudu při známé jmenovité kapacitě baterie => vysoká vzorkovací frekvence.
- Model baterie s adaptací (ukládání nabíjecích resp. vybíjecích charakteristik a jejich průměrování).

Výstupy:

- USB - čtení dat z SD karty - nabíjecí a vybíjecí charakteristiky baterií, doba trvání jízdy, rychlost průměrná, rychlost maximální, (možno doplnit daty z akcelerometru umístěného na Discovery boardu STM32F4).
- Komunikace s nabíječkou.
- Panic-Stop pulz pro stykač.

Funkce:

- Po připojení nabíjecího konektoru, požádá o stav CHARGE. Na displeji se potvrdí nabíjecí proud (rychlé nabíjení / standard 20A) a začne nabíjení dle velikosti proudu v CAN zprávě (když se nepotvrdí do 10s začne standardní nabíjení). Displej umožní ukončit nabíjení, nebo změnit proud. Po odpojení dobíjecího konektoru požádá o stav DRIVE. Po nečinnosti 30min dojde k vypnutí systému žádostí o stav SYSTEM_OFF.

Hardware:

- Discovery STM32F4
- STM32F4DIS-EXT
- LEM HTFS-400
- ADM2687 (RS485 driver)
- ADM3053 (CAN driver)

Konektory:

- 2x CAN (paralelně – pro $\mu P1$ a $\mu P2$)
- 2x RS485 (paralelně – levá a pravá strana baterek)
- USB
- Dock konektor (připojení nabíječky, silové a datové vodiče jsou sdruženy do jednoho konektoru, aby nedošlo k nesprávnému postupu při připojování nabíjecí stanice).

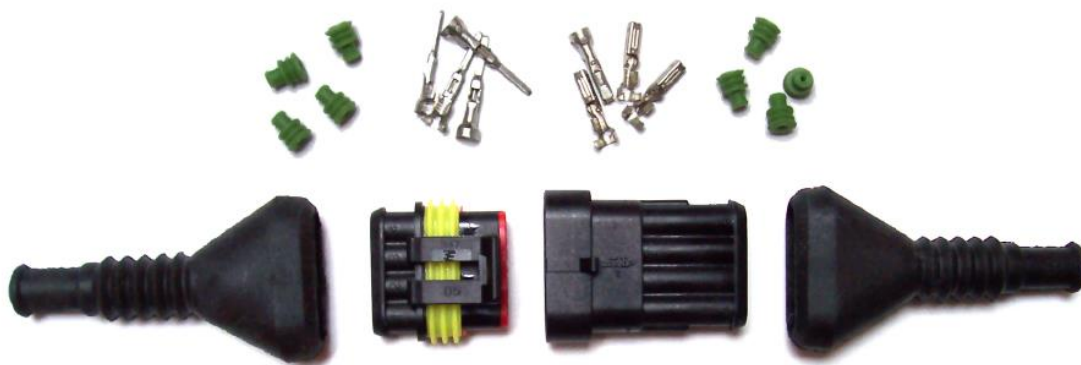
[17]

5.2 Volba hardwarových komponent

Při volbě hardwarových komponent je nutné zohlednit náročnost aplikace. Požadavky na krytí a namáhání mechanické vlivem sil působících na zařízení během jízdy, tak i elektromagnetických šířících se okolím vlastního pohonu. Dále je při výběru dílčích částí navrhovaného zařízení nutné zohlednit ekonomickou podstatu věci s ohledem na faktor mnohdy označovaný jako „poměr cena výkon“, není relevantní návrh zařízení s komponenty nejvyšší kvality, resp. z nejvyšší cenové skupiny s ohledem na účel provozu motokáry.

5.2.1 Konektory pro datovou komunikaci

Datová komunikace CAN i RS485 využívá na fyzické vrstvě kroucené stíněné dvoulinky, pro oba typy komunikace vyhovuje konektor se čtyřmi piny. S ohledem na účel užití, vyhovuje konektor AMP Superseal 1,5, který je obecně velmi rozšířený v automobilovém průmyslu. Tento konektor má krytí IP67 a je osazen zámkou proti rozpojení vlivem mechanického namáhání. Kontakty konektoru jsou vyrobeny z fosforového bronzu s maximálním přechodovým odporem 3 mΩ. Konstrukční materiály konektoru jsou chemicky odolné např. vůči solím, motorovým olejům a motorové naftě či benzínu. Bytelnost konektoru je vidět na obr. 5.2, kde je konektor rozložený na jednotlivé části.



Obr. 5.2 Rozložený konektor Superseal 1,5

5.2.2 Dobíjecí konektor

Volba konektoru pro dobíjení klade důraz na sdružené dobíjecí a regulační vodiče v jednom konektoru s ohledem na minimalizaci rizika nevhodného postupu při zapojování dobíjecí stanice do motokáry. V nedávné době byl určen standard SAE J1772 a IEC 62196-3, které stanovují tvar konektoru pro užití v automobilovém průmyslu, volba konektoru pro motokáru bude tento standard respektovat s ohledem na požadavky na konektor. Nejvíce vyhovuje konstrukčně i svými parametry konektor od výrobce REMA s názvem „DC Fast Charge Electric Vehicle Connector and Inlet“. Tento konektor má stejně jako zvolené datové konektory krytí IP67 a při napětí 600V DC je schopen přenášet proud 150A. Na obr. 5.3 je vyobrazen jak samec, tak i samice konektoru.

[7]



Obr. 5.3 Konektor REMA pro dobíjení

Zdroj: http://rema-ev.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/05/DC_Combo.pdf

5.2.3 Řídící mikrokontrolér

Pro aplikaci na projektu „Elektromotokára“ byl zvolen mikrokontrolér od výrobce STmicroelektronics, s procesorem ARM Cortex-M4F 32bit, označený jako STM32F4 Discovery, nebo také STM32F407. Jedná se o vývojový kit, který disponuje mnoha rozšířeními a možnostmi sloučení s dalšími periferiemi připravenými výrobcem. Od začátku je patrné, že volba tohoto boardu je řešením, které eliminuje návrh vlastní desky pro procesor, kterou výrobce navrhnul v ideálním rozložení. Cena Discovery kitu se pohybuje okolo 400Kč, to je pro účely vývoje velmi dobré, opět s ohledem na poměr cena výkon. Tento kit je vhodné doplnit deskou stejného výrobce STM32F4DIS-BB, která je osazena drivery a konektorem pro RS komunikace a konektorem RJ45 (10/100 Ethernet s IEEE 1588v2). Dále je na desce BB instalován slot pro SD kartu, která je v návrhu uvažována pro záznam provozních dat. S cenou okolo 700Kč se celá sestava pohybuje okolo 1100Kč, dle prodejce Farnell, to je pro tuto aplikaci velice solidní náklad. Architektura procesoru ARM Cortex/M4F je zobrazena v příloze A.

