

Diplomová práce

Návrh systému pro dohled a vyrovnávání dobíjení trakčního akumulátoru

Michal Richter



Květen 2015

zadavatel: Ing. Petr Laciga PhD., Poll s.r.o.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, Katedra pohonů a trakce K13114

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Michal Richter**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: Návrh systému pro dohled a vyrovnavání dobíjení trakčního akumulátoru

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte analýzu požadavků pro dohled a řízení vyrovnavání dobíjecího napětí pro trakční akumulátor elektrobusu (BMS – Battery Management Systém).
2. Navrhněte blokovou strukturu systému BMS
3. S využitím dostupných komponentů navrhněte funkční vzorek pro jednu elementární skupinu článků
4. Otestujte funkčnost jednotlivých částí vzorku

Seznam odborné literatury:

- [1] Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P.: Power Electronics; John Wiley & Sons, New York; 1995;
- [2] Rashid, M. H.: Power Electronics; Prentice Hall 1992;
- [3] Holmes, D. G., Lipo, T. A., Pulse Width Modulation For Power Converters, IEEE Press, 2003, ISBN 978-0-471-20814-3
- [4] Dokumentace regulačního systému POLL

Vedoucí: Ing. Petr Laciga, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014

Poděkování

Tato práce by nemohla vzniknout bez odborné pomoci lidí, kterým bych chtěl touto formou poděkovat.

Nejdříve bych rád vyjádřil své srdečné poděkování vedoucímu práce Ing. Petru Lacigovi, Ph.D. za svědomité směřování mé činnosti a odbornou pomoc.

Rovněž děkuji všem zaměstnancům společnosti Poll s.r.o., kteří mi vždy ochotně nabídli pomocnou ruku, nejvíce vděčím Ing. Jiřímu Semerádovi, Ing. Petru Dobrovolnému, Martinu Ondráčkovi a Ing. Martinu Makovičkovi.

Také bych chtěl na tomto místě poděkovat rodině, přátelům i všem ostatním, kteří mě při tvorbě této práce jakkoli motivovali a podporovali.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 11. května 2015

.....

Abstrakt

Richter, M.: Návrh systému pro dohled a vyrovnávání dobíjení trakčního akumulátoru
Diplomová práce, Praha 2015

Tato práce si klade za cíl navrhnout systém pro dohled a vyrovnávání dobíjení trakčního akumulátoru (BMS) pro elementární skupinu článků.

V úvodu práce naleznete stručný vysvětlení akronymu BMS, význam tohoto systému a popis možných aplikací. Dále v rámci teoretické části je uveden rozbor možných způsobů akumulace energie, výběr nejvhodnějšího a zdůvodnění této volby. Před detailnějším pohledem na BMS se ještě nachází hlubší popis Li-Ion akumulátorů s upozorněním na vlastnosti důležité pro systém zajišťující jejich správu. Posléze je nabídnut jednoduchý fyzikální model vozidla, jenž společně se simulací chování baterie a parametrech trati, tvoří základ pro odhad velikosti baterie elektrobuse.

Další části se věnují nejprve obecným aspektům BMSky a později jejímu návrhu. Koncept začíná blokovou strukturou s popisem jednotlivých částí a končí hlavním bodem práce, tj. balancérem. Podrobněji se věnují právě nejdůležitější části systému pro vyrovnávání napětí článků, kterou tvoří DC/DC měnič. Zvolený typ měniče (FLYBACK) si před výrobou vyžádal výpočet parametrů a simulaci funkce.

Pro ověření návrhu též posloužila dvojice realizovaných měničů a malé měřicí NMC články.

Naposledy závěr upravuje návrh na základě měření a poskytuje inspiraci ke zdokonalení balancéru.

Klíčová slova

EV, elektromobil, elektrobuse, e-bus, Lion trakční akumulátor, balancér, aktivní balancování, pasivní balancování, BMS, Blokující měnič ,diplomová, závěrečná práce

Abstrakt

Richter, M.: Design of the System for Monitoring and Ballancing of Charging of the Traction Battery

Master´s thesis, Prague 2015

This paper aims to propose a system for monitoring and balancing of charging the traction battery (BMS) and test it for a small group of secondary cells.

The introduction is a brief explanation of the acronym BMS, the importance of this system and a description of possible applications. Furthermore the theoretical part contains an analysis of possible ways of energy storage, how to choose the most suitable one of them and justification of the choice. Before a more detailed look at BMS the paper offers deeper description of the Li-Ion battery properties, which are a very important aspect for BMS. Afterwards the paper offers a simple physical model of a vehicle that together with simulation of the battery behavior and road conditions represent the core for estimate the size of electrobus battery.

Moreover the paper concentrates on the general aspects of the BMS and its possible design. The concept begins with a block structure with a description of its individual parts and ends with the main part of the thesis, a balancer. The thesis also puts special detail on the most important parts of the system for voltage cells equalization which consists of DC/DC converter. The chosen converter – FLYBACK demanded a series of calculations and simulation of the function before its creation.

For the verification of the proposal was also used a pair of realized converter and small measuring NMC cells.

The conclusion adjusts the proposal based on the measurement and provides inspiration for improvement of the balancer.

Keywords

EV, electric vehicle, electric bus, e-bus, Lion traction battery, balancer, active balancing, passive balancing, BMS, Flyback, diploma, final work

Obsah

1. Úvod	1
1.1. Elektrobusy z ekonomického pohledu	3
1.2. O společnosti Poll, s.r.o.	5
I. Akumulátory vhodné pro trakční baterii	6
2. Výběr vhodné technologie	7
2.1. Nomenklatura	7
2.2. Základní požadavky na akumulátorový článek pro trakční baterii	7
3. Popis zvolené technologie	9
3.1. Lithiové akumulátory	9
3.1.1. Li-ion	9
3.1.2. Li-pol	10
3.1.3. Bezpečná pracovní oblast (SOA)	10
3.1.4. Životnost	11
3.1.5. Náhradní schéma elektrochemického článku	11
3.1.6. Nevybalancované napětí stringu	12
3.1.7. $LiFePO_4$	13
3.1.8. $Li_4Ti_5O_{12}$	13
II. Návrh Baterie Elektrobusu	14
4. Elektrobusy z hlediska hospodaření s energií	15
4.1. Rychlonabíjení	15
4.2. Další možnosti	16
4.3. Zvolená varianta elektrobusu	16
5. Výpočet základních parametrů trakční baterie	17
5.1. Model vozidla	17
5.1.1. Newton-Cotesovy kvadraturní vzorce	18
5.2. Parametry uvažovaného vozu	19
5.3. Model baterie	20
5.4. Modelová trať	21
5.4.1. Model využívající kartografické údaje	21
5.4.2. Reálná data z průjezdu trati	22
5.5. Informace od dopravního podniku	24
6. Volba základních parametrů baterie	25
6.0.1. Základní vztahy pro výpočty parametrů baterie	25
6.0.2. Volba parametrů	25
III. BMS	27
7. Battery Management System	28
7.1. Udržení jednotlivých článků v SOA	28

7.2. Monitoring baterie	28
7.2.1. SOC	28
7.2.2. DOD	32
7.2.3. SOH	32
7.3. Balancování	33
7.3.1. Pasivní balancování	34
7.3.2. Aktivní balancování	34
7.3.3. Aktivní vs. pasivní balancování	35
7.3.4. Souhrn důležitých poznatků o balancérech	36
7.4. Nabíjení	36
7.4.1. Algoritmy pro nabíjení Li-ion akumulátorů	36
7.5. Funkce a části BMS	38
7.5.1. Měřicí obvody	38
8. Klasifikace BMS	39
8.1. Rozdělení BMS podle funkce	39
8.2. Rozdělení BMS podle technologie	39
8.3. Rozdělení BMS podle topologie	40
IV. Zvolený koncept BMS	42
9. Bloková struktura	43
9.1. Výběr BMS ICs a MCU	44
9.1.1. BQ76PL536A	45
9.1.2. MSP430F5529	45
9.2. Upřednostněný způsob balancování	45
9.2.1. Argumenty pro volbu aktivního balancéru	46
9.2.2. Popis navrženého balancéru	46
9.2.3. Technika balancování publikovaná v [27]	47
9.2.4. Výpočet maximálního proudu balancéru	48
10. DC/DC měnič pro balancování	50
10.1. Blokující měnič (FLYBACK)	50
10.1.1. Transformátor pro flyback měnič	51
10.2. Návrh měniče	53
10.2.1. Bližší popis činnosti blokujícího měniče	54
10.2.2. Volba parametrů měniče	56
10.2.3. Volba spínacích součástí	56
10.2.4. Volba pasivních prvků	57
10.2.5. Návrh transformátoru	57
V. Ověření funkce návrhu	60
11. Ověření návrhu měniče	61
11.1. Popis přípravku a měřicího pracoviště	61
11.1.1. Řídící pulzy	61
11.1.2. Akumulátorové články	62
11.2. Naměřené hodnoty	62

VI. Závěr	66
12. Shrnutí a zhodnocení	67
Přílohy	
A. Příklady konkrétních produktů pro e-mobilitu v MHD	69
B. Model Lion článku a 80-ti článkové baterie v MATLABu	70
C. Jízdní řád pražské autobusové linky 216	72
D. Účinnost regenerativního brzdění RWD elektrických vozů	73
E. Blokový diagram BMS s čipy od TI	74
F. Schéma funkčních bloků BQ76PL536A	76
G. Realizace měřící DPS s BMS ICs	77
H. Blokovací měnič - princip	82
I. Flyback v Simulinku	86
J. Obsah přiloženého DVD	88
Literatura	89

Seznam obrázků

1.	Motocykl s elektrickým pohonem	2
2.	Porovnání spotřeby energie vozů MHD s různými pohony	4
3.	Porovnání nákladů na trakční palivo a energii	4
4.	Porovnání celoživotních nákladů	5
5.	Porovnání z hlediska specifické a objemové hustoty energie[7]	7
6.	Základní rozdělení lithiových akumulátorů[11]	9
7.	Ekvivalentní elektrické modely pro Li-Ion články[12]	11
8.	R_i v závislosti na různých faktorech[12]	12
9.	Elektrický autobus s vyměnitelnou baterií [14]	16
10.	Síly působící na vozidlo [15]	17
11.	Trať pražské autobusové linky číslo 216 [18]	21
12.	Trať pražské autobusové linky 216 (vzd. počítána od Bořislavky)	22
13.	Naměřená a vypočtená data pro jízdu ve směru Poliklinika Petřiny	23
14.	Naměřená a vypočtená data pro jízdu ve směru Bořislavka	24
15.	Vztah OCV a SOC NMC LiPol článku	30
16.	Kalmanův filtr v aplikaci odhadu SOC baterie [22]	31
17.	Ukázka nevybalancované baterie a balancování při různém SOC [12]	33
18.	Princip pasivního balancování [23]	34
19.	Techniky aktivního balancování [12]	35
20.	Zmařená energie při aktivním a pasivním balancování [12]	36
21.	CCCV nabíjecí charakteristika	37
22.	Porovnání analogové a digitální BMS [12]	40
23.	Distribuovaná topologie BMS [12]	43
24.	Blokové schéma BMS	44
25.	Principiální zapojení navrhovaného aktivního balancování	47
26.	Principiální schéma balancéru publikovaném v [27]	47
27.	Jednočinný blokující měnič [29]	50
28.	Sycení jádra jednočinného (vlevo) a dvojčinného měniče (vpravo) [29]	51
29.	Transformátor jako dvě magneticky vázané cívky (lineární model) [29]	52
30.	Tvar a rozměry feritu	59
31.	Schéma zjednodušeného magnetického obvodu	59
32.	2 realizované blokující měniče	61
33.	Přípravek s „nakontaktovanými“ články [11]	62
34.	Průběh balancování 2 NMC článků	63
35.	Průběh balancování 2 NMC článků - celková účinnost	64

36.	Celková účinnost jako funkce rozdílu napětí balancovaných akumulátorů	64
37.	Frekvenční závislost proudu primárním vinutím a celkové účinnosti . . .	65
38.	Kombinovaný nabíjecí systém pro e-busy	69
39.	RC model článku [31]	70
40.	Model Lion baterie [31]	71
41.	Model Lion baterie - detail [31]	71
42.	Jízdní řád linky 216 ve směru Poliklinika Petřiny [32]	72
43.	Rozložení brzdné síly mezi nápravy [19]	73
44.	Schéma zapojení BMS a komunikace komponent [33]	74
45.	Detail zapojení BMS ICs [33]	75
46.	Schéma funkčních bloků BQ76PL536A [33]	76
47.	Zapojení článků [33]	77
48.	Zapojení termistoru [33]	77
49.	Doporučené zapojení bq76pl536a 1/4 [33]	78
50.	Doporučené zapojení bq76pl536a 2/4 [33]	79
51.	Doporučené zapojení bq76pl536a 3/4 [33]	80
52.	Doporučené zapojení bq76pl536a 4/4 [33]	81
53.	Jednočinný blokující měnič – schéma a průběhy [29]	82
54.	Časový průběh proudu I_1 (Flyback simulace)	83
55.	Časové průběhy při vybíjení kondenzátoru (přenos energie na primár) .	84
56.	Časové průběhy blízké rovnovážnému stavu	85
57.	Flyback v Simulinku	86
58.	2 blokující měniče v Simulinku	87

Seznam tabulek

1.	Porovnání parametrů vybraných technologií sekundárních článků[8] . . .	8
2.	Parametry elektrobuse SOR EBN 8 udávané výrobcem [17]	19
3.	Další parametry elektrobuse	20
4.	Vypočtená spotřebovaná energie e-busem	23
5.	Metody výpočtu SOC [21]	29
6.	Porovnání DOD a SOC [12]	32
7.	Doporučené použití aktivního balancování	35
8.	Porovnání topologií BMS [12]	41
9.	Srovnání perspektivních technologií aktivního balancování [27]	46

Zkratky

C- & Ca-	Při popisu baterií se často vyjadřuje vybíjecí proud v jednotkách C. Jde o normalizaci proudu vzhledem ke kapacitě baterie . C- vyjadřuje rychlost vybíjení baterie, konkrétně 1 C reprezentuje proud, kterým se baterie zcela vybije za 1 hodinu. Pro 5 Ah baterii jednomu C odpovídá proud 5 A. E- potom představuje hodnotu vybíjecího výkonu, definován je obdobně.
DOD (%)	DOD neboli „Depth of Discharge“ je definována jako kapacita, která byla vybita nebo chcete-li spotřebována, vyjádřena jako procento z maximální kapacity . Pokud je DOD větší než 80 % hovoříme o tzv. „hlubokém“ vybití.
SOC (%)	SOC neboli „State of Charge“ představuje procentuální stav nabití, jinými slovy vyjadřuje aktuální kapacitu jako procento kapacity maximální . Obvykle se změna kapacity určuje z časové integrace proudu.

Pojmy - akumulátory

Cyklická životnost	Počet nabíjecích-vybíjecích cyklů , za který poklesne kapacita baterie na 80% původní hodnoty. Je možné se setkat i s jinými definicemi, podstata je však vždy stejná - je to určitý počet cyklů, za který dojde k určitému zhoršení parametrů akumulátoru.
Jmenovitá energie (Wh)	Vyjadřuje energetickou kapacitu baterie. Měří se od 100 % SOC do ukončovacího napětí a udává se při konkrétní hodnotě vybíjecího proudu.
Jmenovitá kapacita (Ah)	Jde o kapacitu vyjadřující celkový náboj baterie . Zcela shodně se jmenovitou energií se měří od 100 % SOC do ukončovacího napětí a udává se při konkrétní hodnotě vybíjecího proudu.
Jmenovité napětí (V)	Těž nominální či referenční napětí je stanoveno normou a bývá uvedeno na baterii. Jeho velikost se přibližně rovná průměrnému napětí při vybíjení za standardních podmínek .
Napětí naprázdno (V)	Napětí naprázdno naměříme mezi svorkami baterie bez zatížení. Roste se zvyšujícím se SOC. Lze se setkat se zkratkami U_{oc} nebo V_{oc} .
Svorkové napětí (V)	Napětí mezi svorkami baterie a zátěží. Mění se s SOC a nabíjecím/vybíjecím proudem.
Ukončovací napětí(V)	Minimální povolené napětí . Obvykle definuje prázdný stav baterie (0 % SOC)
Vnitřní odpor(Ω)	Vnitřní odpor baterie R_i se obecně liší pro stav nabíjení a vybíjení. Dále závisí na SOC, často se také používá jako ukazatel opotřebení. Určuje „tvrdotu“ zdroje, tedy pokles svorkového napětí při zatížení . Se zvyšujícím se odporem klesá účinnost a teplotní stabilita.

CCCV nabíjení	Jedná se o standardní režim nabíjení, který probíhá nejdříve ve fázi CC (Constant Current) a při dosažení maximálního dovoleného napětí článku přechází do režimu CV (Constant Voltage).
---------------	--

Pojmy - elektrické vozy

CFO	Catenary-free operation = technologie umožňující trolejbusům a jiným vozidlům závislé trakce částečný provoz také mimo síť trakčního vedení.
E-bus (elektrobus)	Elektrický autobus, jehož zdrojem trakční energie jsou akumulátory, kondensátory nebo jiný akumulovatelný zdroj.
Noční elektrobus	Elektrobus s kapacitou zdrojů energie dostačující k tomu, aby byly při běžném provozu dobíjeny pouze jednou mezi ukončením a začátkem denního provozu (noční dobíjení).
Oportunitní elektrobus	Též průběžně dobíjené elektrobusy, s takovou kapacitou zdrojů energie, která kromě nočního dobíjení vyžaduje za normálních podmínek dobítí také během provozu.
FC-bus	Elektrický autobus, jehož zdrojem trakční energie je palivový článěk.
Hybridní autobus	Elektrický autobus, jehož pohon kombinuje elektrický motor a spalovací motor, přičemž nevyužitá elektrická energie je ukládána do akumulátorů; hybridní autobusy zahrnují
Sériový hybrid	Hybrid s nápravou poháněnou pouze elektromotorem, přičemž spalovací motor slouží pouze k výrobě energie.
Paralelní hybrid	Hybridy, u nichž je do pohonu alternativně zapojován elektromotor nebo spalovací motor s mechanickým převodem.
Plug-in hybrid	Autobusy, u nichž jsou akumulátory dobíjeny z vnějších zdrojů, jejich kapacita umožňuje zapojit elektrický pohon v nadpoloviční délce trasy a spalovací motor slouží ke zvětšení dojezdové vzdálenosti.