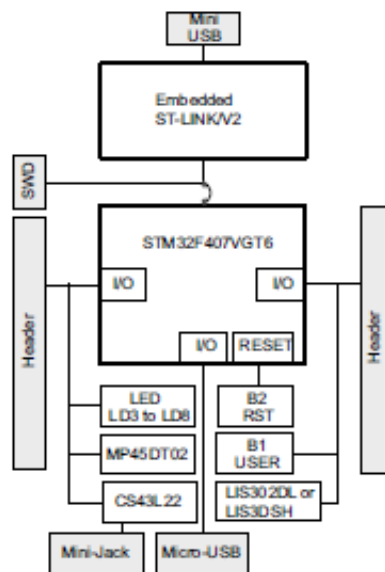
5.2.3.1 Specifikace STM32F4 Discovery

[8]

- Procesor 32-bit ARM Cortex-M4F, 1MB Flash, 192KB RAM LQFP100
- ST-LINK/V2 programátor součástí desky s možností odpojení
- Napájení přes sběrnici USB programátorem, nebo externím zdrojem 5V DC
- Výstupní napětí 3V a 5V
- LIS302DL LIS3DSH ST MEMS 3osý akcelerometr
- Gyroskop
- MP45DT02 ST MEMS všesměrový digitální mikrofón
- CS43L22 DAC s třídou integrace D
- Osm LED
 - USB control connect
 - ON state
 - 4x User LED
 - 2x USB OTG LED
- Dvě tlačítka (user / reset)
- USB OTG FS s konektorem micro-AB
- Kompaktní rozměry



Obr. 5.4 STM32F4Discovery



Obr. 5.5 Architektura STM32F4

Zdroj: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf

5.2.3.2 Specifikace

STM32F4DIS-BB

- Slot pro kartu MicroSD
- Konektor RJ45
(10/100 Ethernet s IEEE1588v2)
- Konektor pro ST kamera board
- Konektor pro ST LCD board
- Konektor pro UART, I2C, SPI, CAN, PWM a GPIO

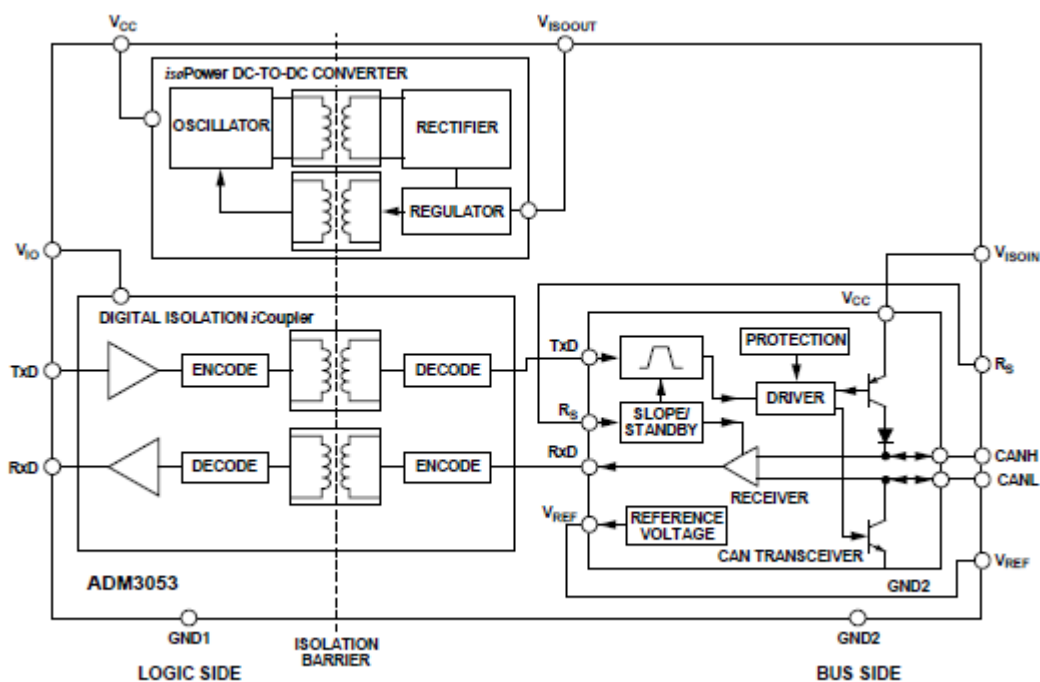


Obr. 5.6 STM32F4DIS-BB

Zdroj: <http://cz.farnell.com/stmicroelectronics/stm32f4dis-bb/expansion-stm32f4-cortex-m4-discovery/dp/2250205>

5.2.4 CAN Driver

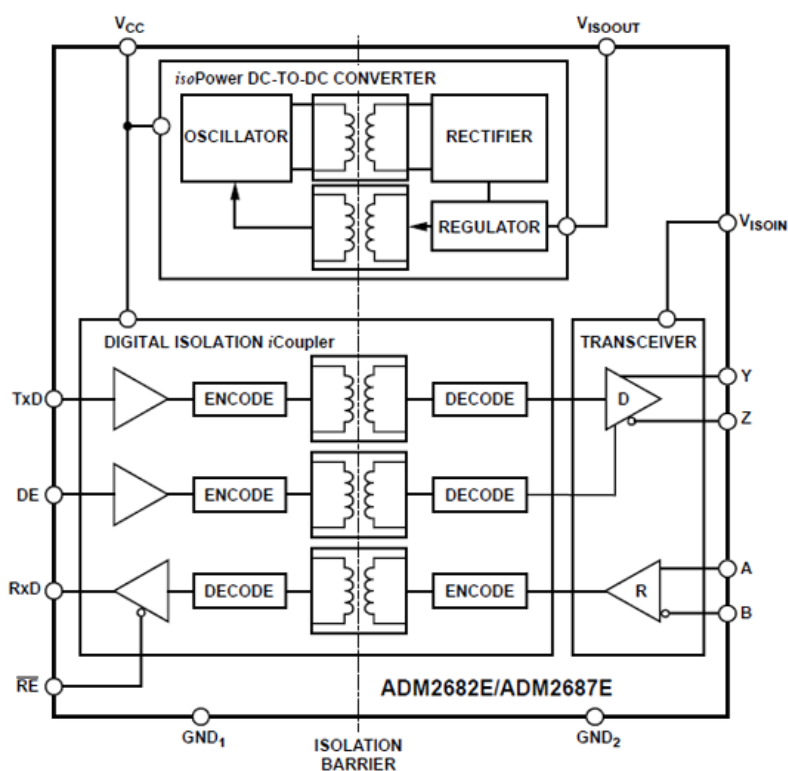
I přes to, že STM32F4DIS-BB obsahuje jeden driver pro datovou komunikaci CAN, nebude tento driver využíván a zůstane uvolněn pro případný vývoj a testování (možnost odesílání dat přímo do PC). Pro komunikaci CAN je zvolen driver od výrobce Analog Devices s označením ADM3053. Tento driver tvoří fyzickou vrstvu CAN komunikace a obsahuje DC/DC měnič s galvanickým oddělením sběrnice. Blokové schéma na obr. 5.7 znázorňuje rozložení driveru včetně galvanického oddělení (více [10]).



Obr. 5.7 Blokové schéma ADM3053

5.2.5 RS485 Driver

Driver pro komunikaci RS485 je také užit od výrobce Analog Devices s označením ADM2687E, který stejně jako ADM3053 obsahuje DC/DC měnič s galvanickým oddělením linky. Umožňuje zapojení v halfduplex, nebo fullduplex RS485. Maximální rychlost datového toku driverem je 0.5Mb/s, tato rychlost je ovšem pro komunikaci s μP _bat dostačující s rezervou (více [11]).

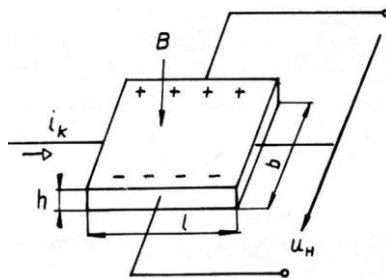


Obr. 5.8 Blokové schéma ADM2687E

V řídicí jednotce jsou tyto drivery ať pro CAN tak i pro RS485 duplikovány, pro CAN je to z důvodu průběžnosti sběrnice a jsou zapojeny paralelně. Toto zapojení odpadá v případě sdružení $\mu P1$ a $\mu P3$ do jednoho mikrokontroléru. Pro RS485 je jejich počet určen kvůli rozložení baterií na vozidle na levou a pravou stranu po dvou jednotkách budou tedy také fungovat paralelně. Jejich umístění je vhodné do třetího patra pod Discoverkit a BB, ze zařízení by se tak stala díky rozměrům boardů poměrně kompaktní kvádřová jednotka.

5.2.6 Čidlo proudu

Volba čidla proudu je soustředěna na čidlo s Hallovým generátorem, tato čidla jsou velmi rozšířena, měří dobře neharmonické průběhy proudu. Princip Hallova generátoru je na obr. 5.9.

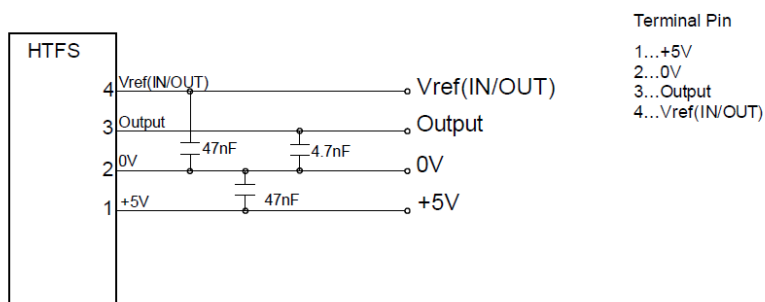


Obr. 5.9 Hallův generátor

Napětí na svorkách Hallova generátoru je dáno rovnicí (1), kde R_H je Hallova konstanta závislá na materiálu a teplotě destičky.

$$U_H = R_H \frac{B \cdot i_k}{h} \tag{1}$$

Jedním z nejvýznamnějších výrobců těchto typů čidel je švýcarská firma LEM, ta využívá Hallovy generátory ve svých čidlech pracujících na kompenzačním principu. Více v datasheetu [12].



Obr. 5.10 Schéma zapojení čidla LEM HTFS 400P

[12] [13]

6 Návrh softwarového řešení BMS

Následující kapitola se zabývá shrnutím parametrů resp. proměnných, se kterými BMS pracuje, ať už se jedná o parametry jednotlivých komunikací, tak i parametry poruch. Dále návrhem zjednodušeného matematického modelu baterie, který je využíván procesorem k výpočtu SOC a návrhem adaptace tohoto modelu v čase se zohledněním vlivů okolní teploty a stárnutí baterií.

6.1 Přehled komunikací BMS a jejich parametry

6.1.1 Komunikační protokol RS-485

Komunikace s μP_{bat} probíhá přes synchronní/asynchronní sériové rozhraní USART v asynchronním režimu podle standardu RS-485. BMS jednotka cyklicky oslovuje jednotlivé μP_{bat} jednotky zhruba jednou za sekundu. Vysílá požadavek velikosti 3 bity na data a obratem dostává odpověď velikosti 9 bitů, v případě že data nedostane do pěti sekund, vyhlásí chybu. Přijímaný paket je složen z osmi bitů nesoucích data a devátého bitu s adresou. Adresy jsou voleny s ohledem na dosažení velké Hammingovy vzdálenosti, pro zamezení nechtěné záměny adres vlivem chyby na komunikační lince.

Zařízení	Označení	Práva	Adresa
BMS jednotka	$\mu P3$	master	0x00
Měřicí jednotka č. 1	μP_{bat1}	slave	0x11
Měřicí jednotka č. 2	μP_{bat2}	slave	0x22
Měřicí jednotka č. 3	μP_{bat3}	slave	0x44
Měřicí jednotka č. 4	μP_{bat4}	slave	0x88

Tab. 6.1 Tabulka zvolených adres

Pro detekci chyb je na konci každého paketu přidán byte s cyklickým redundantním součtem (CRC – Cyclic Redundancy Check). Výpočet CRC je poměrně nenáročný a lze jej implementovat i v mikroprocesoru s menším výpočetním výkonem.