Anglické zkratky

CAN	Controller Area Network
DSP	Digital Signal Processor
EDLC	Electric Double Layer Capacitor
ESR	Equivalent Series Resistance
EV	Electric Vehicle
FCV	Fuel Cell Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
IC	Internal Combustion
ICE	Internal Combustion Engine
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPM	Intelligent Power Module
IC = IO	Integrated Circuit
LPF	Low Pass Filter

MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
OCV	Open Circuit Voltage
PCB = DPS	Printed Circuit Board
PWM	Pulse Width Modulation
SC	Supercapacitor
SOA	Safe Operating Area

Symbols

$B (T)$	Magnetická indukce
$C_d (Ah)$	Disponibilní kapacita baterie
$C (F)$	Elektrická kapacita, elektrický náboj vztažený na jednotku elektrického potenciálu
$D (C \cdot m^{-2})$	Elektrická indukce
$E (V \cdot m^{-1})$	Intenzita elektrického pole
$f (Hz)$	Frekvence
$H (A \cdot m^{-1})$	Intenzita magnetického pole
$I (A)$	Elektrický proud
I_f	Elektrický proud v propustném směru
$J (A \cdot m^{-2})$	Proudová hustota
$L (H)$	Indukčnost
$L_{12} = M$	Vzájemná indukčnost
$P (W)$	Výkon
$R (\Omega)$	Elektrická odpor
R_i	Vnitřní odpor
$s (-)$	Střída
$T (s)$	Perioda
$U = V (V)$	Napětí
U_f	Napětí v propustném směru
$U_{co} = V_{co}$	Open Circuit Voltage = napětí naprázdno
$U_{oc} = V_{oc}$	Cut Off Voltage = ukončovací napětí, hranice přerušování obvodu
$\delta (m)$	Hloubka vniku
$\mu (H \cdot m^{-1})$	Permeabilita
$\mu_r (-)$	Relativní permeabilita
$\phi (rad)$	Fáze
$\Phi (Wb)$	Magnetický tok
$\Psi (Wb)$	Spražený magnetický tok
$\rho (\Omega \cdot m)$	Rezistivita = měrný odpor
$\sigma (-)$	Činitel tvaru
$\Omega (rad \cdot s^{-1})$	Úhlová frekvence

1. Úvod

Elektronické systémy pro dohled a vyrovnávání napětí v průběhu nabíjení i vybíjení (BMS) představují nutnou součást moderní trakční baterie. Výkon a životnost elektrochemických zdrojů obecně silně závisí na provozních podmínkách. Každý jednotlivý článek vyžaduje pro optimální funkci splnění specifických požadavků. V důsledku nároků na napětí a výkon trakční baterie se jednotlivé články řadí do sérií případně i paralel. Nyní je důležité si uvědomit, jaké problémy takto vytvořená baterie přináší. Když opomenou nároky na konstrukci bateriového boxu, které souvisí například s požadavkem na chlazení (nejlépe rovnoměrné) nebo nehořlavostí a jinými kvalitami použitých materiálů, zůstane řada jiných obtíží přímo související s použitím více než jednoho akumulátorového článku. Vložím-li velkou důvěru ve výrobce akumulátorů a uvěřím, že jsou schopni se dostatečně přiblížit ideálnímu stavu, kdy každý článek daného typu je naprosto shodný, dostanu se možná na první pohled do stavu, kdy některé základní činnosti BMSky odpadnou. Abychom ale mohli s klidným svědomím vypustit část systému zodpovědnou za balancování rozdílů napětí jednotlivých článků, museli bychom mít nejen ideální články, ale též ideální provozní a skladovací podmínky. Základní parametry akumulátorů, mezi které lze řadit například vnitřní odpor, jsou funkcí teploty nebo tlaku, též závisí na historii článku a momentálním elektrickém zatížení. Nakonec ani u zaparkovaného vozu nelze počítat s časovou invariancí článků. Prakticky vždy bude přítomno samovybíjení, které opět závisí na množství faktorů. Tudíž elektromobil, který večer uložíme do garáže s ideálně vybalancovanou baterií může už ráno vyjet za poněkud jiné situace. Trakční baterie běžně čítající více než 100 akumulátorových článků a bez BMS se tak neobejdou.

Význam elektroniky spravující baterie složené z mnoha článků jde ruku v ruce s vývojem automobilového průmyslu, ten se v 21. století ubírá směrem snižování emisí a postupně se snaží vyvázat z přímé závislosti na fosilních palivech. V posledních letech čí dál tím více toto odvětví spěje k návratu k elektrickému pohonu, jehož historický problém spočíval zejména v akumulaci elektrické energie. Vedle elektrického pohonu existují i další alternativy, z nichž poměrně populární se staly motory spalující vodík za vzniku vody. Výroba vodíku se ovšem stále jeví jako příliš nákladná a neefektivní, tím spíše z hlediska celkové účinnosti systému začínající výrobou vodíku a konče jeho spalováním. Elektrické vozy v konečném důsledku též nelze považovat za systém s nulovými emisemi, také zde figuruje výroba elektrické energie spolu s příslušnou mírou znečištění. Nicméně z pohledu ekologického se mohou elektromotory pochlubit nezanedbatelnou předností v podobě účinnosti trakčního systému. Samotný elektrický motor má v porovnání se spalovacím více než dvojnásobnou účinnost (90% i více), které navíc netrpí tak významnou závislostí na pracovním bodu motoru.

Druhé desetiletí jednadvacátého století pro dopravní průmysl znamená množství inovací, které by mimo jiné mohly umožnit jednotlivým společnostem se výrazněji odlišit od konkurence. Tlak na vývoj nových technologií vyvíjený ze stran vlád zavázaným k pomoci globální ekologické situaci by tak mohl přinést i jiné konsekvence mimo pořadě žádaného zlepšení životního prostředí. Výraznější odlišnost v nabídce nových

1. Úvod

automobilů by mohla vést k citelnému nárůstu poptávky po nových vozech, což by celému dopravnímu odvětví mohlo pomoci zlepšit postavení na trhu. Lze tedy očekávat určitý boom, který bude moci nastat po dalším vývoji možností akumulace elektrické energie. Tím se dostávám zpět k BMS a bateriím, které jsou v této záležitosti klíčové. Z technického hlediska mají ještě bateriové systémy nemalý prostor pro zlepšení. Rozšíření elektromobilů ale brání především cena akumulátorů. Pokud by v současné době významně poklesla cena Lion baterií, pak by poptávka po elektromobilech zřejmě vystřelila vzhůru ihned. A masivnímu rozšíření elektromobilů na silnicích by bránila zejména infrastruktura (nedostatek dobíjecích stanic).

S ohledem na cenu baterií a možnosti efektivního skladování energie se vyvíjí přednostně hybridní vozy. Hybridy nejčastěji kombinují diesellový motor s elektromobilem a $LiFePO_4$ bateriemi. Spíše výjimku tvoří vozy se setrvačníky nebo energií akumulovanou ve stlačeném vzduchu. Bohužel i čistě elektrické vozy zatím netvoří významné procento ve světovém vozovém parku. To ovšem neznamená, že na poli elektrovozů (EV) nenalezneme žádného perspektivního výrobce, jako příklad poslouží Tesla se svým proslaveným Modelem S. Dokonce se začínají objevovat motocykly s elektrickým pohonem.¹

Pokud se týká autobusů, zůstává situace v zásadě podobná jako u osobních vozů. V tuto chvíli dopravci nejvíce využívají různá hybridní řešení s dojezdem na baterii okolo 10 km. Ty pronikají především do městského a příměstského provozu. Například hybridní Volvo 7900 je o 37 % úspornější než odpovídající diesellové varianty. Jedná se o paralelní hybrid, obě jednotky mohou pracovat nezávisle na sobě. Elektromotor obvykle vozidlo rozpohybuje na rychlost okolo 20 km/h, potom se přidá motor vznětový. Obrovský benefit nabízí hybridní ústrojí díky možnosti rekuperaci energie. Při brzdění se elektromotor změnil v generátor, který dodává elektrickou energii akumulátorům. Dalším stupněm úspor je přechod na plug-in elektrobusesy, které mají dojezdovou vzdálenost pouze okolo 150 km, vynikají však rychlostí dobíjení akumulátorů v řádu jednotek minut.

¹BRD Motorcycles [1], Alta Motors [2]



Obrázek 1. REDSHIFT SM s elektrickým pohonem, výkonem 40 HP, kapacitou akumulátorů 5,2 kWh, dojezdovou vzdáleností 80 km, maximální rychlostí 135 km/h a váhou 120 kg [2]

² Rychlost dobití akumulátorů je ale obvykle vyvážena jiným parametrem - u LTO se jedná o nižší měrnou energii (kWh/kg), nemluvě o ceně.

Baterie podobné těm v hybridních autobusech mohou plnit i jinou funkci, uplatňují se v trolejbusích nebo tramvajích jako součást systému nouzového pohonu. Ten nabírá na významu ve chvíli poškození trakčního vedení, ztráty napájení nebo nutnosti změny trasy linky (výluka). Nezávislý zdroj napájení může mít následující podobu: [4]

- motor-generátor
- superkondenzátor
- akumulátorová baterie
- jiné zdroje - palivový článek, elektromechanický setrvačnick

První možnost stále dominuje svým nejvyšším procentuálním zastoupením. Výhody jsou zřejmé, jedná se o osvědčené řešení s prakticky neomezeným dojezdem a flexibilitou vozidla. Avšak použitím diesellového motoru ztrácíme výhody elektrického pohonu. Podle dopravních podniků jsou také četné případy zbytečného používání diesellového motoru i v místech troleje. A nevhodné použití je možné i ze strany dopravního podniku, kdy se hybridní trolejbusy s nouzovým systémem motor-generátor používají na trasách, které nejsou plně pokryty elektrickým vedením a kde by i ekonomicky přijatelnější byla výstavba zbytku troleje. [4] Další možnost představuje superkondenzátor s vynikající dynamikou umožňující velmi rychlé dobití i vybití. Oproti akumulátorům si spolu s typickou výhodou v podobě dynamiky nese i své stinné stránky. Jednotlivé superkondenzátory mohou dosahovat řádově i stovek Faradů, ale pouze při nízké hladině napětí (jednotky Voltů). Přestože kapacita se oproti běžným kondenzátorům zmnohonásobila, uložená energie povyrosla podproporcionálně ($\frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$). Při sériovém řazení, jak známo, klesá kapacita. Tedy vzhledem k reálným možnostem skládání superkondenzátorových baterií získáváme tímto způsobem nouzové napájení prakticky schopné dojezdů nižších než 1 km. O superkondenzátoru se tak častěji uvažuje jako o možnosti snížení spotřeby v případě rekuperace při brzdění do superkondenzátorové baterie a přednostního použití této energie pro následný rozjezd. V této aplikaci se také využije doposud opomenuté výhody. Ve srovnání s akumulátory mají superkondenzátory podstatně vyšší cyklickou životnost, která se řádově pohybuje v milionech cyklů. Vhodným kompromisem se mohou stát elektrochemické baterie s dostatečnou délkou dojezdu při zachování bez-emisní dopravy.

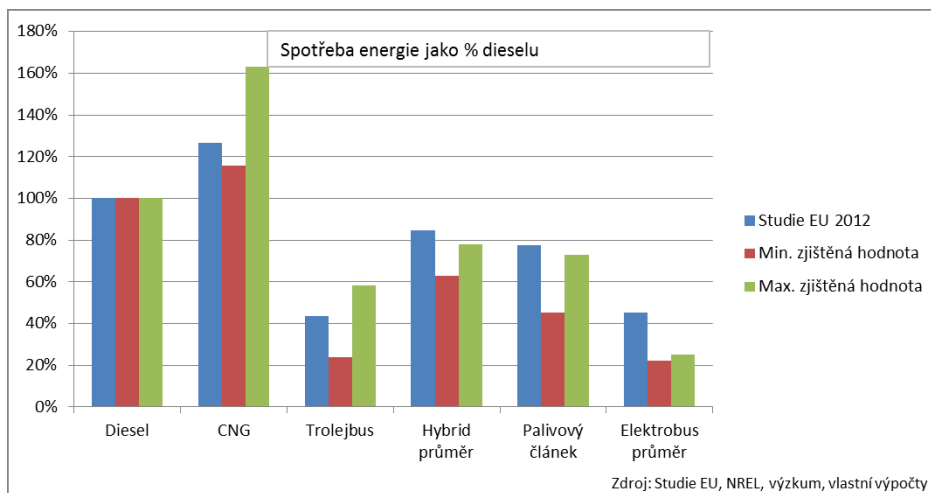
1.1. Elektrobusey z ekonomického pohledu

Studie hodnotící nákladovost různých technologií v oblasti pohonů pro vozy MHD se různí v číslech, nicméně shodující se v závěrech a poměrné nákladnosti jednotlivých systémů[5], též viz graf 5.

Z grafu 5 vychází jako nejméně hospodárný plynový pohon v závěsu s dieselem, který zde slouží též jako reference. Z hlediska spotřeby energie na ujetý kilometr tak vycházejí lépe veškeré pohony využívající elektromotor a to včetně diesel-hybridu. Přičemž nejnižší spotřebu ukazuje elektrobusey společně s trolejbusem.

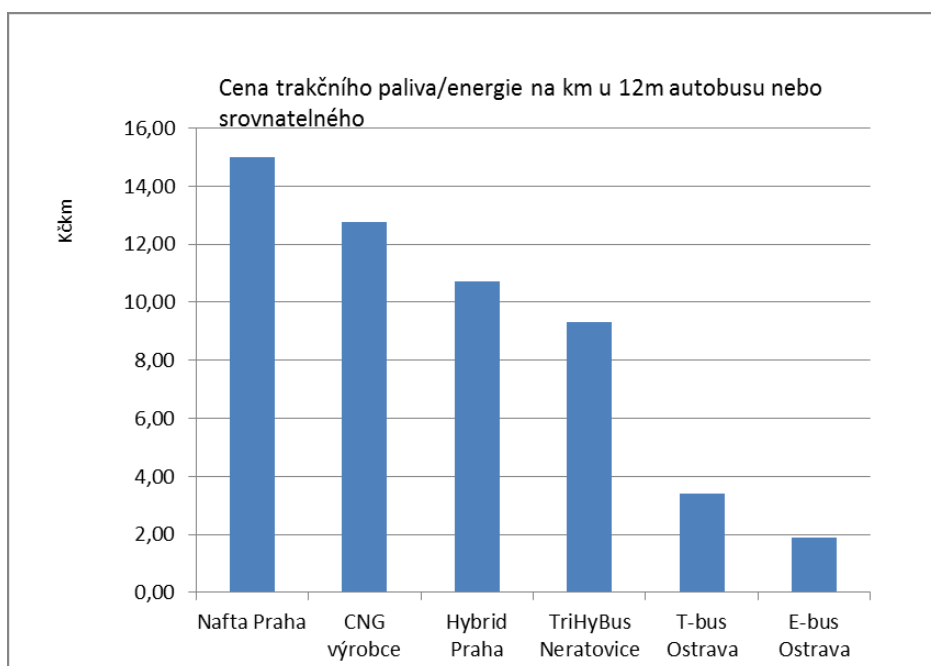
²Škoda Perun s Lithium - Titanat - Oxyd akumulátory pro rychlé dobití[3]

1. Úvod



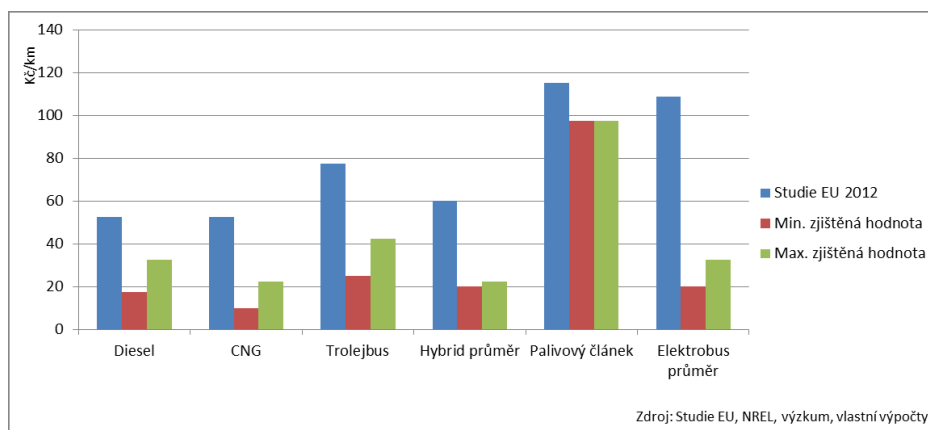
Obrázek 2. Porovnání spotřeby energie vozů MHD s různými pohony[5]

Při uvážení ceny jednotlivých paliv můžeme porovnat jednotlivá řešení též z pohledu ceny paliva spotřebovaného za kilometr jízdy.



Obrázek 3. Porovnání nákladů na trakční palivo a energii[5]

Cena paliva tvoří pouze jednu dílčí složku v nákladech celkových. Veškeré životní náklady dopravního prostředku ovlivňují významnou měrou i jiné parametry. Faktory kterými se nejcitelněji jednotlivé vozy různí jsou mimo jiné sériovost výroby nebo náklady na potřebnou infrastrukturu. Následující graf opět vychází z většího počtu studií, které se liší v konkrétních hodnotách, ale shodující se v závěrech, podobně jako to bylo u předchozích případů.



Obrázek 4. Porovnání celoživotních nákladů[5]

Soutěž o nejnižší celoživotní náklady zatím zřetelně vyhrává Diesel a CNG. Ostatní možnosti mají složitější konstrukci a především vyšší nároky na infrastrukturu. Elektrobusesy jsou pak zatíženy prozatím prakticky kusovou výrobou, která neumožňuje těžit z úspor z rozsahu.

1.2. O společnosti Poll, s.r.o.



Tato práce byla vypracována na zadání společnosti POLL, s.r.o. Společnost byla založena roku 1996 studenty a odbornými asistenty působící na Elektrotechnické fakultě ČVUT v Praze a mezi její hlavní činnosti patří vývoj a výroba elektronických systémů pro aplikace ve výkonové elektronice, uplatnění nachází zejména v oblasti elektrické trakce. Typický produkt je šitý na míru zákazníka a nejčastěji patří do jedné z těchto kategorií: [6]

- Klimatizační systémy pro kolejová vozidla
- Modulární regulační soustavy
- Nabíjecí soupravy pro napájení palubních sítí
- Diagnostické nástroje

Část I.

**Akumulátory vhodné pro trakční
baterii**

2. Výběr vhodné technologie

2.1. Nomenklatura

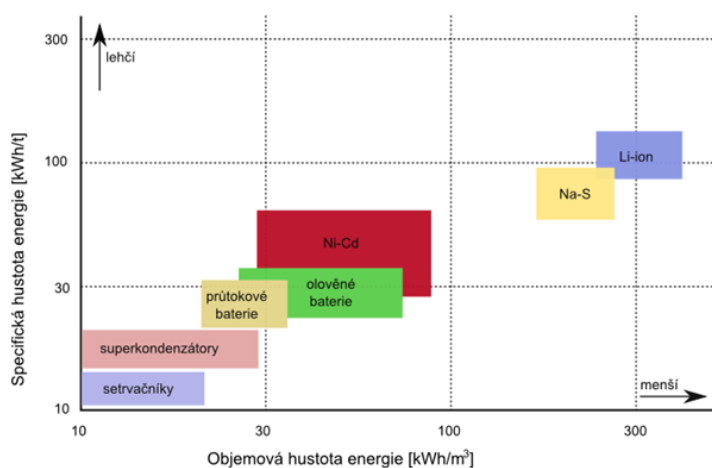
Bateriemi v hovorovém jazyce často rozumíme jak jednotlivé články, tak i celek vniklý jejich spojením, což by mohlo stát pro další rozbor matoucím. Další text bude užívat následující terminologii:

- i elektrochemický článek
 - primární
 - **sekundární (akumulátory)**
 - palivový
 - *superkapacitor* - elektrostatický ale i elektrochemický princip uchování energie
- ii blok/stack: několik paralelně spojených článků
- iii baterie: sériové spojení článků nebo bloků za účelem získání kompaktního modulu s vyšším napětím
- iv pack (nebo battery pack): několik baterií v libovolném uspořádání

2.2. Základní požadavky na akumulátorový článek pro trakční baterii

Pro trakční aplikace jsou nejdůležitější funkční parametry baterie:

- specifická a objemová hustota energie, resp. výkon
- svorkové napětí jednoho článku
- účinnost
- cyklická životnost
- samovybíjení
- rychlost nabití



Obrázek 5. Porovnání z hlediska specifické a objemové hustoty energie[7] (dostatečných hodnot v současnosti nabývají pouze sekundární elektrochemické články)

2. Výběr vhodné technologie

Kromě funkčních požadavků jsou tu další aspekty z nichž nejdůležitější je bezpečnost, cena nebo vliv na životní prostředí. Nejznámější a nejpoužívanější baterie pro trakční systémy jsou olovené baterie. I když tyto baterie mají dlouhou historii a jejich technologie je dobře zvládnutá, pro svoji nízkou specifickou energii (30 Wh/kg) nejsou optimální volbou. Proti mluví též životnost. Po první selekci provedené na základě specifické hustoty energie můžeme dále vybírat z následujících technologií:

- Nikl metal hydrid (NiMH)
- Metal Chlorid sodný (ZEBRA®)
- Lithium ion (Li-ion)

NiMH baterie přinášejí zhruba dvojnásobné zlepšení specifické energie s ohledem na olovené baterie. Tato technologie je v dnešní době též poměrně rozšířena a objem výroby ji činí cenově dobře dostupnou. NiMH baterie využívá například úspěšný hybrid Toyota Prius, stejně jako řada dalších hybridů vyrobených v této době. Nicméně specifická energie je stále poměrně nízká a hraje zde roli i faktor životnosti při hlubokém vybíjení. Cyklická životnost prakticky jakékoliv baterie klesá exponenciálně s hloubkou vybití, většina výrobců celý bateriový pack proto lehce předimenzuje (20%), čímž se opět dostáváme k důležitosti parametru hustoty energie.

Další možností jsou baterie na bázi sodíku z nichž nejslibnější NaNiCl tzv. ZEBRA®. Tento akumulátor však vyžaduje specifické provozní podmínky, pracuje totiž při teplotách okolo 300 °C. Specifickou energií se řadí mezi lepší varianty (asi 100 Wh/kg). Tyto akumulátory byly vyvinuty speciálně pro použití v automobilovém průmyslu, byly testovány a nyní jsou komerčně dostupné. Naproti tomu nedisponují nejvyšší hodnotou specifické energie a poměrně dlouho se nabíjí.

Zdá se tedy, že jsme se přiblížili konsensu. Poslední perspektivní skupinu tvoří lithiové baterie. Ty vynikají aktuálně nejvyšší dostupnou specifickou energií i nejvyšším napětím na článek. Jsou komerčně rozšířeny a to zejména díky přenosné elektronice, kde se používají prakticky výhradně. Tato skupina článků též umožňuje vyrobit baterii pro rychlonabíjení. I zde však existují určité překážky, bariérou může být vysoká cena, nedostatek dat pro zajištění řádného provozu nebo obavy o bezpečnost.

Tabulka 1. Porovnání parametrů vybraných technologií sekundárních článků[8]

	Lead acid	NiMH	ZEBRA	Lithium-ion
specifická energie	20-35 Wh/kg	50-70 Wh/kg	120 Wh/kg	100-200 Wh/kg
energie na objem	50-90 Wh/l	150-200 Wh/l	180 Wh/l	150-250 Wh/l
specifický výkon	250 W/kg	< 1000 W/kg	180 W/kg	< 2000 W/kg
jmenovité napětí	2.1 V	1.2 V	2.58 V	3.6 V
provozní teplota	-20C to 60C	-20C to 50C	N.A.	-20C to 50C
cyklů @80% DOD	700	2000	1500	2000

3. Popis zvolené technologie

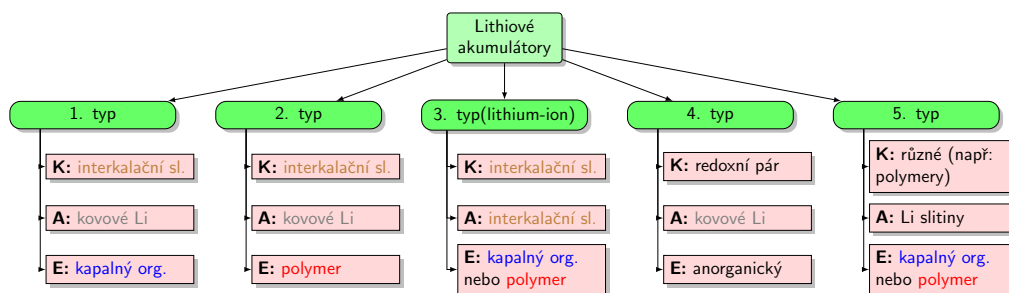
3.1. Lithiové akumulátory

Zjevné výhody lithia spočívají ve vysokém redoxním potenciálu (redoxní potenciál páru Li^+/Li : - 3,045) [9] a nízké atomové hmotnosti, lithium má nejnižší hustotu ze všech pevných prvků a jeho měrná kapacita potom dosahuje přibližně 3860 Ah/kg (u zinku pouze 820 Ah/kg). A vlivem vysokého oxidačního potenciálu dosahují lithiové články vyšších napětí (různé dle složení katody) než běžné suché články. V důsledku zmíněných vlastností mají lithiové akumulátory nejvyšší měrnou energii. Ta je dána součinem napětí a měrné kapacity a dosahuje nezvykle vysokých hodnot.

Naproti doposud uvedeným kladům je vhodné zmínit i zápory. Sem jednoznačně patří vysoká reaktivita lithia, která se pak promítá i do nákladů. Ty rostou vlivem náročnějších technologií výroby. Reaktivita lithia též ovlivňuje bezpečnost a společně s vysokým redoxním potenciálem znemožňují použít elektrolyt, který neobsahuje ionty vodíku. Takové roztoky mají ovšem nižší vodivost, z čehož plynou horší vlastnosti lithiových článků při vyšší teplotách.

Jak tedy využít výhod kovového lithia a minimalizovat bezpečnostní rizika? Tato snaha vedla k použití tzv. interkalárních materiálů ¹, které jsou základem lithium-iontových článků, tyto akumulátory společně s interkalárními sloučeninami budou předmětem následujících kapitol.

Na tomto místě je již zjevné, že existuje několik druhů lithiových akumulátorů. Tedy lithiové akumulátory a akumulátory typu lithium-ion nejsou synonymem. Rozdělení na základě použitých elektrodových materiálů a elektrolytů je následující:



Obrázek 6. Základní rozdělení lithiových akumulátorů; vysvětlivky: K - katoda, A - anoda, E - elektrolyt [11]

3.1.1. Li-ion

„Lithium-ion akumulátory jsou typické použitím interkalárních materiálů pro obě elektrody. Při cyklování si elektrody vyměňují Li^+ prostřednictvím iontově vodivého elektrolytu. Obě elektrody jsou velmi tenké (kolem $200 \mu\text{m}$). Katodu obvykle tvoří oxid kovu

¹interkalární sloučeniny mohou do své krystalické mřížky přijmout cizí atom [10]

3. Popis zvolené technologie

umístěný na hliníkovém kolektoru. Katodové materiály mohou mít vrstevnatou strukturou, typickým příkladem je $LiCoO_2$ (kobaltitan lithný) nebo spinelovou strukturou, například $LiMn_2O_4$ či $Li_4Ti_5O_{12}$. Anodu obvykle tvoří grafitový uhlík s vrstevnatou strukturou na měděném kolektoru. V nabíjecím a vybíjecím procesu jsou ionty lithia vkládány nebo extrahovány z intersticiálního prostoru mezi atomovými vrstvami uvnitř aktivních látek.“[11]

„Kobaltitan lithný je materiál použitý v prvních bateriích této technologie a je stále poměrně rozšířený, důvodem zůstává dobré elektrické vlastnosti, snadná výroba a poměrně vysoká necitlivost na vzdušnou vlhkost. Problém ale činí toxicita kobaltu. Poslední dobou se na trh dostávají spíše články využívající $LiMn_2O_4$, $LiNi_{1-x}Co_xO_2$, $Li_4Ti_5O_{12}$ či $LiFePO_4$. Tyto materiály poskytují znatelně vyšší výkon a jsou méně toxické. Vyšší výkon zde znamená především vyšší proudovou zatížitelnost.“[11]

„Elektrolytem bývá směs kapalných látek, lithných solí a organických rozpouštědel. Dále je v akumulátoru separátor obvykle z tkaného nylonu.“[11]

3.1.2. Li-pol

„Akumulátory typu Li-pol nebo také Lithium-ion-polymer vnikají úpravou technologie Li-ion. Rozdíl spočívá v elektrolytu, který je zde v pevné formě (iontově vodivý polymerový kompozit). Ten nemůže vytéci, článek nemusí mít pevný obal a může být realizován v takřka libovolném tvaru. Odpadá separátor, jehož funkci plní právě pevný elektrolyt. Dále polymerní elektrolyt nabízí vynikající zpracovatelnost a pružnost umožňující realizaci ve velmi tenkých vrstvách. Také se podílí na zabraňování růstu nežádoucích vrstev na povrchu elektrod. Použití pevného elektrolytu přináší ale i určité nevýhody. Oproti tekutému elektrolytu může nastat problém nedokonalého kontaktu s elektrodami. Nezávisle na předchozím nedostatku mívají polymerní elektrolyty horší iontovou vodivost. Ve srovnání s výhodami je to však pouze malá daň.“[11]

V porovnání s typem Li-ion stejné kapacity je přibližně o 10% až 15% lehčí, o 10% až 20% objemnější. Lépe pracuje v nižších teplotách. S postupem času ovšem ztrácí kapacitu poněkud rychleji než článek Li-ion [10].

3.1.3. Bezpečná pracovní oblast (SOA)

Li-Ion technologie přináší řadu výhod, jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, ty jsou ovšem vyváženy nemilosrdným chováním při nedodržení bezpečné pracovní oblasti. Důsledky mohou být i fatální. Ve většině případů práce mimo bezpečnou oblast způsobí pouze snížení životnosti, lze se setkat ale i s případy, kdy došlo k fyzickému poškození článků a mnohdy i následné explozi.

Bezpečná pracovní oblast je dána intervalem dovoleného napětí, proudu a teploty. V případě překročení mezních hodnot dojde k následujícímu:

- vyšší napětí -> poškození, hoření v případě přetlaku
- nižší napětí -> poškození, až vnitřní zkrat
- mimo teplotní oblast -> výrazné snížení životnosti
- vysoké proudy -> snížení životnosti

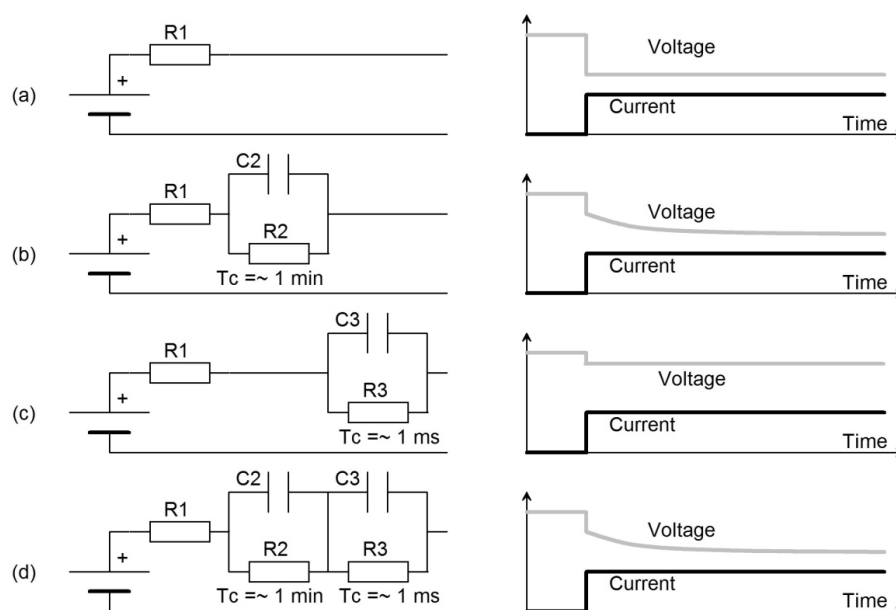
Číselné hodnoty omezujících veličin jsou závislé na chemii a konstrukci článku.

3.1.4. Životnost

Časová délka života je dána zejména degradací při napětí nad 4 V, to zvýhodňuje dále popsané akumulátory s katodou $LiFePO_4$, více viz 3.1.7. V případě cyklického zatěžování klesá kapacita s počtem cyklů lineárně, kde směrnici určuje velikost vybíjecího proudu. Degradace baterie v průběhu doby života může mít podobu ztráty kapacity (úbytek aktivní látky) nebo zvýšení vnitřního odporu. Lepší BMSky jsou schopny vnitřní odpor článků měřit a kompenzovat jeho změny úpravou konečného nabíjecího a vybíjecího napětí (cutoff voltage).

3.1.5. Náhradní schéma elektrochemického článku

Náhradní elektrický model slouží k analyzování elektrochemického článku bez zkoumání chemických pochodů. Jednotlivé ekvivalentní modely zobrazuje obrázek 7.



Obrázek 7. Ekvivalentní elektrické modely pro Li-Ion články s grafy napětí a proudu: (a) jednoduchý R, (b) s relaxačním RC, (c) s AC impedancí RC a (d) s oběma RC obvody [12]

Nejjednodušší R model (zdroj napětí v sérii s odporem) účinně popisuje situaci zatěžování konstantním proudem. Typická hodnota vnitřního odporu Li-Ion článku dosahuje několika miliohmů. Pokles napětí zapříčiněný tímto odporem a procházejícím proudem (IR drop) chemici nazývají polarizační potenciál. Nejedná se o běžný odpor měřitelný multimetrem, ale odpor dynamický, který se měří podle norem a následně se určí ze vzorce:

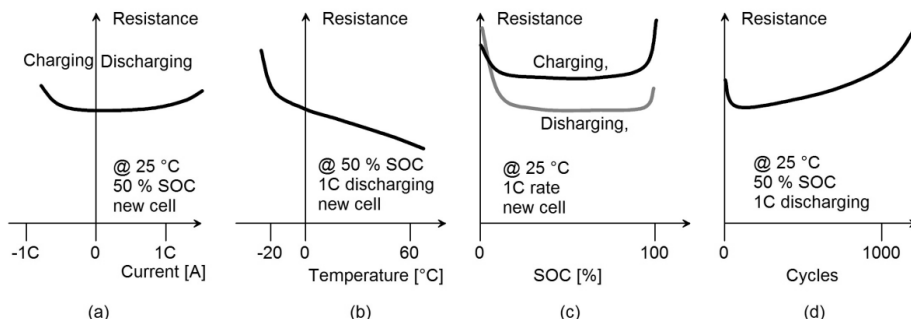
$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (1)$$

Tento odpor se mění s (obrázek 8):

- SOC: hodnota R_i roste při nízkých i vysokých úrovních SOC

3. Popis zvolené technologie

- Teplota: R_i roste s klesající teplotou
- Proud: hodnota R_i se zvyšuje s rostoucím proudem (vyšší v nabíjecím režimu)
- Počet cyklů: R_i v průběhu života článku roste (mimo krátkého poklesu po několika úvodních cyklech)



Obrázek 8. R_i v závislosti na různých faktorech: (a) proud, (b) teplota, (c) SOC, a (d) cykly. [12]

Složitější model vzniklý rozdělením odporu na dva rezistory a přidáním paralelního kondenzátoru (obrázek 7b) umožňuje emulovat situaci, kdy je článek náhle zatížen. Počáteční pokles napětí je malý (vlivem R_1), další pokles je exponenciální s časovou konstantou $\tau = R_2C_2$, která je přibližně rovna jedné minutě. Z pohledu chemika hovoříme v kontextu tohoto jevu o relaxaci.

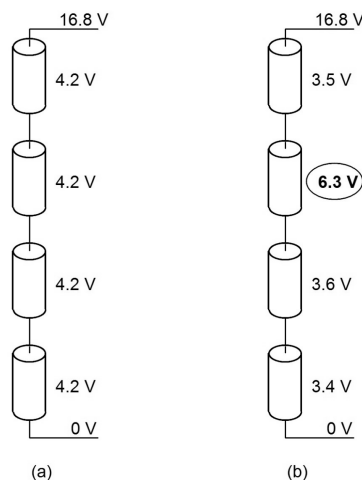
Výrobci častěji používají jiný model (obrázek 7c), který vypadá na první pohled podobně jako naposled popisovaný model. Hodí se ale pro emulace střídavého proudu (časová konstanta cca 1 ms) s frekvencí 1 kHz, odpovídající odpor je pak k nalezení v datasheetech článků. Takto měřený odpor zůstává v průběhu života přibližně konstantní, pro uživatele je však prakticky nevyužitelný.