Zvolením vhodného polynomu dojde k detekci těchto chyb:

- Jakákoliv jednonásobná chyba kdekoliv v rámci 64-bitového čísla.
- Všechny dvoubitové chyby kdekoliv v rámci 64-bitového čísla.
- Jakýkoliv shluk chyb, který může být až 8 bitů velký.
- Většinu shluků chyb větších než 8 bitů.

V případě odhalení chyby se pak celý paket zahodí a BMS si o data žádá až v dalším kole. Zvoleným CRC kódem je polynom generující 8-bitový součet, který je označován jako Dallas/Maxim 8bit CRC a je určený především pro sériovou komunikaci po jednovodičové sběrnici. Přesná podoba polynomu je v rov. 2.

$$g(x) = x^8 + x^5 + x^4 + 1 \quad (2)$$

BMS jednotka odesílá pakety velikosti tři bitů. Paket začíná adresovým bitem, po něm následuje STATUS_BMS byte a zakončen je kontrolním součtem CRC. Struktura a význam proměnných v odesílaném paketu jsou popsány v tab. 6.2, resp. tab. 6.3.

Adresa	STATUS_BMS	CRC
--------	------------	-----

Tab. 6.2 Struktura odesílaného paketu

Byte	Bit	Označení	Význam
STATUS_BMS	0	Balancing	Bitová informace o snížení nabíjecího proudu
STATUS_BMS	1	Charge	0: režim jízda, 1: režim nabíjení
STATUS_BMS	2:7	-	reserved

Tab. 6.3 Proměnné a jejich význam v odesílaném paketu

Struktura a obsah přijímaného paketu jsou popsány v tab. 6.4 a tab. 6.5.

Adresa	U_bat_H	U_bat_L	TEMP_bat_H	TEMP_bat_L	STATUS_BAT	ERR_BAT	CRC
--------	---------	---------	------------	------------	------------	---------	-----

Tab. 6.4 Struktura přijímaného paketu

Byte	Bit	Označení	Význam
U_bat_L	0:7	-	Napětí baterie – low byte
U_bat_H	0:7	-	Napětí baterie – high byte
TEMP_bat_L	0:7	-	Teplota baterie – low byte
TEMP_bat_H	0:7	-	Teplota baterie – high byte
STATUS_BAT	0	BalancingRequest	1: požadavek na snížení nabíjecího proudu
STATUS_BAT	1	-	reserved
ERR_BAT	0	OverVoltage	Napětí větší než 16,5V
ERR_BAT	1	UnderVoltage	Napětí nižší než 10,5V
ERR_BAT	2	OverTemp	Přehřátí baterie $t > 40^{\circ}\text{C}$
ERR_BAT	3	OverTempBal	Přehřátí balančního tranzistoru
ERR_BAT	4	BalCurrentErr	Neočekávaný proud balančním tranzistorem
ERR_BAT	5	BalanceErr	Při balancování neklesá U_bat
ERR_BAT	6	TempErr	Chyba měření teploty baterie
ERR_BAT	7	TempBalErr	Chyba měření teploty balančního tranzistoru

Tab. 6.5 Proměnné a jejich význam v přijímaném paketu

Proměnná	Velikost	Typ	Formát	Rozsah	Násobič	Přepočet
U_bat	16 bit	unsigned	5.11	0; 31,9995	2048	2048 = 1V
TEMP_bat	16 bit	signed	8.7	-256; 255,992	128	128 = 1°C

Tab. 6.6 Formáty přijímaných hodnot

6.1.2 Komunikační protokol CAN

Control Area Network – CAN komunikace, využívá synchronní přenos s bitovou synchronizací doplněnou o PLL na straně přijímače. Je vhodná pro sběrníkovou strukturu „multimaster“. Tato komunikace je velmi rozšířená v automobilovém průmyslu a trakčních zařízeních pro svou velkou spolehlivost a vysokou rychlost přenosu. Četnost náhodných chyb v jednom rámci je udávána 10^{-3} a pravděpodobnost nezjištěné chyby 1/1000 let.

Vazební členy CAN mají otevřené kolektory, tedy jsou aktivní v 0. Logické stavy sběrnice jsou označovány jako „Recesivní“ (log. 1) a „Dominantní“ (log. 0).

CAN se dělí na dva základní typy definované standardy ISO 11898-2 a 3. Tyto standardy jsou High-speed CAN (max. 1MBd) a Low-speed CAN (max. 125kD), obecně je více využíván standard High-speed CAN. Tyto standardy jsou rozděleny do sedmi vrstev, z nichž se využívají pouze tři a to první fyzická vrstva, druhá linková a sedmá aplikační, to je např. CANOpen, nebo CAN Kingdom.

Při aplikaci na motokáře bude využíván CAN 2.0A, od CANu 2.0B se liší délkou rámce, resp. délkou identifikátoru, delší identifikátor je vhodný pro náročnější aplikace, nebo přenosy na delší vzdálenosti. Tvar rámce 2.0A je vidět v tab. 6.7.

[14]

Start	Identifikátor	RTR	IDE	r0	DLC	Data	CRC	ACK	EOF+IFS
1bit	11bitů	1bit	1bit	1bit	4bity	0-8 byte	15bitů	2bity	10bitů

Tab. 6.7 Datový rámeček CAN 2.0A

Více je k uspořádání datového rámce a významu zkratk jednotlivých polí rámce popsáno v [14], zde nemá smysl se tím zabírat. Tvar identifikátoru pro BMS $\mu P3$ je v tab. 6.8 shrnutí identifikátorů.

Název jednotky	Označení	Identifikátor
Jednotka řízení motoru	$\mu P1$	020h m_motor1
Jednotka displeje	$\mu P2$	100h m_disp1
Jednotka BMS	$\mu P3$	080h m_BMS1

Tab. 6.8 Identifikátory jednotlivých jednotek pro CAN

Přehled vysílaných proměnných jednotkou BMS na sběrnici CAN je zobrazen včetně popisu v tab. 6.9. Druh vysílaných zpráv je předmětem dalšího řešení s ohledem na možnou realizaci sdružené řídicí jednotky. V tomto případě by došlo k omezení počtu zpráv předávaných mezi μ P1 a μ P3.