Poslední model kombinuje předchozí dva za použití 2 RC obvodů (obrázek 7d) a tak efektivně poslouží jak výrobci, tak i uživateli.

3.1.6. Nevybalancované napětí stringu

V malých bateriích s několika málo články v sérii je obvykle napětí rozděleno mezi články téměř rovnoměrně. Jako příklad uvažme olovenou startovací baterii, která je složena z šesti článků zapojených za sebou a u které není třeba při nabíjení použít balancér. Rozdíl v napětí jednotlivých článků činí povětšinou desetiny Voltu, což pro tolerantnější olovený článek nepředstavuje žádný problém.

V případě LiPo baterií mohou být rozdíly v napětí vyšší, což v kombinaci s vysokou citlivostí na přebíjení i podbíjení volá po použití balancéru. U větších baterií s vysokým napětím je pak šance, že jsou články nevybalancované značně vyšší a elektronický dohled s balancerem se stávají zcela nezbytnými.

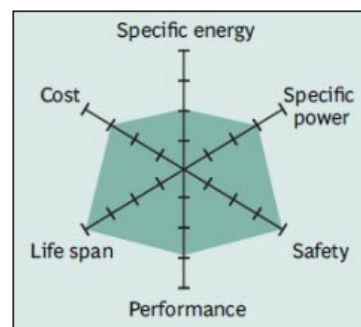


3.1.7. $LiFePO_4$

Charakteristické vlastnosti:

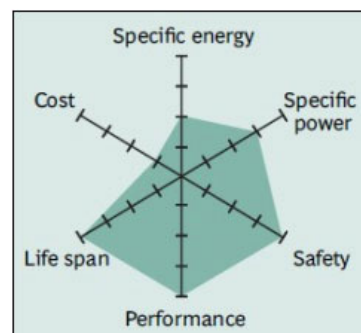
- vyšší bezpečnost
- dobrá tepelná stabilita
- tolerance k některým nežádoucím provozním stavům
- vysoká proudová zatížitelnost
- dlouhou životnost

Lithium fosfát je oblíbeným katodovým materiálem nacházející uplatnění zejména v EV, pokud tedy není vyžadováno velmi rychlé dobíjení (jinak lithium titanáty). Důvody použití právě tohoto materiálu jsou prvořadě vyšší bezpečnost a příznivé teplotní charakteristiky, které umožňují provoz vozidla i za nízkých teplot. Tento materiál nabízí dobrý výkon s nízkým odporem. Nižší napětí se pozitivně odráží na vlivu skladování zejména plně nabité baterie a na celkové délce života. Samozřejmě se ale také podepíše na specifické energii.



3.1.8. $Li_4Ti_5O_{12}$

Akumulátory s lithium titanatovou anodou mají v zásadě podobné vlastnosti jako tomu bylo u předchozích článků. Titanátové články jsou bezpečné, nabízejí perfektní teplotní charakteristiky a velmi slušnou životnost. Oproti předchozím se liší vyšší maximální hodnotou nabíjecího proudu. Problematika rychlonabíjení bude rozebrána podrobněji v následující kapitole jako součást oportunitních e-busů.



Část II.

Návrh Baterie Elektrobusu

4. Elektrobusy z hlediska hospodaření s energií

Pro potřeby pozdější volby konceptu BMS je vhodné vyjít alespoň ze základních parametrů baterie, nad kterou bude mít navrhovaná BMS dozor. Již v úvodu jsem poukázal na různé způsoby řešení přísunu energie pro elektrobusy. Výhoda čistě elektrických vozů se více projevuje na poli městské dopravy. Kde se v zásadě rozlišuje dvojí řešení:

- noční elektrobusy
- oportunitní elektrobusy

V první variantě elektrobusů dobíjených během nočního pobytu v garáži je baterie navržena tak, aby spolehlivě poskytovala potřebné množství energie pro celodenní provoz. Pro baterie takovýchto vozů vyplynou z předchozího 2 významná fakta. Baterie bude muset mít značně vyšší kapacitu a zároveň ji ale nebude třeba dobíjet ve velmi krátkých časech. Což tvoří základ pro volbu odpovídající chemie a konstrukčního provedení akumulátorů stejně jako provedení celého bateriového peku. V tomto případě lze použít Li-Ion akumulátory s $LiFePO_4$ katodou, která je stručně popsána v sekci 3.1.7 předchozí kapitoly.

Naproti tomu elektrobusy příležitostně dobíjené ve vybraných stanicích sází na baterii zcela odlišnou. Omezující kritérium z předchozího případu - kapacita je tak nahrazena požadavkem na rychlé nabití. Tímto způsobem v průběhu designu nutně dojdeme ke specifickým Li-Ion akumulátorům. Obecně lze říci, že svojí roli sehraje i konstrukce. Výhodné je použití menších článků s větší plochou a tedy lepším odvodem tepla. Perspektivní jsou články s nanotitanátovými materiály, které umožní dosáhnout vysokých nabíjecích proudů, řádově se hodnoty pohybují v desítkách C. Zmíněná technologie vychází z lithium titanátové anody (obecně $Li_xTi_yO_z$, konkrétně např. $Li_4Ti_5O_{12}$), katoda bývá vyrobena již osvědčených materiálů a tedy $LiMn_2O_4$, $LiCoO_2$. Nanostruktura $LiTi$ umožňuje dosáhnout plochy anody až $100\text{ m}^2/\text{g}$ oproti uhlíku s $3\text{ m}^2/\text{g}$.

4.1. Rychlonabíjení

Omezující faktory pro rychlonabíjení lithiové baterie souvisí s návrhem bateriového boxu včetně použitých materiálů, ale především s akumulátorovými články samotnými. V případě článků lze dále rozebírat jednotlivá omezení, kam patří: difúze iontů lithia do aktivních materiálů elektrod (pevná fáze), koncentrační gradient v elektrodách i elektrolytu, iontová vodivost elektrolytu a jeho poréznost nakonec i elektrický odpor sběračů, elektrod a dalších částí může být limitující.

Právě s cílem zvýšit difuzi lithia do aktivních materiálů byly vyvinuty nanostrukturální elektrody. Limitujícím prvkem pro vysoké nabíjecí proudy jsou zejména uhlíkové anody. Ty sice nepředstavují citelné omezení u vysokých vybíjecích výkonů, ale při rychlém nabíjení je tomu jinak, lithium neproniká do uhlíkové struktury a formuje dendritickou

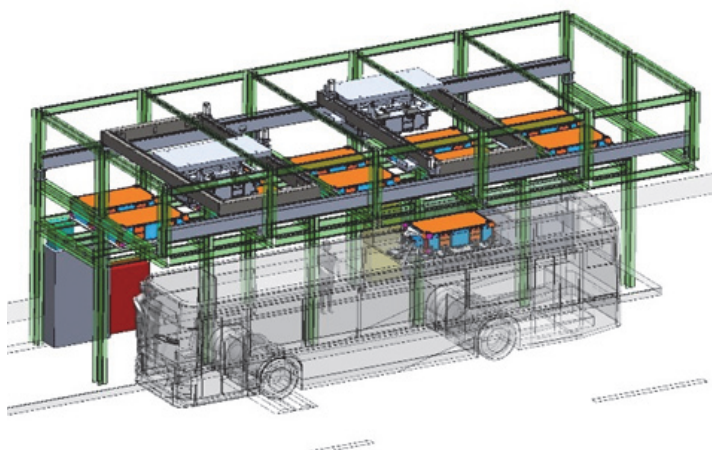
4. Elektrobusy z hlediska hospodaření s energií

vrstvu na povrchu. Právě pro tyto účely existuje alternativa v podobě $Li_4Ti_5O_{12}$. Taková elektroda poskytuje více výhod, pro oportunitní e-busy je přednostní odolnost proti tvorbě dendritických vrstev v důsledku vyššího potenciálu $Li_4Ti_5O_{12}$. Jemná struktura pak splňuje i další z výše uvedených požadavků a je možné dosáhnout výrazně vyšších nabíjecích proudů.

Studie [13], ze které jsem při hledání vhodných akumulátorů pro oportunitní e-busy vycházel, dále uvádí význam použitého separátoru. V testu proti sobě stály komerčně dostupné produkty Celgard® a Solupor®, závěr byl však pro oba podobný. Při nabíjení proudem 20 C vykazovaly všechny testované separátory poměrně prudký pokles konduktivity. Dílčí výsledky studie naznačují, že při nabíjení proudem 10 C bude chování rozumnější, což z mého pohledu činí články $Li_4Ti_5O_{12}/LP30® + Celgard® 2500/LiMn_2O_4$ perspektivními pro uvažované nasazení.

4.2. Další možnosti

V úvodu kapitoly jsem se omezil na dvě skupiny elektrobusů, praxe ale zná již celou řadu možností. Elegantním způsob řešení problému kapacity baterie popisují autoři studie [14]. Technické řešení použité v jihokorejském Soulu tak v jistém směru kombinuje obě předchozí varianty. Vyměnitelný bateriový box umístěný na střeše je dimenzován na přibližně 20 kilometrový okruh a nabývá tak rozumných rozměrů. Transport energie do bateriového zásobníku není časově omezen na dobu pobytu ve stanici, což umožňuje použít jiné (levnější) sekundární články.



Obrázek 9. Elektrický autobus s vyměnitelnou baterií a stanicí k tomu určenou[14]

4.3. Zvolená varianta elektrobusu

Zadání diplomové práce vzniklo nad možností participovat na vývoji elektrických vozů pro Prahu. Vzhledem k infrastruktuře potřebné pro provoz jednotlivých typů vozů má pro Prahu momentálně větší smysl uvažovat o nočním elektrobusu. Podobné zakázky již v nedávné minulosti dopravní podnik hlavního města realizoval.

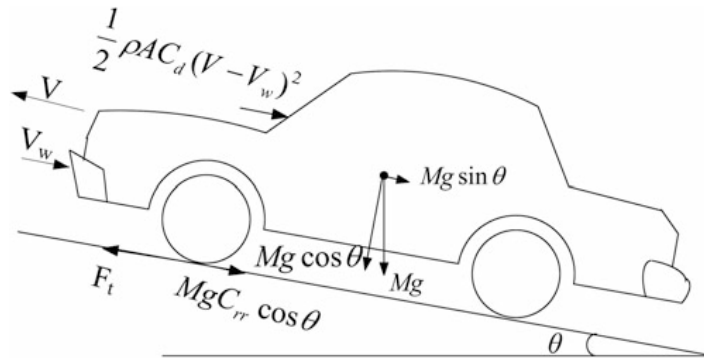
5. Výpočet základních parametrů trakční baterie

Dojezdová vzdálenost elektrobuse závisí pochopitelně na energetické kapacitě baterie a jízdních podmínkách. K výpočtu množství přenesené energie z akumulátorových článků během jízdy poslouží následující model vozidla a baterie. Pro modelování zvolíme vozidlo o parametrech uvedených v tabulce 2.

5.1. Model vozidla

$$P_{celk} = P_{zakl} + P_{vo} + P_{ao} + P_g + P_{acc} - P_{regen}, \quad (2)$$

přičemž P_{zakl} tvoří spotřeba palubní elektroniky, P_{vo} představuje složku valivého odporu kol, P_{ao} tvoří aerodynamický odpor, P_g respektuje vliv gravitačního zrychlení, P_{acc} je výkon potřebný pro akceleraci vozidla a nakonec P_{regen} je zisk z rekuperačního brzdění.



Obrázek 10. Síly působící na vozidlo[15]

$$P_{vo} = C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta |v|, \quad (3)$$

kde C_{rr} zastupuje koeficient valivého odporu, m je hmotnost, g gravitační zrychlení, θ reprezentuje úhel sklonu a v je okamžitá rychlost vozidla.

Předchozí rovnice není zcela přesná, je to empirický vztah, který respektuje závislost tření na rychlosti, ta však není zcela lineární. Z toho důvodu přesněji fungují rovnice, které využijí polynomiální funkce vyššího řádu, kde ke každému členu pak přísluší jeden koeficient. Klíčovým problémem ale zůstává identifikace zmíněných součinitelů. Simulace ztrát valivým třením bude počítána v závislosti na nalezených koeficientech pro uvažované vozidlo.

$$P_{ao} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot S \cdot \rho \cdot |v^3|, \quad (4)$$

5. Výpočet základních parametrů trakční baterie

kde C_d představuje koeficient aerodynamického odporu, S je plocha přední části vozu a ρ je hustota vzduchu.

$$P_g = m \cdot g \cdot \sin\theta \cdot |v| \quad (5)$$

$$P_{acc} = m \cdot a \cdot |v|, \quad (6)$$

kde a je okamžité zrychlení

$$P_{regen} = m \cdot a \cdot |v| \cdot \eta_{regen}, \quad (7)$$

kde η_{regen} je účinnost rekuperace

Pro proměnnou rychlost přejdeme k integrálnímu tvaru:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\int F \cdot ds}{dt} = \int F \cdot dv. \quad (8)$$

Pro konstantním zrychlení by bylo možné dále vzorec upravit takto:

$$P = \int F \cdot a \cdot dt. \quad (9)$$

5.1.1. Newton-Cotesovy kvadrurní vzorce

Ať už si trať namodeluji nebo použiji reálná data, budu mít množství bodů nikoliv spojité průběhy (nejvýše po částech spojité). Předchozí rovnice bude třeba převést do diskrétní podoby. K tomu poslouží kvadrurní formule, které obdržíme integrací interpolačních polynomů s ekvidistantními uzly.

Nejjednodušším vzorcem z této skupin je obdélníková metoda, kde jediným uzlem interpolace je střed intervalu (funkce je nahrazena konstantou $f(\frac{a+b}{2})$):

$$\int_a^b f(x)dx \doteq (b-a) \cdot f\left(\frac{a+b}{2}\right). \quad (10)$$

Z uzavřených vzorců je potom nejjednodušší lichoběžníková metoda. Funkci $f(x)$ nahradíme na intervalu $\langle a, b \rangle$ lineárním interpolačním polynomem daným uzly a, b - v Lagrangeově tvaru:

$$L_1(x) = f(a) \cdot \frac{x-b}{a-b} + f(b) \cdot \frac{x-a}{b-a}. \quad (11)$$

Integrací rovnice 11 po úpravách dostaneme předpis pro lichoběžníkovou integraci:

$$\int_a^b f(x)dx \doteq \int_a^b L_1(x)dx = \frac{(b-a)}{2} \cdot (f(a) + f(b)). \quad (12)$$

Další kvadrurní formulí je Simpsonova metoda využívající interpolační polynom druhého stupně, uzly a, b a střed integračního intervalu $f(\frac{a+b}{2})$:

$$\int_a^b f(x)dx \doteq \frac{(b-a)}{6} \cdot (f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b)). \quad (13)$$

Podobně lze pokračovat pro interpolační polynomy vyšších řádů.

Pro výběr vhodné metody by bylo možné též vyjádřit velikost chyby jednotlivých vzorců. V našem jednoduchém modelu, předpokládajícím konstantní zrychlení, resp. lineární průběh rychlosti v jednotlivých úsecích. Volba integrační metody je tak zcela jednoznačná. Interpoláční polynom se bude shodovat s průběhem rychlosti v ppade výběru lichoběžníkové integrační metody.

Pro výpočet přikonu všech elektrických komponent vozu je třeba respektovat tž fakta uveden v tabulce níže (zdroj [16]):

- celková účinnost pohonu (měnič, motor, převodovka)
- efektivita rekuperačního brzdění (přenos energie z kol do baterie)
- počáteční podmínky modelování

Celková účinnost pohonu přibližn odpovídá 80-90 % a efektivita rekuperačního brzdění se pohybuje okolo 40 % [16]. Vedle hledání účinnosti na stránkách vřrobců nebo v pracích podobných této je možn hnc ústrojí namodelovat. To by též umožnlo lépe určit časov průběh odebíraného proudu z baterie. Vytvořit model asynchronního motoru s přislusnm řízenm společn s převodovkou a dalším částí pohonu je ale pomrn náročné. Modelování pohonu by si vyždalo množstv času, bylo by též náročné na zjištn mnoha parametrů a předevšm se jíž vřrazn vzdaluje zadání diplomov práce.

5.2. Parametry uvažovaného vozu

Pro modelování uvažujeme mal elektrobus, podobn vozu SOR EBN 8, kter Praha testovala začátkem roku 2014. Vřrobc bohuzel neuvádí všechny informace potřebn pro vyčslen rovnic přisluscch modelu vozidla. Účinnost pohonu a rekuperace tak převzmu ze zdroje [16].

Tabulka 2. Vybran parametry malého elektrobusu SOR EBN 8 dle vřrobc [17]

parametr	hodnota
rozměry	8000 x 2525 x 2920 mm
hmotnost	12700 kg
celkov počet mst	51
spotřeba energie	0,7 - 0,9 kWh/km
maximální rychlost	80 km/h
dojezd (2-3 zasvky na 1 km jízdy)	150 - 180 km
elektromotor	AM 6p 400 V
vřkon motoru (trvale/špčka)	120/180 kW
nezvisl naftov topení	24 kW
typ akumulátorů	<i>LiFeYPO₄</i>
napětí jednoho článku	2,5÷4,25 V
kapacita článku/baterie	300 Ah
počet akumulátorových článků	180
pravdpodobn konfigurace	180s
vřrobc akumulátorů	Winston Battery
model akumulátorů	WB-LYP300AHA

5. Výpočet základních parametrů trakční baterie

Koeficienty pro výpočet valivého a aerodynamického tření pak lze určit z tabulek, stejně jako hustotu vzduchu za běžných atmosférických podmínek. Plocha čela autobusu byla dopočtena za pomoci výrobcem uváděných rozměrů.

Tabulka 3. Další parametry elektrobuse

veličina	hodnota
koeficient valivého tření	0,02 (asfalt)
hustota vzduchu	$1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
plocha čela vozu	$6,850 \text{ m}^2$
koeficient aerodynamického odporu	0,6 (čelo autobusu)

5.3. Model baterie

Společně s modelem vozidla, který je zde zastoupen příslušnými rovnicemi, je též nutné vytvořit model baterie. Různá literatura využívá odlišných způsobů modelování baterie. Důvodem je množství faktorů determinujících výkonnost baterie. Mezi ty základní lze počítat SOC, SOH, kapacitu (Ah), nabíjecí/vybíjecí proud, teplotu etc. Nejčastěji se pro popis baterie využívá elektrochemického, matematického nebo elektrického modelu. Elektrochemické modely jsou užitečné zejména pro fyzický návrh článků, matematické jsou založeny na empirických vzorcích a dokáží predikovat stav baterie. Nakonec již dříve zmíněná elektrická náhradní schémata, která se snadno modelují v simulátorech jako Matlab SIMULINK.