Byte	Bit	Význam
I_bat		Proud baterie
U_bat1		Napětí baterie 1
U_bat2		Napětí baterie 2
U_bat3		Napětí baterie 3
U_bat4		Napětí baterie 4
TEMP_bat1		Teplota baterie 1
TEMP_bat2		Teplota baterie 2
TEMP_bat3		Teplota baterie 3
TEMP_bat4		Teplota baterie 4
SOC		State of Charge
STATE_req3	0:2	000: nothing, 001:SYSTÉM_OFF, 010: ERROR, 011: STANDBY, 100: CHARGE, 101: DRIVE, 111: TEST
ERR_3		Několik boolean pro různé chyby

Tab. 6.9 Proměnné a jejich význam v odesílaném paketu

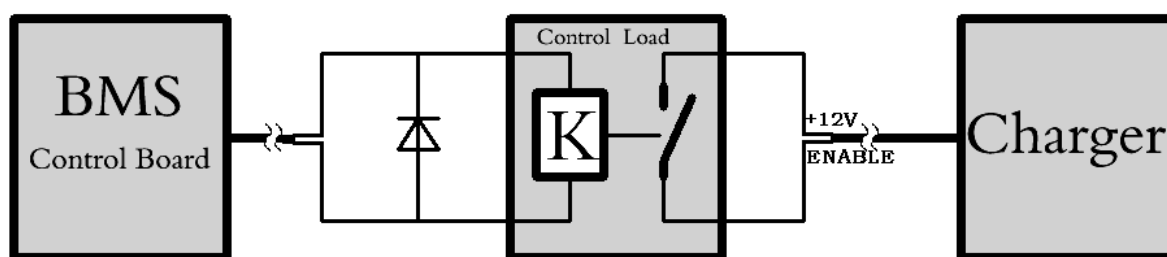
[17]

6.1.3 Komunikace s nabíječkou

Pro dobíjení byla zvolena nabíječka výrobce GWL/Power Charger for LiFe(Y)PO₄. Tyto nabíječky podporují dva druhy komunikace, pro zařízení bez periferie CAN umožňuje ovládání dobíjení třemi způsoby:

- Realy control – užitím rozpínacího kontaktu, když je kontakt sepnutý nedobíjí se a když je kontakt rozpojený dobíjí se plným proudem.
- Optoelektronickým spínačem – obdobný princip jako bod výše, ale s výhodou galvanického oddělení.
- 2-5V control – nastavení dobíjecího proudu probíhá ovládáním v rozsahu 2 až 5V které reprezentují 0-100% dobíjecího proudu.

Druhým způsobem ovládání nabíječky je CAN komunikace pro zařízení využívající tuto datovou sběrnici. V aplikaci pro elektromotokátu se využití CAN k ovládání nabíječky hodí. Výrobce bohužel neudává parametry komunikace a tvar DATA_byte, se kterým nabíječka komunikuje, zvolená komunikace bude nakonec „2-5V control“, pokud by se s výrobcem toto nepodařilo dořešit. Na schématu níže je zobrazeno ovládání nabíječky rozpínacím kontaktem relé, ze kterého je patrný princip ovládání.



Obr. 6.1 Blokové schéma ovládání nabíječky

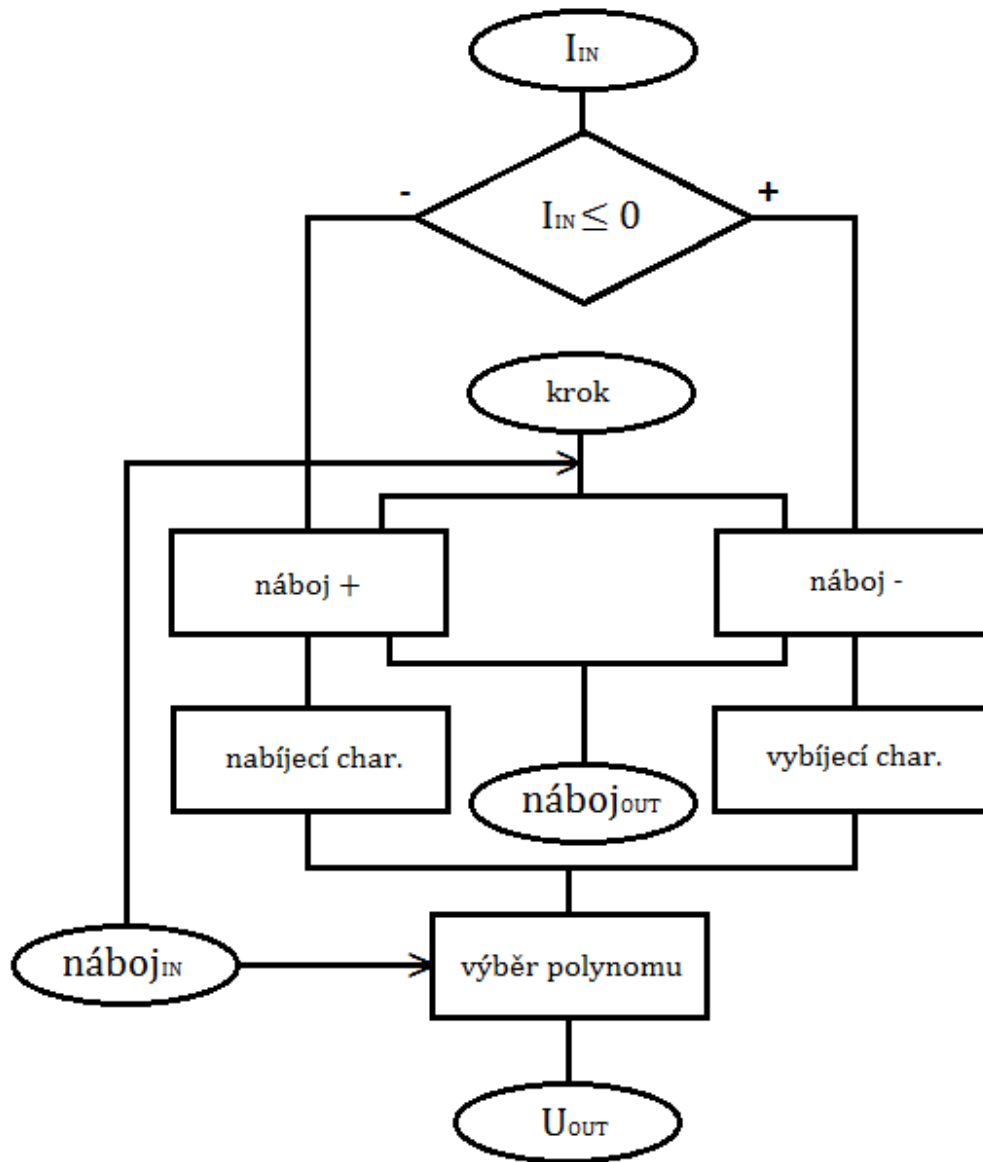
6.2 Zjednodušený matematický model baterie