Modelování baterie může být náročné na matematický aparát, ale též na identifikaci článků. Pro návrh baterie lze využít elektrické náhradní schéma doplněné o množství charakteristik. Nutné je změřit několik vybíjecích charakteristik, které popíší závislost napětí článků na SOC a vybíjecím proudem. Napětí i vnitřní odpor ale závisí na mnoha dalších faktorech, je tak vhodné popsat též alespoň teplotní závislost. Tato činnost je obecně časově náročná a poměrně nákladná. Jeden akumulátorový článek, který by mohl být použit v elektrobusech bude stát řádově jednotky, možná desítky tisíc korun.

Pro účely diplomové práce jsou k dispozici testovací NMC Li-Pol články. Nemá ale příliš velký význam se zabývat jejich modelováním, protože příbuznost s články pro e-busy je poněkud vzdálená.

V práci použiji model v Matlabu viz příloha B. Jedná se o baterie složenou z menších (30 Ah) lithium-ion akumulátorů v zapojení 80s rozdělenou do 10 stacků. Tato baterie je též určena do EV jen s tím rozdílem, že má přijít do vozu osobního. Model obsahuje bloček signal builder, který je nastaven na pulzní odběr proudu (odpovídá EV).

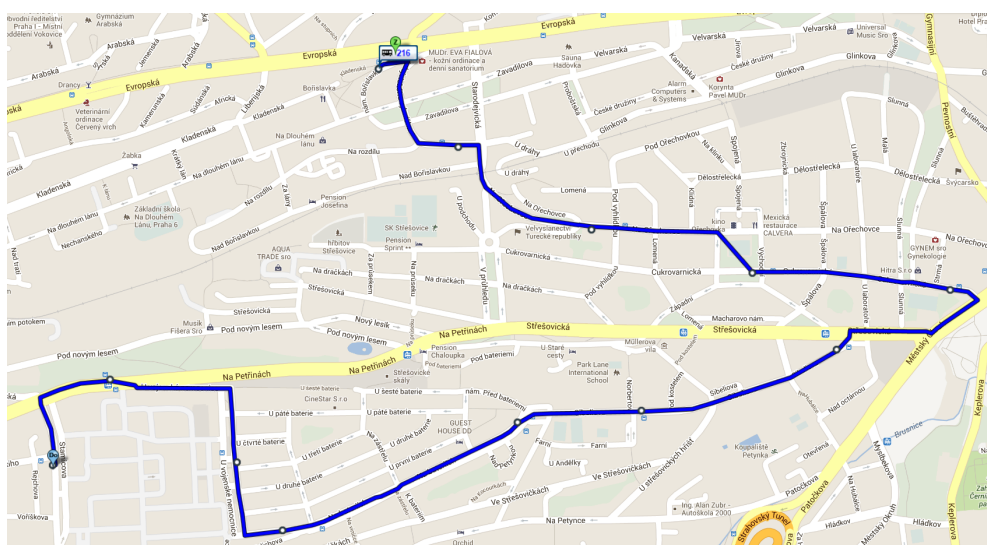
Účinnost baterie byla stanovena z cyklu složeného s pulsními odběry o hodnotě vybíjecího proudu 1 C a následného nabití konstantním proudem 0,5 C tak, aby počáteční a koncové SOC bylo shodné. Z poměru odebrané a dodané energie vyšla účinnost přibližně 95,2 %.

Účinnost baterie se dle výše uvedeného podílí na celkové účinnosti hnacího ústrojí při akceleraci, kterou s ohledem na dílčí výsledky volím 80 %. Účinnost rekuperace, která byla převzata z literatury již v sobě má zakomponovanou efektivitu baterie.

5.4. Modelová trať

5.4.1. Model využívající kartografické údaje

Zátěžový cyklus pro určení kapacity baterie vychází z trasy pražské autobusové linky 216 (jízní řád v příloze C), na které se testoval elektrobuses SOR EBN 8. Na této trase budou vypočteny časové průběhy jednotlivých výkonů a to pomocí modelu vozu a trati. Pro model trati budou výchozími údaji význačné body na trase, které si vyžádají přízpůsobení stylu jízdy. Dále bude uvažováno, že míra stlačení plynové páky je přímo úměrná momentu na kolech vozu. Podobně jako je tomu u tramvají i zde uvažují regulaci na konstantní moment. Zátěžový cyklus tedy bude složen z úseků o konstantním zrychlení s respektováním výkonového omezení motoru.



Obrázek 11. Trať pražské autobusové linky číslo 216 [18]

Na trati vybereme několik bodů, u nichž známe rychlost, stoupání a vzdálenost od počátku. S použitím následujících vzorců budou postupně vypočteny kompletní časové průběhy:

$$a_{max} = \frac{P_{motoru} - P_{zatl} - \Delta F_{mech}}{m}, \quad (14)$$

kde ΔF_{mech} vyjadřuje sílu působící mechanické ztráty během jízdy vozu, její vztah k rovnicím modelu vozů je tento:

$$\Delta F_{mech} = \frac{P_{vo} + P_{ao} + P_g + P_{acc} - P_{regen}}{v}. \quad (15)$$

V tomto případě je možné využít integraci podle času vyjádřenou v rovnici 8. Bude nutné přidat algoritmus pro výpočet délky úseků akcelerace, brzdění a úseků s neměnou rychlostí.

Výsledná spotřeba na základě této simulace vyšla řádově o desítky procent jinak, než spotřeba udávaná výrobcem pro městský provoz. Zásadní vliv na výpočet má účinnost regenerativního brzdění, která se zdála poměrně nízká. Nicméně i podle jiných studií se

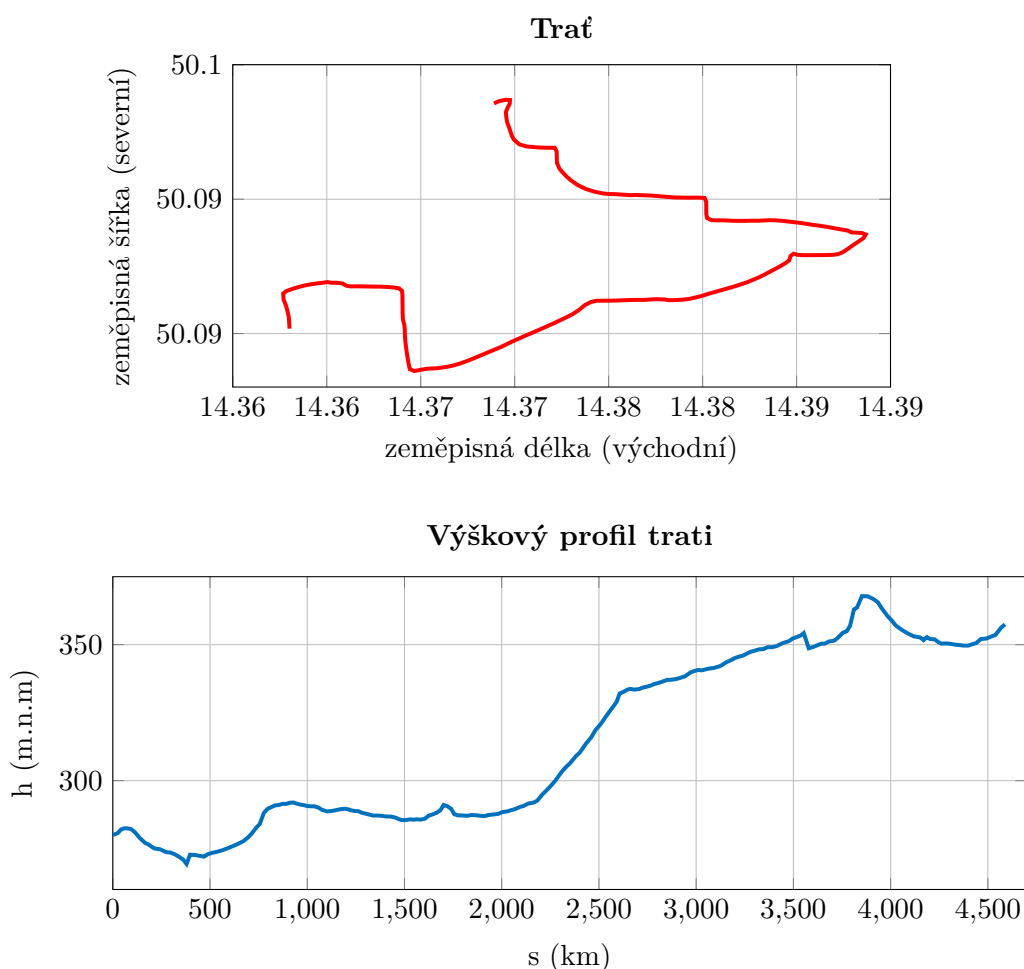
5. Výpočet základních parametrů trakční baterie

tato efektivita pohybuje v okolí 40% (účinnost rekuperace podle článku [19] je 32% až 47% - více v příloze D). Po kontrole ostatních parametrů následovala myšlenka využít reálných dat.

5.4.2. Reálná data z průjezdu trati

Druhou možností je využít naměřených dat, kde se v tuto chvíli nabízí dvě možnosti. Za prvé vyjít ze záznamů, která má firma k dispozici (tramvajová trať mimo Prahu) nebo sáhnout k experimentálnímu řešení a trať linky 216 projet jako cestující s použitím GPS a příslušného SW pro záznam vyfiltrovaných dat. Takové řešení je poměrně jednoduché, v google play marketu jsou k dispozici bezplatné aplikace pro mobilní zařízení zaznamenávající data z GPS. Rozhodli jsme se realizovat tuto myšlenku s tím, že požádáme pražský dopravní podnik o data z testování e-busu na této trati a výsledky budeme moci porovnat.

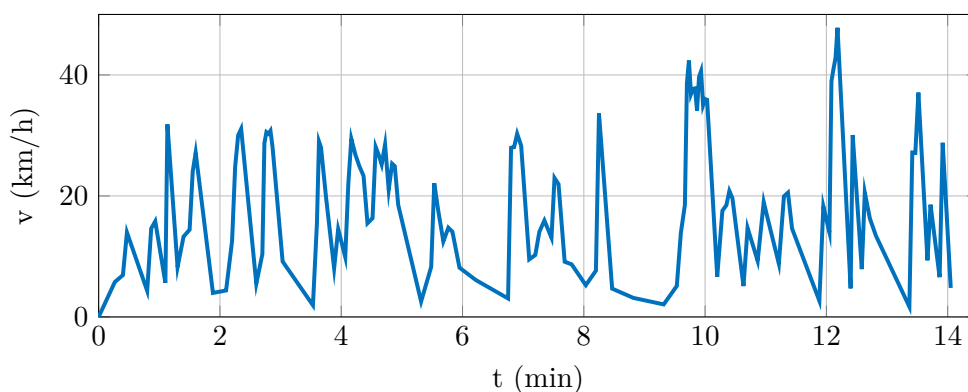
Naměřené a vypočtené průběhy Prvním významným grafem je průběh nadmořské výšky v závislosti na ujeté vzdálenosti od zastávky Bořislavka. V následujících grafech je potom nadmořská výška zobrazena v závislosti na čase.



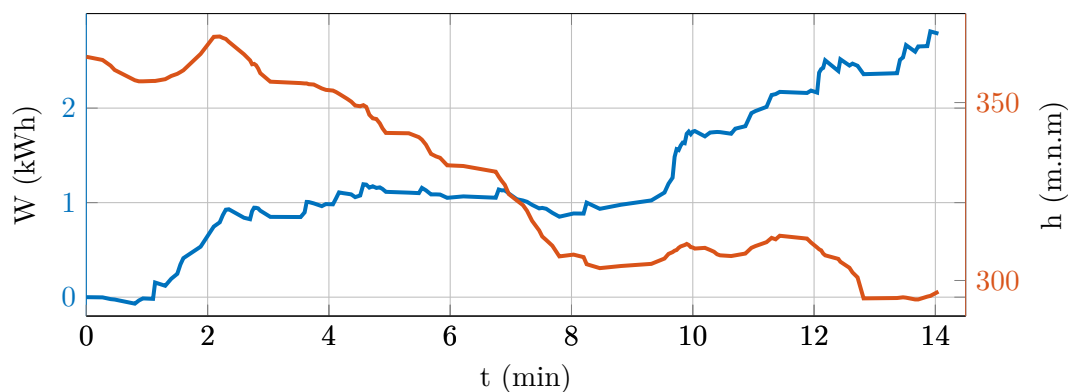
Obrázek 12. Trať pražské autobusové linky 216, vzdálenost je počítána od Bořislavky (nejsevernější bod)

Trať linky 216 jsem projel v obou směrech. Rychlostní a energetické průběhy jsou zobrazeny na grafech umístěných níže. V obou případech byla data z GPS modulu zatížena chybou. Nepřesnost se projevovala nejvíce při nízkých rychlostech, kde po sobě zaznamenaná data obvykle s přesností do 4 m mohla zapříčinit překmit vypočtené aktuální rychlosti do záporných hodnot. Body ve kterých vycházela rychlost záporná byly přeskočeny, stejně jako ty, kde vycházelo enormní zrychlení. Tímto způsobem byly postiženy úseky, kde autobus zastavoval. Eliminovat tento nedostatek by však bez manuální korekce šlo obtížně. Celkový čas jízdy byl zachován a s tím i energie spotřebovaná palubní elektronikou zůstala nezměněna. Výpočet obsahoval další drobné korekce, nicméně manuální úpravě vstupních dat jsem se vyhnul - výsledek by mohl být ošidný.

časový průběh rychlosti



kumulovaný tok energie z baterie, nadmořská výška



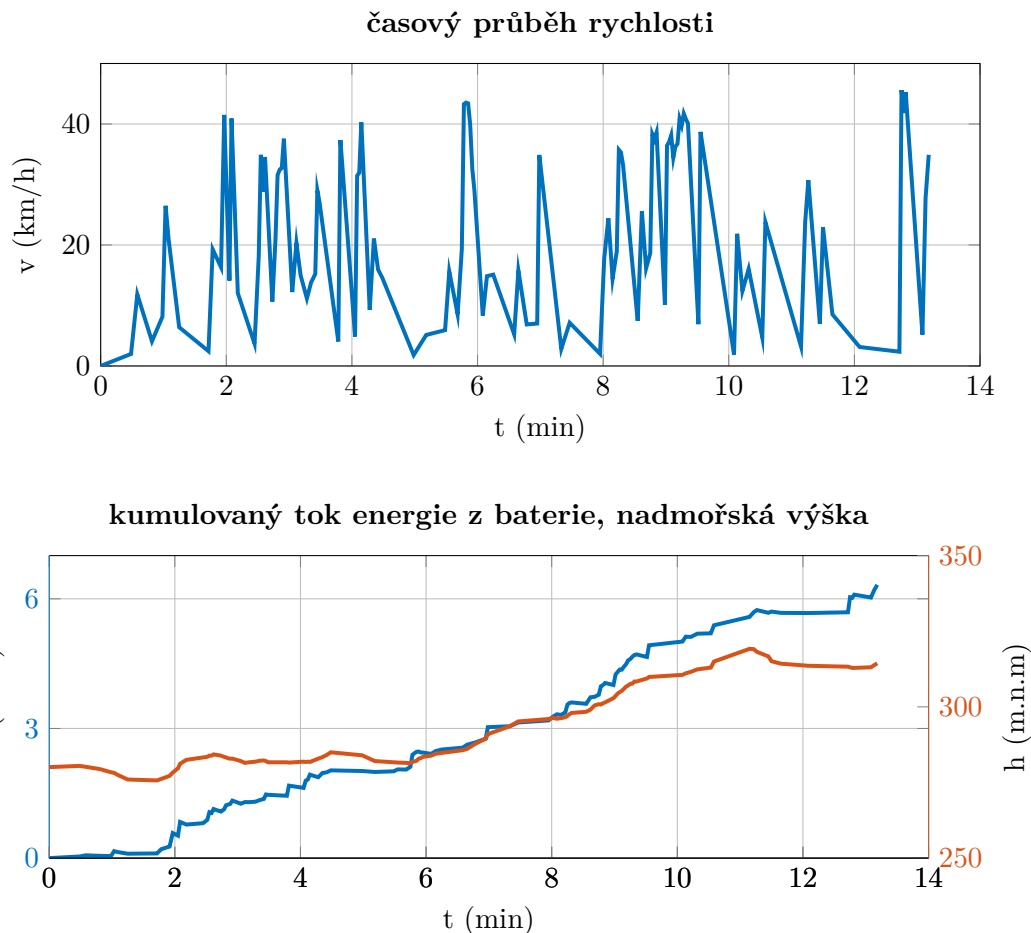
Obrázek 13. Naměřená a vypočtená data pro jízdu ve směru Poliklinika Petřiny

Tabulka 4. Vypočtená spotřebovaná energie e-busem

	W (kWh)	W/s (kWh/km)
Bořislavka -> Poliklinika Petřiny	2,79	0,62
Poliklinika Petřiny -> Bořislavka	6,32	1,37
obě trasy	9,11	0,99

5. Výpočet základních parametrů trakční baterie

Spotřeba v obou směrech je zanesena do tabulky 4. Oproti spotřebě udávané výrobcem je průměr z obou směrů nepatrně vyšší. Autobus jel poměrně nízkou rychlostí, nicméně často přibrzdňoval na retardérech před křižovatkami či zastávkami na znamení. A pochopitelně zcela zabrzdil v zastávkách. Četnost zastávek je dle mého názoru též poměrně vysoká. Na necelých 5 kilometrech jízdy připadlo 12 zastávek.



Obrázek 14. Naměřená a vypočtená data pro jízdu ve směru Bořislavka

5.5. Informace od dopravního podniku

Elektrobus byl testován pouze krátce a dopravní podnik bohužel není schopen poskytnout data zaznamenávaná v průběhu jízdy ani relevantní údaj o spotřebě. Testovací vůz byl zapůjčen z Vídně, kde již nějakou dobu sloužil a tak byl patrný určitý stupeň opotřebení. Pochopitelně nejcitelněji se stáří podepsalo právě na baterii a tak by i získané údaje nemusely mít velkou vypovídající hodnotu.