Navrhovaný matematický model vychází z nabíjecích a vybíjecích charakteristik udávaných výrobcem baterie, tyto charakteristiky jsou vyobrazeny v příloze C. Návrh modelu spočívá v nalezení matematické funkce, která by odpovídala dané charakteristice baterie. Hledaná funkce bude platit pro určitý interval charakteristiky, ve kterém se očekává provoz baterie, intervaly podbití a přebití baterie hlídá BMS jednotka a není nutné charakteristiku v těchto intervalech aproximovat, tím dojde k ušetření počtu aproximačních polynomů a zjednodušení výpočtu pro procesor. Dalším zjednodušením je omezení modelu na základní vstupní a výstupní veličiny. Vstupními veličinami jsou proud, náboj a krok odečtu proudu. Výstupními potom jsou nový náboj a napětí. Toto zjednodušení nezahrnuje vliv okolní teploty, stárnutí baterie a samovybití na výstupní náboj a napětí.

Jak bylo již zmíněno, model se skládá ze dvou charakteristik, nabíjecí a vybíjecí. Obě jsou získány měřením a takto je udává výrobce. Výběr správné charakteristiky pro daný režim je na základě polarit proudu. Pro kladný proud se model chová dle nabíjecí charakteristiky a pro záporný proud dle vybíjecí charakteristiky. Z udávaných charakteristik bylo odečteno několik bodů, pro které se hledá vhodná polynomičká funkce, kterou budou tyto charakteristiky s přijatelnou přesností aproximovány. Přijatelná přesnost je hranicí mezi počtem aproximačních polynomů a odchylkou výsledné funkce od charakteristiky udávané výrobcem.

Protože udávané charakteristiky akumulátorů jsou velmi nelineární, je výsledná funkce složena ze dvou až tří různých polynomů, které platí pouze v mezích pracovní části charakteristiky, jak již bylo zmíněno výše.

Do modelu vstupuje proud baterie I_{IN} , jak je vidět na obr. 6.2 na str. 48. Na základě jeho polarit dojde k rozhodnutí, zda se jedná o nabíjecí nebo vybíjecí charakteristiku. Další vstupní veličinou je náboj, který se změní dle kroku a výpočtu a velikosti proudu. Proto je krok také vstupní veličinou. Dojde k volbě odpovídající charakteristiky a výběru vhodného polynomu reprezentujícího konkrétní část charakteristiky, dle vstupního náboje, pro odečtení napětí. Po odečtení se napětí upraví dle úbytku způsobeného proudem na vnitřním odporu baterie a výstupními veličinami jsou potom napětí a nový náboj.



Obr. 6.2 Blokové schéma matematického modelu baterie

Navržený model je schopen udávat vstupní proud pro případ nabíjení konstantním napětím v poslední fázi nabíjení. Z tohoto důvodu je model platný jen v napětovém rozsahu modelované baterie. To znamená, že tento rozsah je nutné dodržet a baterie dále nepřebíjet, o to se stará BMS jednotka a při dosažení mezního napětí baterie nabíjení ukončí.

6.3 Adaptační model baterie

Model baterie s adaptací respektuje stárnutí baterie a tepelný vliv okolí na elektrické parametry baterie. Princip spočívá v postupném ukládání aktuálních charakteristik a jejich průměrování klouzavým průměrem, tím dojde ve výsledku k zohlednění rozptylu charakteristik. Tento model je pro výpočet v systému BMS složitý a jeho přínos není v dané aplikaci tak významný proto, aby byl určen a zahrnut. BMS bez něj bude pracovat správně.

7 Závěr

Tato práce se zabývá komplexním návrhem BMS systému pro elektrickou motokáru. V úvodu práce a její první polovině je vytvořen přehled druhů Li-ion baterií. Součástí přehledu je popis základních vlastností konkrétních typů baterií a pro úplnost zmíněna jejich chemická příp. fyzikální struktura. V závěru této části je zmíněna nová technologie Li-S, která je zatím provozována v oblasti vývoje, ale slibuje do budoucna převrat na poli přenosných zdrojů elektrické energie.

Ve druhé polovině se práce zabývá návrhem hardwarového a softwarového řešení BMS. Během tohoto návrhu se naskytnulo řešení, se kterým zadání práce nekoresponduje. Toto řešení je ovšem z hlediska vývoje a konstrukce řídicích jednotek elektromobilů, za který se dá elektrická motokára považovat, nebo minimálně za jeho zmenšený model, daleko efektivnější a v reálné konstrukci i pravděpodobnější. Proto se práce od té části zabývá návrhem technického řešení BMS s ohledem na tuto skutečnost.

Práce je souborem teoretických poznatků, na základě kterých by měla být konstruována sdružená řídicí jednotka pro elektrickou motokáru. Zásadním poznatkem je v závěru možnost realizace sdružené řídicí jednotky a návrh její BMS části.

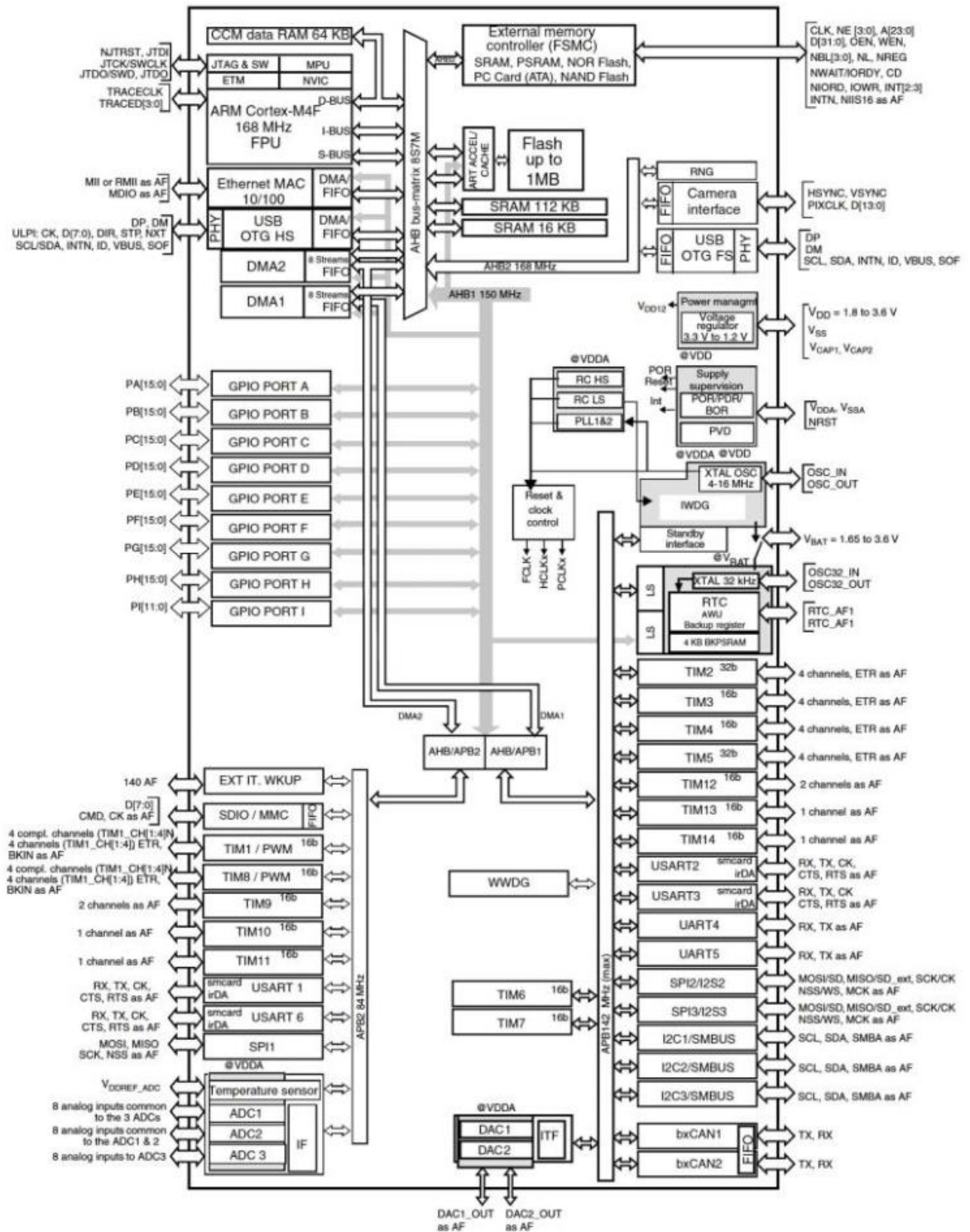
Použitá literatura

- [1] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 1996.
- [2] [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [3] [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery
- [4] [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
<http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/povery-a-myty-o-hermetickyh-akumulatorech/pametovy-efekt-memory-effect>
- [5] [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_management_system
- [6] [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:
<http://www.oxisenergy.com/technology>
- [7] [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z:
http://rema-ev.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/05/DC_Combo.pdf
- [8] [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z:
<http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/LN1848/PF252419>
- [9] [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z:
<http://www.farnell.com/datasheets/1785264.pdf>
- [10] [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADM3053.pdf

- [11] [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z:
<http://www.analog.com/en/interface-isolation/digital-isolators/adm2687e/products/product.html>
- [12] [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z:
<http://www.farnell.com/datasheets/30908.pdf>
- [13] BEDNÁŘ, Bedřich. *Implementace řízení pulzního měniče*. 2012. Diplomová práce. FEL ZČU. Vedoucí práce Ing. Luboš Streit.
- [14] PEROUTKA, Zdeněk. *Výběr z přednášek předmětu „Mikroprocesorové řízení pohonů“*. 2008.
- [15] [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z:
<http://www.ev-power.eu/Chargers-TC-1-5-kW/Charger-for-LiFe-Y-PO4-36V-90A-6-kW-TCCH-H43-8-90-SALE.html>
- [16] Winston Battery [online]. 2007 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z:
<http://en.winstonbattery.com>
- [17] KEV/FEL. Nepublikovaný článek. *Specifikace parametrů μP* . 2014.

Přílohy

Příloha A – Blokové schéma ARM Cortex-M4F



Zdroj: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf

Příloha B – Schéma zapojení ADM3053 a ADM2687E

[10] [11]

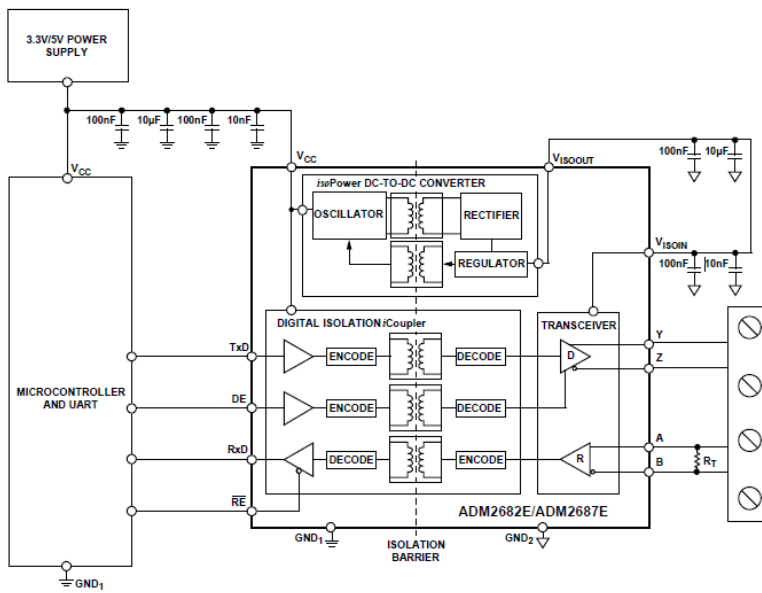


Schéma zapojení driveru pro RS485 (ADM2687E).

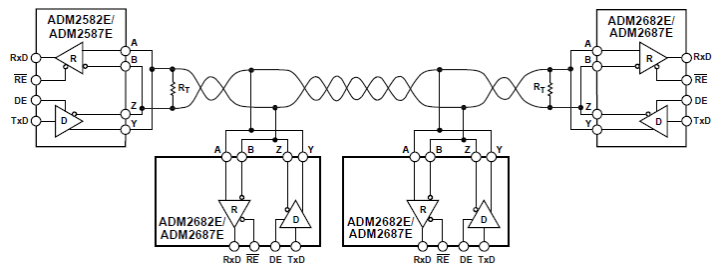


Schéma připojení driveru pro RS485 na sběrnici.