Z provozu jsou klíčové informace o způsobu dobíjení. Autobus se během pauzy dobíjel v zastávce Bořislavka přes trolej.

6. Volba základních parametrů baterie

Výsledky modelování spotřeby e-busu v kapitole 5 nyní využijeme k určení parametrů baterie, čímž si blíže specifikujeme požadavky na systém spravující baterii. Pro návrh baterie je potřeba určit především následující:

- využitelná energie (jmenovitá energie)
- špičkový výkon
- volba článků
 - chemie
 - konstrukční provedení
- konfigurace - počet článků paralelně a sériově

6.0.1. Základní vztahy pro výpočty parametrů baterie

Mezi základními parametry baterie platí tyto vztahy:

$$W_j = C_j \cdot U_j, \quad (16)$$

kde W_j je jmenovitá energie (Wh), C_j jmenovitá kapacita (Ah) a U_j je napětí (V) baterie. Využitelná kapacita ale závisí na odebíraném proudu i dalších provozních podmínkách. Tento vzorec tak poslouží pouze pro počáteční odhad.

$$P_{peak} = \frac{2U_{oc}^2}{9R_i}, \quad (17)$$

kde P_{peak} je maximální výkon (W), U_{oc} je napětí naprázdno a R_i vnitřní odpor baterie. Vzorec je převzat od U.S. Advanced Battery Consortium (USABC) [20].

6.0.2. Volba parametrů

Potřebná energie plyne z požadované vzdálenosti ujeté na jedno nabití a spotřebu energie společně s účinností baterie. Mluvíme tedy výstupu výše uvedeného modelu. Špičkový výkon je součtem maximálních příkonů všech spotřebičů. Při znalosti kompletní elektrické výzbroje by bylo možné provést přesnější výpočet za použití koeficientů soudobosti a současnosti. Chemie akumulátorů vyplývá z typu elektrobusu a podobně jako u konstrukce není příliš na výběr.

V tomto případě požadavek na ujetou vzdálenost závisí na četnosti a délce dobíjení baterie ve stanici Bořislavka. Samotná trasa linky 216 není delší než 5 km a pokud bude možné, byť několika minutové dobití, po projetí trasy v obou směrech, nebude zapotřebí velké baterie. V této situaci by bylo možné problém pojmout z pohledu ekonoma a vypočítat optimální velikost baterie z hlediska nákladů. Pořizovací cena větší baterie bude vyvažována její delší životností, ta totiž závisí na hloubce vybíjecích cyklů nebo teplotě. Větší baterii bude možné udržovat v optimálních hladinách SOC a lze též předpokládat nižší hodnotu vnitřního odporu a s tím i teplotu.

6. Volba základních parametrů baterie

Jízdní řády ale ve všední dny neumožňovaly dobítí po celých 30 obousměrných průjezdech trati. Autobus by tak měl ujet cca 300 km na jedno nabití a s ohledem na životnost by k tomu mělo stačit jen určité procento celkové kapacity baterie (obvykle 80 %). U vozů, kde baterie tvoří významnou část hmotnosti vozu se již projevuje jisté omezení maximálního dojezdu. S rostoucí kapacitou baterie se dojezd zvyšuje podproporcionálně a zvyšování kapacity baterie má smysl jen do určité míry. U elektrobuseů zřejmě omezujícím faktorem zůstane cena baterie. Výhodnější než pořídit jeden elektrobuseů s dojezdem 300 km může být provoz více vozů na jedné lince, vybudování infrastruktury umožňující dobíjení baterie ve více stanicích nebo již zmíněná myšlenka vyměnitelného bateriového boxu.

Volba kapacity baterie odvisí nejenom od odhadnuté průměrné spotřeby, ale je též ovlivněna zamýšleným způsobem nasazení. V ideálním případě by měla proběhnout ona ekonomická rozvaha, která by mimo jiné kalkulovala s výše uvedeným. Návrh baterie je ale limitován z více stran. Trakční systém je uzpůsoben určitému rozsahu napětí, což odpovídá určitému počtu sériově řazených článků. Při pevném počtu článků můžeme ovlivnit celkovou energetickou kapacitu pomocí ampér-hodinové kapacity jednotlivých akumulátorů a nebo paralelním řazením. V každém případě budeme nuceni se přizpůsobit nabídce akumulátorů.

Domnívám se, že pro potřeby této práce postačí odhad jmenovité kapacity. Zachováme-li konfiguraci 180s vznikne baterie o kapacitě vyjádřené následující rovnicí:

$$C_j = \frac{d \cdot W_{1km}}{n \cdot U_j} \cdot \frac{DOD(\%)}{100}, \quad (18)$$

přičemž d označuje vzdálenost v km ujetou na jedno nabití při zvoleném DOD a W_{1km} spotřebu energie na jeden kilometr jízdy. Jmenovité napětí $LiFeYPO_4$ článku je 3,2 V.

Situace by mohla být řešena vícero způsoby. Nejméně vhodné je pro celkovou délku trati vybrat jeden autobus bez možnosti dobíjení. Výslednou kapacitu odvodím od poloviční vzdálenosti při zvažení možnosti nasazení 2 vozů. Tímto způsobem vyjde jmenovitá kapacita baterie alespoň 322 Ah. Počítáme s hloubkou vybíjení 80 %, což je mezní hodnota, protože baterie na pokraji životnosti bude mít právě 80 % původní kapacity.

Kapacita baterie je v zásadě hlavním parametrem pro návrh BMS. Určuje totiž velikost vyrovnávacích proudů. Omezující může být též počet sériově řazených akumulátorů, ale to vše bude předmětem kapitoly 9. Nyní postačí vědět, že mimo chemie článků a jejich parametrů (získané například identifikací některého z náhradních elektrických schémat) nás v této práci zajímá pouze náboj baterie.

Část III.

BMS

7. Battery Management System

Činnosti BMS systému se mohou výrazně lišit v závislosti na aplikaci, proto vymezení tohoto pojmu bude volnější. Z předešlého textu již částečně plyne význam obvodů spravující baterii, ten lze vylíčit dvěma elementárními cíli. Přednostně jde o optimální využití článků s ohledem na jejich životnost a zajištění bezpečnosti. Nyní bude uveden více ucelený seznam funkcí, které mohou systému BMS příslušet:

- monitoring baterie
- ochrana baterie
- odhad stavu baterie
- maximalizace výkonu baterie
- komunikace s uživatelem nebo externím zařízením

Upřesnění definice BMS poskytne kapitola 8, která uvádí a komentuje její možné varianty. Nyní se pojdme podívat na rozbor požadovaných funkcí systému spravujícího Li-Ion baterii.

7.1. Udržení jednotlivých článků v SOA

Li-Ion články vyžadují striktní udržení v SOA, jak bylo napsáno v sekci 3.1.3. Pro BMS to znamená následující:

- zabránit překročení napěťových mezí - vyžadována schopnost přerušit proud baterií
- zabránit překročení teplotních mezí - vyžadována schopnost přerušit proud baterií, případně spínání aktivního chlazení (resp. výhřevných těles), jsou-li k dispozici
- zabránit překročení proudových mezí (souvisí s teplotními i napěťovými omezeními) - v případě potřeby přerušit nebo omezit proud

7.2. Monitoring baterie

Kromě sledování veličin, dle výše uvedených nároků se běžně využívá monitoringu SOC, DOD a kapacity baterie.

7.2.1. SOC

Stav nabití (State of Charge) článku nebo baterie je jedním z nejdůležitějších parametrů akumulátoru. Jeho definice a měření však přináší řadu různých problémů. Obecně se SOC určí jako podíl náboje, kterým článek aktuálně disponuje ku nominální kapacitě reprezentující maximální možný náboj za daných podmínek (MIT, 2008):

$$SOC = \frac{Q(t)}{Q_n} \cdot 100\%. \quad (19)$$

SOC lze též definovat pomocí DOD, kde se pouze využije viditelné podobnosti těchto parametrů:

$$SOC = (1 - DOD) \cdot 100\%. \quad (20)$$

Vyhodnocení funkce SOC slouží nejen vlastní BMS ale i uživateli - ekvivalent pali-voměru v EV. Důležité je poznamenat, že každý článek má vlastní SOC. Stav nabití lze determinovat různými způsoby, např. OCV (Open Circuit Voltage), tato technika je retrospektivní, porovnává SOC s napětovou úrovní.

Kromě korekce kapacity dle proudu lze respektovat i závislost na teplotě nebo vzít v úvahu počáteční stav baterie (stáří).

Klasifikace metod kalkulace SOC se v literatuře různí podle zvolené metodologie. Ačkoliv některé zdroje se shodují na následujícím rozdělení do 4 kategorií.

Tabulka 5. Metody výpočtu SOC [21]

Kategorie	Matematická metoda
Přímé měření	(i) Napětí naprázdno (OCV) (ii) Svorkového napětí (iii) Impedance (iv) Pomocí impedanční spektroskopie
Integrace proudu	(i) Integrace proudu (CC - Coulomb Counting method) (ii) Modifikovaná CC
Adaptivní systémy	(i) Nelineární mapování (BP/RBF neural network) (ii) Nelineární odhad systému (SVM) (iii) Modelování nelineárních systémů (FNN) (iv) Kalmanův filtr pro real-time data
Hybridní metody	(i) Kombinace CC a EMF (ii) Kombinace CC s Kalmanovým filtrem (iii) Jiné kombinace

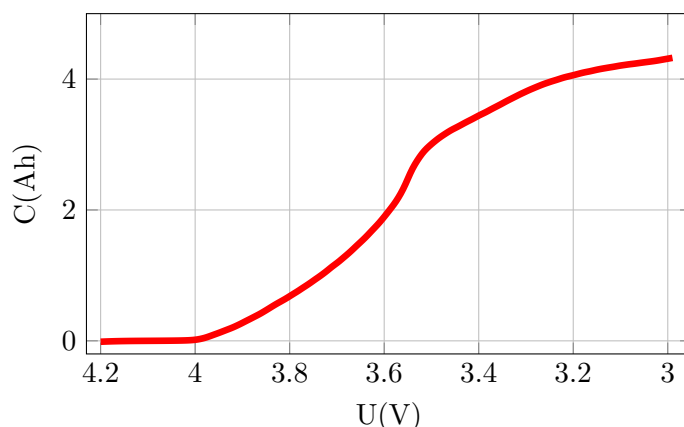
Metody přímého měření Tyto metody jsou založeny na přímém měření některé fyzikální veličiny se vztahem k SOC. Typickým zástupcem této skupiny je retrospektivní metoda založená na měření napětí naprázdno a odhadu SOC pomocí naměřené charakteristiky SOC-OCV. Pro baterie s kyselým elektrolytem se charakteristika linearizuje:

$$OCV(t) = a_1 \cdot SOC(t) + a_0. \quad (21)$$

Koeficienty lineární aproximace respektují sklon závislosti a napětí zcela vybité baterie (nenulové).

Výše psaný vzorec však není vhodný pro Li-Ion baterie, které mívají SOC-OCV charakteristiku výrazněji nelineární - viz obrázek 15.

Dále lze využít měření svorkového napětí a předchozí metodu tak obohatit o závislost vnitřního odporu na SOC. Existují metody založené pouze na měření vnitřního



Obrázek 15. Vztah OCV a SOC NMC LiPol článku, resp. kapacity, které je SOC přímo úměrné (zde je uvedena odebraná kapacita - 100% SOC odpovídá 0 odebraným Ah) [11]

odporu (impedance). V tomto případě je nutné nasnímat řadu charakteristik, hodnotu vnitřního odporu totiž ovlivňuje množství faktorů. Lépe je v tomto případě použít impedanční spektroskopii, která měří střídavou impedanci v širším frekvenčním spektru a při různých velikostech proudu. Výsledná impedance je vypočtena metodou nejmenších čtverců.

Metody integrace proudu Další skupina metod využívá pro výpočet přijatého nebo odebraného náboje integraci proudu podle času. Opět je zde ale řada faktorů zvyšující chybu metody. Odebraný náboj závisí na vybíjecím proudu, teplotě, SOH, ... z toho důvodu se upřednostňuje modifikovaná metoda, která respektuje zmíněnou závislost na velikosti proudu.

$$SOC = 1 - \frac{C_p(t)}{Q_n} \cdot \frac{1}{3600} \cdot 100\%, \quad (22)$$

kde C_p představuje Peukertovu kapacitu, která se vypočte takto:

$$C_p = I^k \cdot T(Ah). \quad (23)$$

$$SOC = 1 - \frac{\int_{t_0}^{t_1} i(t)^k dt}{Q_n} \cdot \frac{1}{3600} \cdot 100\%, \quad (24)$$

kde konstanta $\frac{1}{3600}$ slouží pro přepočet z Ampérhodin na Ampérsekundy, tj. Coulomb. Exponent k reprezentuje ve 2 předešlých rovnicích Peukertův koeficient vyjadřující závislost kapacity na velikosti vybíjecího proudu.

Modifikovaných CC metod je celá řada. Aproximace závislosti vybíjecího proudu a upraveného proudu pro výpočet kapacity se provádí více způsoby. Často se též volí kvadratická závislost.

$$I_c(t) = k_2 \cdot I(t)^2 + k_1 \cdot I(t)k_0, \quad (25)$$

kde $I_c(t)$ je upravený proud dále se vyskytující v integrálu a $I(t)$ je reálná hodnota proudu baterií v daném čase.

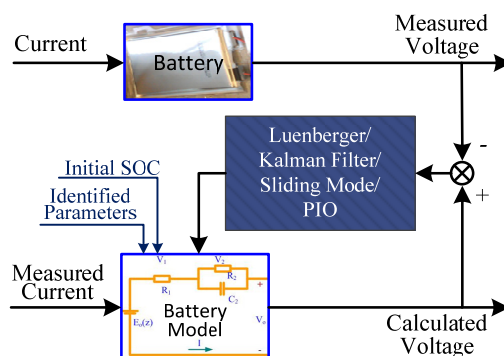
Adaptivní systémy S rozvojem umělé inteligence přichází i nové adaptivní metody, které jsou schopny se samostatně přizpůsobit změnám systému. Výpočet SOC provází nelinearita, ale též změny související s chemickými faktory. Jedná se tak o typickou aplikaci adaptivních metod, které i zde poskytují velmi slušné výsledky.

Pro svojí dobrou schopnost nelineárního mapování se často používá umělá neuronová síť BP (back propagation). Pro odhad SOC se využívá znalosti historie napětí, proudu, teploty etc. [21] Dobré výsledky poskytují i jiné adaptivní systémy. Nicméně jejich použití je náročné na matematický aparát a svojí složitostí přesahují rámec této práce. Jejich zmínka cílí na možné budoucí vylepšení algoritmů BMS, avšak v tuto chvíli jsou tu pouze pro úplnost.

Hybridní metody Cílem hybridních způsobů odhadu SOC je těžit z výhod několika různých metod. Jednotlivé dříve zmíněné možnosti kalkulace SOC mívají často neúplnou informaci o baterii. Hybridní metody dokáží integrovat do modelu částečné informace získané z jednotlivých modelů a zpřesnit tak výpočet.

V levnější elektronice se poměrně hojně využívá CC metody, která většinou trpí především problémem určení počátečního SOC. Řešení má nabídnout „KalmanAh method“ zmíněná v článku [21]. Jedná se o kombinaci CC metody a Kalmanova filtru, jehož použitím se docílí vyšší přesnosti odhadu počátečního SOC. Opět i hybridních řešeních je publikováno mnoho.

Kalmanův filtr Kalmanův filtr se řadí mezi adaptivní filtraci k modelování stavů diskrétního dynamického systému. Jedná se o optimální řízení, kde základní myšlenkou je minimalizace disperze a výpočet vnitřního stavu systému. Jeho výhodou spočívá v rekurzivní struktuře a neustálé úpravě koeficientů filtru za použití aktuálních informací. Též není nutné si pamatovat všechny předchozí vstupní hodnoty.



Obrázek 16. Kalmanův filtr v aplikaci odhadu SOC baterie [22]

Stručně a zjednodušeně lze shrnout funkci Kalmanova filtru jako sofistikovanější odhad plovoucího průměru. Algoritmus má v zásadě 2 hlavní kroky. V prvním predikuje nový stav a v druhém jej koriguje s použitím nového měření. Zapomínaná stará měření nahrazuje věrohodnost aktuálního odhadu. Důvěryhodnost odhadu potom ovlivňuje

Kalmanovo zesílení (u plovoucího průměru by zesílení odpovídalo váze, tedy převrácené hodnotě délky průměrovaného intervalu). Podrobněji se ale tímto filtrem má smysl zabývat až ve fázi ladění programu BMS MCU.

Kalmanův filtr lze s výhodou použít mimo jiné i právě pro odhad stavu nabití baterie. Metoda totiž může efektivně odhadnout SOC v případě, že počáteční hodnota stavu nabití nebyla správná. Nabízí se jako velmi vhodné řešení problému samovybíjení baterie ve smyslu korekce SOC po delší době, kdy byla baterie v klidu.

7.2.2. DOD

Hloubka vybití (Depth of Discharge) již byla zmíněna v rovnici 20 a není ji tak třeba dále definovat. Často se s ní ale pracuje jinak než s SOC, rozdíly shrnuje tabulka 6.

Tabulka 6. Porovnání DOD a SOC [12]

	<i>SOC</i>	<i>DOD</i>
Jednotky	%	častěji Ah (může být i %)
Reference	dva body: zcela nabito a zcela vybito	jeden bod: zcela nabito
Při plném nabití	100%	0 Ah
Pro úplné vybití	0%	neudává se

Primárním cílem DOD není popis stavu nabití jako je tomu u SOC, nýbrž hloubku vybíjecích cyklů. Pro DOD uváděnou v jednotkách % platí rovnice 20. Zavedeme-li však pro DOD jednoty Ah, myslíme tím množstvím skutečně odebrané energie. A ta jak známo závisí na provozních podmínkách, čímž obecně vzato SOC a DOD v součtu nemusí dát aktuální nejvyšší využitelnou kapacitu baterie. Zatímco SOC je stavová veličina baterie, DOD častěji figuruje v roli jednoho z faktorů popisujícího provozní podmínky.

7.2.3. SOH

Zdraví baterie (State of Health) ukazuje stav článků v porovnání s novými kusy. Na výsledku se podepisuje množství faktorů jako například vnitřní sériový odpor, samovybíjení nebo schopnost přijmout náboj (kapacita). Zdraví baterie v průběhu života klesá v důsledku nevratných fyzických a chemických změn. SOH by měl ukázat aktuálně dosažený stav životního cyklu.

Standardizovaný výpočet neexistuje, protože každá aplikace je více citlivá na jinou stavovou veličinu baterie. Typicky aplikace vyžadující vysokou rychlost nabíjení bude prioritně sledovat vnitřní odpor, zatímco jinde může být důležitá Ampérhodinová kapacita.

Tam, kde je hlavním parametrem kapacita baterie, se SOH může definovat jako procentuální poměr mezi momentálně využitelnou kapacitou C_a a nominální kapacitou při daném proudu C_p . Kapacita se určuje z kontrolního cyklu provedeného za standardních podmínek.

$$SOH_C = \frac{C_a}{C_p} \cdot 100\% \quad (26)$$

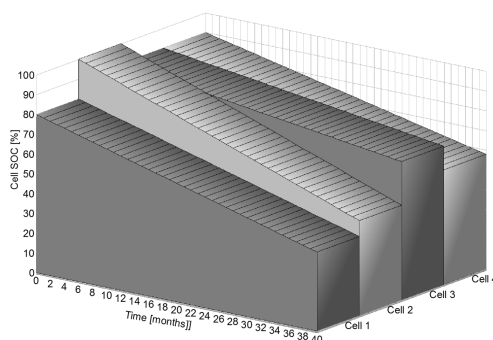
Baterie zatěžované vysokými proudy používají ukazatel zdraví založený na změně vnitřního odporu, výpočet je následující:

$$SOH_{Ri} = \frac{R_n - R_a}{R_n} \cdot 100\%, \quad (27)$$

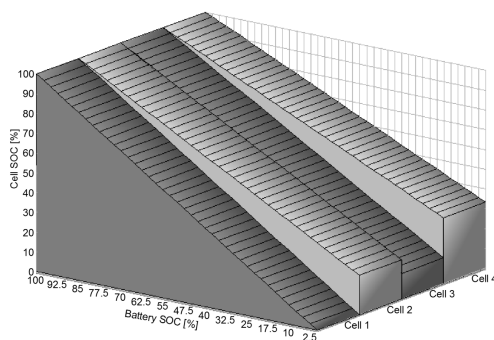
kde R_n je nominální hodnota vnitřního sériového odporu, ke které je ukazatel zdraví vztažen. Tato metoda je vzhledem k absenci kontrolního cyklu levnější, rychlejší a snáze proveditelná.

7.3. Balancování

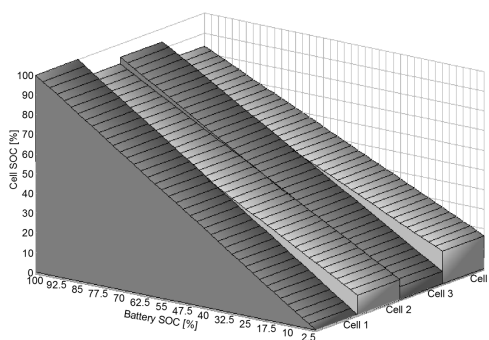
Jak již bylo popsáno v prvním odstavci úvodní kapitoly 1, články se vyrábí s určitými odchylkami a následné provozní podmínky též nemusí být zcela shodné pro celou baterii, vlivem toho má baterie s časem a užíváním tendenci dostávat se do nevybalancovaného stavu. Balancování je proces, jehož výsledkem je baterie, ve které jednotlivé články mají stejné SOC. Probíhá v průběhu nabíjení nebo před jeho ukončením a stejně tak během vybíjení nebo při jeho ukončení, případně při dosažení nízké hodnoty SOC na některém článku.



a) Nevyvážená baterie, v průběhu času se může ještě vzdálit od rovnováhy



b) Balancování při 100% SOC



c) Balancování při 50% SOC

Obrázek 17. Ukázka nevybalancované baterie a balancování při různém SOC [12]

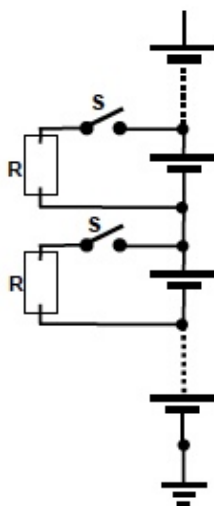
Pro funkci balancování lze využít dat popisující historii a SOH jednotlivých článků. Například články s nižší účinností lze balancovat od začátku dobíjení a tím zvýšit efektivitu a rychlost dobíjení.

Klasifikace

- 1) Podle naložení s přebytečnou energií článků s vyšším SOC
 - i Pasivní: přeměna na teplo
 - ii Aktivní: využití pro dobití článků s nižším SOC
- 2) Podle okamžiku, kdy se balancuje (též viz obrázek 17)
 - i Nejméně nabitý článek se blíží hodnotě 0% SOC
 - ii Nejvíce nabitý článek se blíží hodnotě 100% SOC
 - iii Jiné(např.: průběžné s využitím dat vypovídajících o historii článků)

7.3.1. Pasivní balancování

Nejednodušší způsob balancování spočívá v disipaci přebytečné energie. Není-li třeba vyšších proudů, obejde se bez přídatných chladičů a nabídne mnohým aplikacím postačující úsporné řešení. Energie se maří na spínaném rezistoru nebo tranzistoru umístěném na chladič.



Obrázek 18. Princip pasivního balancování [23]

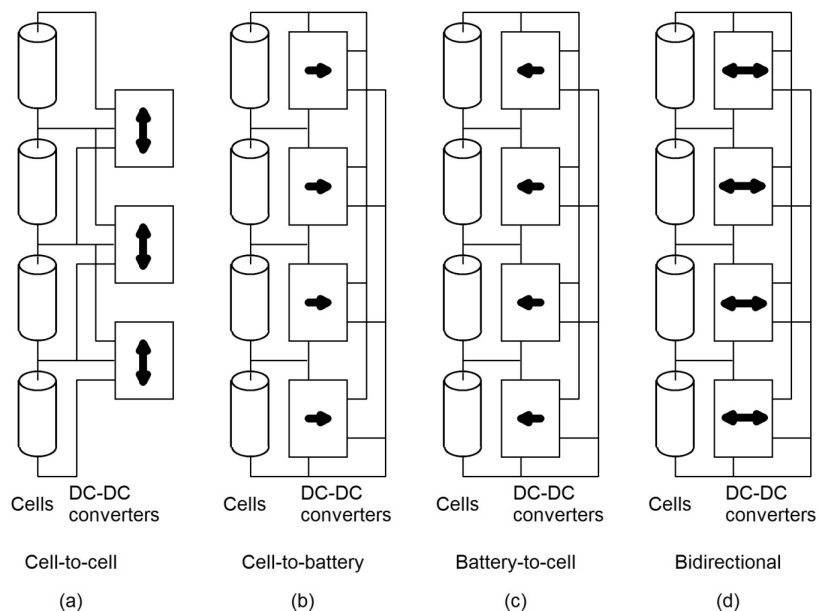
7.3.2. Aktivní balancování

Aktivní balancování se snaží přesouvat energii více nabitých článků na ty méně nabitě s minimální ztrátou energie. Jako dočasný zásobník energie může sloužit cívka nebo kondenzátor.

Základní techniky aktivního balancování pro baterii o n článcích

- Z článku do článku: energie se přesouvá mezi sousedními články
 - = vhodné pro malé baterie
 - + jednoduché
 - je-li třeba přesunout energii od prvního článku k poslednímu je účinnost velmi nízká
- Z článku do celé baterie: energie z článku o nejvyšším SOC je předána celé baterii
 - + vysoká účinnost, relativně jednoduché
 - n zvyšujících galvanicky oddělených DC-DC měničů

- Z baterie do článku: energie odebrána z celé baterie je předána článku s nejnižším SOC
 - = výhodné při použití n-článkové nabíječky (každý článek dobíjen zvlášť)
 - dražší měniče, primární strana je vysokonapěťová, n měničů
- Obousměrný: kombinuje předešlé dvě
 - Vhodné pro průběžné balancování (snaha mít články vždy vyvážené)
 - n-měničů



Obrázek 19. Techniky aktivního balancování [12]

Tabulka 7. Doporučené použití aktivního balancování

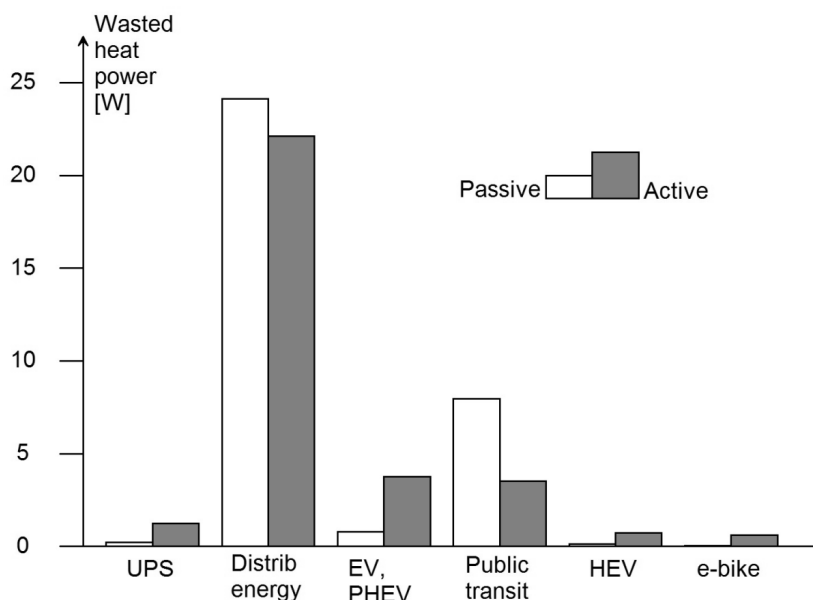
Aplikace	Odůvodnění
Velká baterie, vznik nerovnováhy vlivem výměny článků	Vyžaduje mohutné balancování
Velká baterie s požadavkem na rychlé nabití	Balancování vysokými proudy
Středně velké až velké baterie s požadavkem na vysokou účinnost	Co nejnižší disipace energie
Středně velké až velké baterie pracující za vysokých teplot	Vysoké samovybíjení

7.3.3. Aktivní vs. pasivní balancování

Nevýhody pasivního balancování jsou naprosto zřejmé. Energie je mařena za vzniku tepla, které v případě vyšších proudů musí být odváděno za pomoci přídavného chlazení. Na první pohled se zdá, že volba typu balancování bude především otázkou ceny, není tomu ale tak. Aktivní balancování má též určité nevýhody:

- Vyšší náklady, nižší spolehlivost, vyšší objem
- V některých případech zmařená energie může přesáhnout ekvivalent za použití pasivního balancování

Aktivní balancování se obecně doporučuje při požadavku na vysoké proudy nebo při problematickém odvodu tepla. Literatura [12] však uvádí, že výkony balancérů se obvykle pohybují v rozmezí 0,1 - 10 W na jeden článek a v těchto případech není potřeba vymýšlet jiný než jednoduchý pasivní způsob balancování. Svůj výrok autor knihy [12] podpírá obrázkem 20. Podle mého názoru se může jednat již o poněkud starší data. K této otázce se ještě vrátím v kapitole návrhu blokové struktury BMS.



Obrázek 20. Zmařená energie při aktivním a pasivním balancování v různých aplikacích [12]

7.3.4. Souhrn důležitých poznatků o balancérech

- Balancování vyrovnává SOC jednotlivých článků
- Náboj baterie je dán nejslabším článkem
- Baterie by měla být poskládána tak, aby zásahy balancéru byly minimální
- Vybalancovaná baterie, která není zrovna v provozu se vyvažuje z důvodu rozdílného samovybíjení
- BMS s vyrovnávacím proudem 100 mA dostičuje pro většinu aplikací Li-Ion
- Použitím vyrovnávacího algoritmu založeném na historii SOC lze zvýšit kapacitu balancování 2-5 krát

7.4. Nabíjení

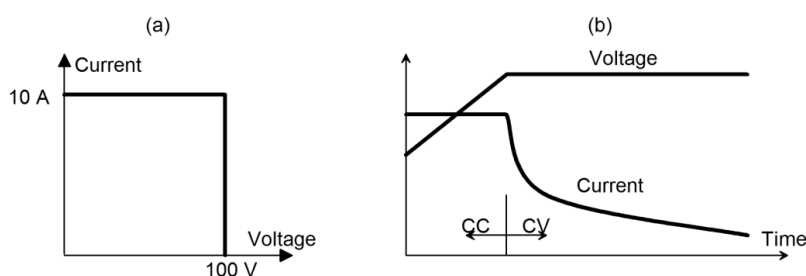
Nabíjecí charakteristiky se různí pro odlišné typy elektrochemických článků.

7.4.1. Algoritmy pro nabíjení Li-ion akumulátorů

CCCV nabíječky jsou standardní regulované zdroje s napěťovým a proudovým omezením, jejich charakteristika je vyobrazena na obrázku 21 v části a) vpravo je pak zobrazen průběh napětí a proudu, tzv. nabíjecí charakteristika. Ta má běžně dvě části, režim nabíjení konstantním proudem (CC) a konstantním napětím (CV). Pro případ ožívování podbitých baterií se někdy uvádí tzv. Trickle charge, který předchází

nabíjení v režimu CCCV s cílem zotavit akumulátor nabíjením malou hodnotou proudu (CC) a dosáhnout na spodní napěťovou mez SOA. [24]

Maximální nabíjecí proud a napětí specifikuje výrobce baterie, obě hodnoty se liší dle chemie článků. Pro zvolenou technologii ($LiFePO_4$) se uvádí maximální bezpečné nabíjecí napětí 3,6 V a maximální možné 4,2 V s tolerancí $\pm 1\%$. [wiki] Proudové omezení se opět různí i v závislosti na konstrukci článku. Obecně Li-Ion snáší poměrně vysoké nabíjecí proudy. Autor knihy [25] uvádí rozmezí proudů od 0,7 C do 1 C. U trakčních baterií je často snaha dosáhnout alespoň 80% SOC během několika jednotek, nejvýše desítek minut. Potom se nabíjecí proudy pohybují okolo 3 C i výše. Například NMC články optimalizované pro vyšší vybíjecí proudy podle výsledků testů publikovaných v [11] lze též nabíjet vyššími proudy. Bylo zjištěno, že při nabíjení proudem 3 C se životnost oproti nabíjení 1 C při zachování ostatních provozních podmínek prakticky neliší.



Obrázek 21. (a) charakteristika CCCV nabíječky (b) průběh nabíjecího proudu a napětí článku [12]

Vliv vyššího nabíjecího napětí Vyšší nabíjecí napětí umožní rychlejší dobití případně mírné navýšení kapacity baterie avšak za vysokou cenu. Li-Ion akumulátory jsou velmi citlivé na striktní dodržování mezí SOA, jak bylo uvedeno dříve a vyšší napětí tak dramaticky snižuje cyklickou životnost baterie. Během nabíjení se transportují ionty Lithia z katody na anodu. Při dodržování mezí SOA se molový zlomek¹ lithiových iontů katody x_{Li}^{pos} pohybuje v intervalu $\langle 0,5; 0,95 \rangle$. Ukončení nabíjení při hodnotě $x_{Li}^{pos} = 0,5$ dává prostor dosažení vyšší kapacity. Při vyšším napětím však dochází k rozkladu elektrolytu, produkty nevratně reagují s lithiovými ionty a baterie ztrácí kapacitu. Dalším důvodem degradace je vytěsnění kovového lithia na povrch anody (kompozit LiC_6) při dosažení záporného potenciálu, kde opět může dojít k reakci s elektrolytem a snížení kapacity. V extrémním případě může dojít i k vnitřnímu zkratu. [25]

Vliv vyššího nabíjecího proudu Vyšší nabíjecí proud s cílem snížit čas nabíjení docílí dřívějšího dosažení maximálního dovoleného napětí a dřívějšího přechodu do režimu CV, který při zachování podmínky ukončení nabíjení (pokles proudu na 0,05 C) bude trvat stejně dlouho. Výraznější časové úspory lze dosáhnout při současném posunutí hranice maximálního dovoleného napětí. To ovšem, jak je uvedeno výše, má významný negativní dopad na životnost akumulátorových článků.

¹ molový zlomek $x(X)$ látky X v soustavě je dán podílem látkového množství této látky $n(X)$ a celkového látkového množství n_s jednotlivých složek v soustavě.

7.5. Funkce a části BMS

Funkce BMS jsou byly uvedeny již v úvodu kapitoly a dále také v rozdělení systému pro správu baterie - sekce 8.1. Zbývá několik slov k realizaci některých funkčních částí.

7.5.1. Měřicí obvody

Základní funkcí každé BMS je měření napětí jednotlivých článků (napětí celé baterie lze dopočítat). Sledování teploty nemusí striktně připadat na každý článek, podle použití může být zvolenou pouze jedno teplotní čidlo pro celou baterii. Naposled je nutné pro udržování článků v SOA měřit proud.

Metody měření napětí Měření obstarávají moduly BMS unit, které jsou zároveň napájeny z měřených článků. U digitálně provedených jednotek se napětí vzorkuje analogovým multiplexorem a přes A/D převodník předány mikroprocesoru. Trakční baterie na rozdíl od těch záložních vyžaduje častější čtení hodnot napětí v důsledku možných rychlých změn proudu, řádově je přijatelná vzorkovací perioda přibližně rovná jedné sekundě. Dále pro výpočet vnitřního odporu je důležité, aby čtení napětí jednotlivých článků probíhalo pokud možno zároveň. Požadovaná přesnost se odvíjí od způsobu výpočtu SOC. Pro přesnější odhad stavu nabití se užívá výpočet OCV s využitím znalosti vnitřního odporu a proudu baterie. Vztah mezi SOC vychází z modelu baterie a určení jeho parametrů z naměřených vybíjecích charakteristik, zřejmě též možno využít impulzní odezvy nebo jiných způsobů identifikace. Nejčastěji postačuje přesnost s nejistotou pohybující se od 10 do 30 mV. Uzemněná elektronika pracující na nízké napěťové hladině musí být galvanicky oddělena od článků spojených s HV obvodem.

Metody měření teploty Měření teploty se provádí z důvodu udržování v SOA, termální management a jiného dříve uvedeného. Teplotu lze efektivně měřit s použitím termistoru. K měření teploty bude dále věnován úsek v realizační části.

Metody měření proudu Proud je nutné měřit pro udržování baterie v SOA, důležitost tohoto měření byla podpořena dříve. Integrací proudu lze určit SOC. Další využití souvisí s kalkulací vnitřního odporu a zpřesnění odhadů SOC, SOH, ...