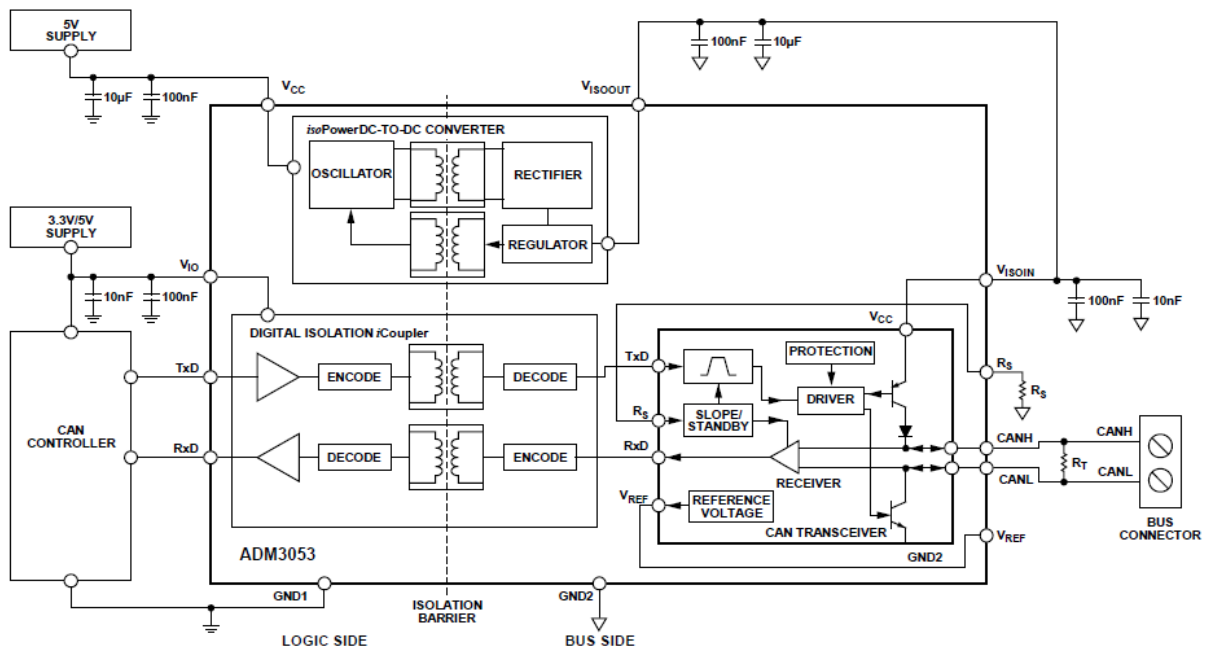


Schéma zapojení driveru pro CAN (ADM3053).

Příloha C – Nabíjecí a vybíjecí charakteristika LP12V80AH



Nabíjecí a vybíjecí charakteristika akumulátoru LP12V80AH při teplotě 25°C (převzato z [16]).

Příloha D/1 – Soubor RS485.c, Soubor RS485.h**RS485.c**

```
#include <stm32f4xx.h>
#include "RS485.h"
int main (void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    USART_InitTypeDef USART_InitStructure;
    USART_ClockInitTypeDef USART_ClockInitStruct;

    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_USART1, ENABLE);
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOA, ENABLE);

    /* Connect CAN pins to AF9 */
    GPIO_PinAFConfig(GPIOA, GPIO_PinSource9, 9);          // GPIO_Pin_9
    GPIO_PinAFConfig(GPIOA, GPIO_PinSource10, 10);        // GPIO_Pin_10

    /* Configure GPIOA RX and TX pins */
    GPIO_DeInit(GPIOA);
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_9 | GPIO_Pin_10;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP;
    GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);

    /* Configure USART */
    USART_DeInit(USART1);
    USART_InitStructure.USART_BaudRate=9600; // prenosova rychlost druheho zarizeni
    USART_InitStructure.USART_WordLength=USART_WordLength_9b; // lze ..._8b
    USART_InitStructure.USART_StopBits=USART_StopBits_1;
    USART_InitStructure.USART_Parity=USART_Parity_Even;
    USART_InitStructure.USART_Mode=USART_Mode_Rx;
    USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl=USART_HardwareFlowControl_RTS;
    USART_Init(USART1, &USART_InitStructure);

    /* Configure USART Clock */
    USART_ClockInitStruct.USART_Clock=USART_Clock_Enable;
```



```

    USART_ClockInitStruct.USART_CPOL=USART_CPOL_High ; // prizpusobit se slave
(trvale1/nyni)
    USART_ClockInitStruct.USART_CPHA=USART_CPOL_High; // pri 1/nyni
    USART_ClockInitStruct.USART_LastBit=USART_LastBit_Disable;
    USART_ClockInit(USART1, &USART_ClockInitStruct);

    USART_Cmd(USART1, ENABLE);
}

```

RS485.h

```

#ifndef RS485_H_
#define RS485_H_

#define POLYNOMIAL 0x131 //P(x)=x^8+x^5+x^4+1
#define ADRMAS 0x00 //MASTER ADDRESS
#define ADR1 0x11 //ADDRESS
#define ADR2 0x22
#define ADR3 0x44
#define ADR4 0x88
#define REQ_BYTES 3 //pocet bytů požadavku
#define RES_BYTES 8 8 //pocet bytů odpovědi

// DEFINE ERROR BITS
#define OVERVOLTAGE 0
#define UNDERVOLTAGE 1
#define OVERTEMP 2
#define OVERTEMPBAL 3
#define BALCURRENTERR 4
#define BALANCEERR 5
#define TEMPERR 6
#define TEMPBALERR 7

// DEFINE STATUS BITS
#define BALREQUEST 0

unsigned char CheckCrc (unsigned char data[], unsigned char nbrOfBytes);

#endif /* RS485_H_ */

```

Příloha D/2 – Soubor bxcan.h

```
#ifndef __STM32F4_CAN_INITIALIZE
#define __STM32F4_CAN_INITIALIZE

#include <stm32f4xx.h>

/* Defines*/
#define STATE_OK    0x00
#define STATE_KO    0x01

#define CAN1_NUM    0x01
#define CAN2_NUM    0x02

#define FALSE       0x00
#define TRUE        0x01

#define INAK_TIMEOUT 0x0000FFFF
#define SLAK_TIMEOUT 0x0000FFFF

/* Prototype */
uint8_t CAN1_init(void);
uint8_t CAN2_init(void);
void FILTERS_CAN_init(void);
void GPIOB_CAN_init(uint8_t can_number);

#endif
```