K realizaci měřicího obvodu lze přistoupit v zásadě jen dvojím způsobem. Buďto se měření postaví na bočníku s nízkým ohmickým odporem nebo na halově sondě.

8. Klasifikace BMS

BMS lze dělit na základě funkce (co dělá), technologie (jak to dělá), topologie (fyzické uspořádání) a balancování (kdy a jak balancuje).

8.1. Rozdělení BMS podle funkce

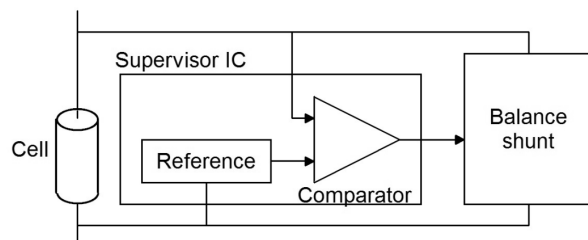
Na trhu se uplatňují různé BMSky. Od produktů, které pro vlastní správu a ochranu článků dělají velice málo až po komplexní systémy. Dělení převzaté ze zdroje [12] vypadá takto (shora dolů roste komplexita):

1. CCCV nabíječka
 - Funkce CCCV nabíječky byla popsána výše, též viz obrázek 21.
2. Regulátory
 - Každý článek obsahuje bypass větev se spínacím prvkem a v případě dosažení plného napětí je akumulátor překlenut. K přemostění dojde při dosažení napěťové meze, jednotlivé články by tak měly být v rovnováze. Drobné rozdíly se ale objeví v důsledku disperze hodnot vnitřního odporu.
 - Chování při proudovém přetížení: Pokud regulátory obsahují omezení proudu, dojde při nabíjení vyšším proudem k přebíjení článku. V opačném případě je ohrožen samotný regulátor, který proudovým přetížením může být zničen. Mimo správné dimenzování regulátoru v závislosti na výkonu nabíječky si lze pomoci i napěťovým omezením nabíječky – maximální napětí shodné s napětím plně nabitých baterie složené z aktuálně nabíjených článků (postupný odečet napětí přemostěných akumulátorů).
3. Senzory
 - Navíc se měří napětí (a teplota) každého článku a také proud baterií. Součástí bývá též kompilace dat a jejich vyhodnocení (nejčastěji odhad SOC, SOH, ...) jejich uložení, případně zobrazování na display. Pro signalizování abnormálního stavu může být použito i zvukových signálů.
4. Monitorující prvky
 - Autor [12] rozlišuje čistě měřící zařízení a monitorující prvky, který ve spojení s akčním členem mohou samostatně udržovat baterii v SOA. Ve zkratce lze říci, že společně s balancérem již poskytující veškerou nutnou ochranu baterie.
5. Balancéry
 - Zvýšená pozornost je věnována způsobu balancování. Problematika vyrovnávání napěťových rozdílů je uvedena v sekci 7.3.

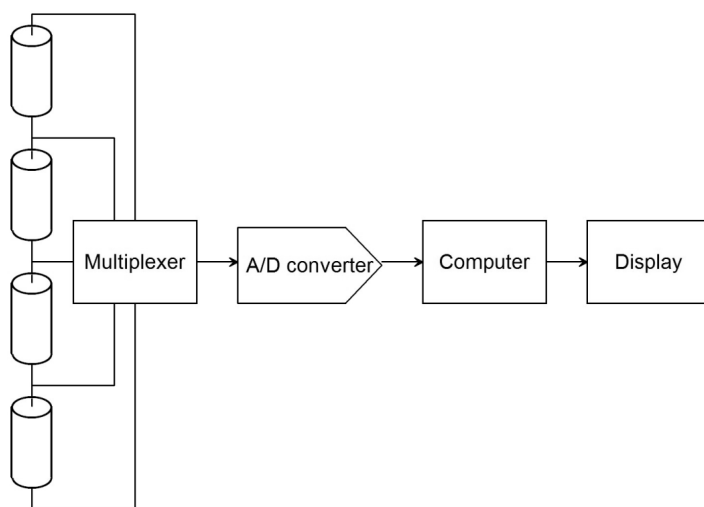
8.2. Rozdělení BMS podle technologie

V zásadě vyčleníme 2 technologie BMS, první typ s analogovým zpracováním signálu a druhý s digitálním. Jednodušší, analogové BMSky mají poměrně omezenou funkci. Balancování je poměrně snadno a spolehlivě realizovatelné pomocí komparátorů a spínaného bypass prvku. Nicméně v případě abnormálního stavu nelze čekat nic víc než

nezbytnou ochranu baterie bez informace o vzniku problému. Hlavní výhodou digitálního zpracování dat spočívá tedy v informovanosti systému o stavu jednotlivých článků (kromě napětí i teplota, nebo odhadnutý vnitřní odpor, SOH, ...). Možnost vyhodnocení dat a komunikace. U větších baterií je dnes vyžadována BMS s digitálním zpracováním dat.



a) Příklad analogové BMS s funkcí regulace



b) Příklad digitální BMS s funkcí regulace a měření

Obrázek 22. Porovnání analogové a digitální BMS [12]

8.3. Rozdělení BMS podle topologie

Odlišné konstrukce determinují chování BMSky dosti zásadně. Nepodepisují se pouze na ceně, ale především na spolehlivosti, náročnosti instalace a údržby nebo přesnosti měření.

1. Centrální

- Jeden BMS modul pro všechny články. N+1 vodičů pro sledování napětí N článků.
- Výhodou je cena, jednoduchá instalace i oprava a kompaktní provedení.

2. Modulární

- Konstrukčně velmi podobné centrální topologii. Opět jeden BMS modul spravuje více článků.
- Výhody oproti centrální: kratší kabely, použitelnost pro různé baterie

- Nevýhody oproti centrální: o něco dražší, více kabelů, nevyužité vstupy (jeden modul pro jeden stack)
3. Master-Slave
- Podobné modulární topologii s tím rozdílem, že master jednotka neslouží pro vyčítání dat ze senzorů, ale pro jejich zpracování a komunikaci.
 - Výhody a nevýhody jsou v zásadě shodné s modulární topologií. Cena slave modulů je však obvykle nižší.
4. Distribuované
- Tato topologie se zásadně odlišuje od předchozích. Desky BMS jsou přímo spojeny s články, které měří. Namísto mnoha kabelů pro spojení článků s moduly je zde pouze několik komunikačních linek. Komunikaci a výpočty zajišťuje BMS Controller.
 - Výhody oproti předchozím: spolehlivost, signalizace chyb pomocí LED na DPS, přesnost měření, lépe přizpůsobeno pro měření většího množství veličin, všestrannost.
 - Nevýhody oproti předchozím: cena, náročnější instalace a manipulace.

Tabulka 8. Porovnání topologií BMS [12]

	<i>Kvalita měření</i>	<i>Odolnost proti rušení</i>	<i>Všestrannost</i>	<i>Bezpečnost</i>	<i>Cena elektro-níky</i>	<i>Cena montáže</i>	<i>Cena údržby</i>
Centrální	√√	√√√	√	√	√	√√	√
Master-Slave	√√	√√√	√√	√	√√√	√√	√
Modulární	√√	√√√	√√	√	√√√	√√	√
Distribuované	√√√	√√	√√√	√√√	√√√	√	√√

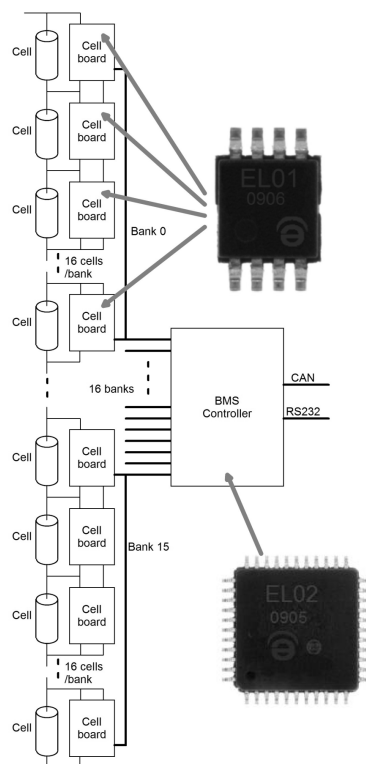
√√√ = Nejvyšší; √√ = Střední; √ = Nejnižší

Část IV.

Zvolený koncept BMS

9. Bloková struktura

Pro volbu topologie zamýšlené BMS je vhodné vyjít z parametrů bateriového boxu a vlastní baterie. Jak již bylo uvedeno dříve, pro aplikaci v elektrické trakci bude zapotřebí baterie s velkým počtem článků, z čehož vychází výhodně BMS s distribuovanou topologií. Jednotky BMS tak budou děleny na měřicí a balancující moduly (BMS measurement ICs) umístěné v těsné blízkosti článků a hlavní modul (BMS master) s mikroprocesorem.

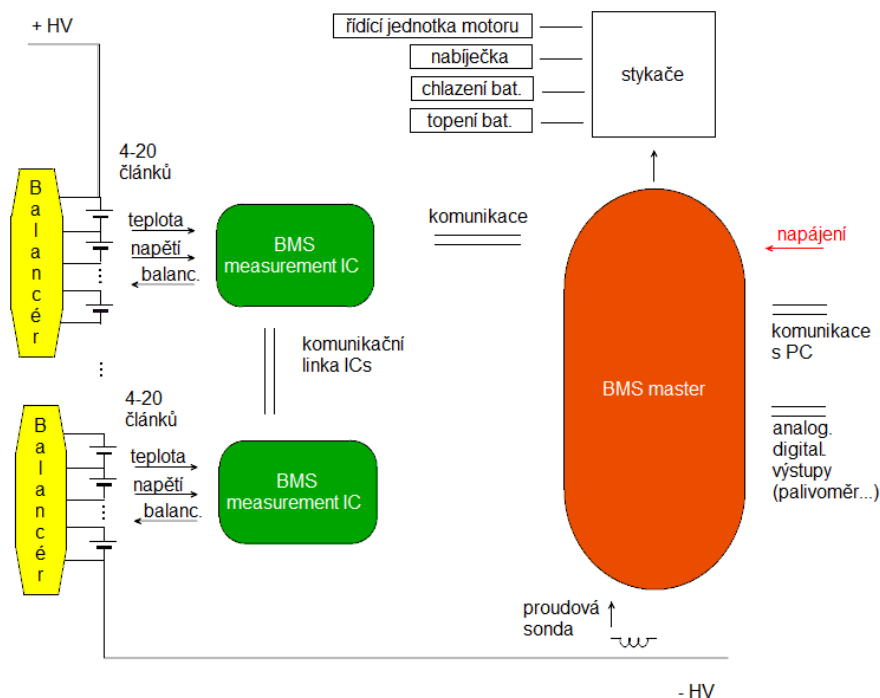


Obrázek 23. Distribuovaná topologie BMS - složeno z množství „BMS cell boards“ a jedné jednotky „BMS master“ [12]. V příloze E je schéma se zvolenými čipy od TI - bližší popis uveden v sekci 9.1.

Správa baterie BMS je záležitostí navrhovanou společně s baterií, tedy prodává se často v provedení na míru. V opačném případě musí návrh počítat se všemi požadavky potenciálních aplikací tohoto systému. Jednou věcí je připravenost softwaru pro různé elektrochemické články, další je modularita nebo dostatek vstupů a výstupů. Samostatnou kapitolou je též komunikace či práce s naměřenými a dopočtenými daty.

V našem případě jde o návrh BMS systému, který bude pokud možno připraven pro širší škálu aplikací. Předpokládá se uplatnění pro různé Lithiové baterie. Algoritmy udržování baterií v SOA či jejich dobíjení budou jednotné, pouze bude možné volit

parametry článků. V hlavním programu bude založeno několik objektů pro různé typy článků.



Obrázek 24. Blokové schéma BMS

K přizpůsobení baterii patří též možné spínání temperovacích prvků nebo jiných přídatných zařízení. Pro tyto účely jsou k dispozici výstupy ovládací stykače. Často se též požaduje z bezpečnostních důvodů použít pro přerušování HV obvodu speciálního spínacího prvku zvaného AIR (Accumulator Isolation Relay), které má též v režii BMS MCU. Trakční systém obsahující měniče s filtry čítající mohutné kondenzátory opět může vyžadovat spínání předbíjecího (precharge) a vybíjecího (discharge) obvodu.

9.1. Výběr BMS ICs a MCU

Obvody pro sledování a balancování Li-Ion článků v poměrně hojné míře nabízí řada výrobců. Primárně jsem vycházel ze srovnání uvedeného v literatuře [12], později jsem našel od autora této knihy - Davide Andrea také aktuální porovnání uvedené na webu[26].

Předešlý zdroj nabízí celou řadu vhodných čipů, proto jsem při výběru procházel stránky výrobců i s uživatelskými fóry a hledal zkušenosti a dostupnost produktů. V tomto směru je velmi výhodné zvolit jednu z variant od společnosti Texas Instruments, která je ochotna zaslat zdarma vzorky i do České Republiky. Zkušenosti uživatelů je mnoho, některé ale upozorňují na určité problémy. Typické pro dřívější produkty bylo omezené množství sériově spojených ICs v tzv. Daisy Chain. Davide Andrea u těchto čipů uvádí na svém webu [26] maximální množství článků v serii 192, což z pohledu této práce omezující není.

9.1.1. BQ76PL536A

Modul plní funkci monitoringu a balancování tří až šesti Li-Ion článků libovolného chemického složení. Blokové schéma z datasheetu je umístěné v příloze F. Bloky jsou barevně odlišeny a kategorizovány. Mimo jiné si lze všimnout sekundární ochrany zajištěné zabudovanými komparátory pro napětí a teplotu. Uživatel si může naprogramovat úroveň, časové zpoždění reakce a případně použít výstupy pro signalizaci překročení mezí. Pro účely vyrovnávání napětí článků jsou k dispozici piny pro spínání externího balancéru, který určuje balancující proud. V datasheetu jsou uvedeny kompletní informace k implementaci, jejich část naleznete v příloze G.

9.1.2. MSP430F5529

Mikroprocesor pracuje s 16-bitovými instrukcemi z redukované sady (RISC). Obsahuje mimo jiné 4 čítače, několik capture/compare jednotek, 12-bit AD převodník a 16-bit registry. Pro nahrávání programu lze použít rozhraní JTAG, který firma běžně používá.

TA0 je 16-bit čítač s 5 capture/compare registry. Asynchronní řízení programu tak může zajistit přerušení přímo od timeru (přetečení) nebo od každého z capture/compare registrů. Podobně TA1 a TA2 jsou 16-ti bitový, přísluší jim však pouze 3 capture/compare registry.

TB0 je čítač s větším množstvím (7) capture/compare registrů, který je primárně určen pro podporu AD převodu měřených napětí baterie nebo sledování jiných externích analogových signálů.

Analogově číslicový převodník je 12-ti bitový a disponuje vyrovnávací pamětí (pro 16 slov o 12-ti bitech). Vyrovnávací paměť umožňuje provést 16 převodů bez jakéhokoliv zásahu CPU (bez přerušení).

Další klíčové vlastnosti jsou uvedeny v seznamu níže:

- Maximální počet sériově spojených Li-Ion článků 192
- Připraveno pro termistor $10\text{ k}\Omega$ při $25\text{ }^\circ\text{C}$ s negativním teplotním koeficientem
- JTAG
- Hardwarová násobička (32 bit)
- 8 nezávisle programovatelných I/O portů (8 bit)

9.2. Upřednostněný způsob balancování

Otázka volby pasivního či aktivního balancování je postavena v první řadě na uvažovaných proudech při vyrovnávání napětí článků. V teoretické části jsou uvedeny případy, kdy baterie bude vyžadovat vyšší vybíjecí proudy a nakonec i aplikace pro které je aktivní balancování vhodné. Tato literatura ovšem též kalkuluje s mizivou účinností aktivních balancérů. To však podle současně dostupných studií již nemusí odpovídat realitě. Dříve uvedené základní techniky aktivního balancování by bylo vhodné poněkud rozšířit. Základní rozdělení zřejmě zůstává stále v platnosti, to ale neplatí o dosažených efektivitách. Zdroj [27] uvádí mimo návrhu velmi perspektivního způsobu aktivního balancování též srovnání současných technologií aktivního balancování.

Tabulka 9. Srovnání perspektivních technologií aktivního balancování podle dosažené účinnosti [27]

Balancing topology	Efficiency
PACK-to-CELL	82 % ¹
CELL BYPASS	>90 % ²
PACK-to-CELL	<83 % ¹
BiDi-PACK-CELL	82 %
External-to-CELL	85 %
PACK-to-CELL	80 %
CELL-to-CELL	85 %
CELL-to-CELL	56 %
CELL-to-CELL	80 % ³
This work	>90 %

¹ Efficiency calculated from datasheets² Not portable to high power batteries³ Assumed by the author

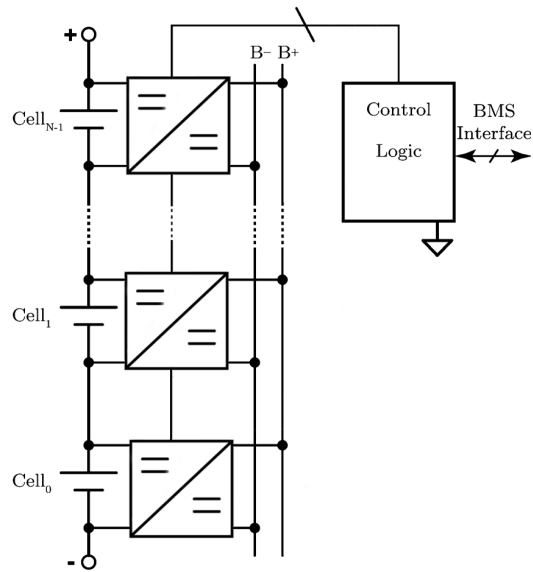
9.2.1. Argumenty pro volbu aktivního balancéru

- Velikost baterie:
 - Množství článků zvyšuje pravděpodobnost nehomogenity akumulátorů
 - Vysoká energetická kapacita a tomu odpovídající vyšší vyrovnávací proudy
- Nehomogenitu článků může zanechat též:
 - Výměna jednotlivých článků
 - Vyšší teplota
- Přijatelná cena balancéru v porovnání s cenou Li-Ion článků (více než 10 tisíc Kč/čl.)

9.2.2. Popis navrženého balancéru

Tato práce původně vznikla nad unikátním návrhem balancéru, který mi předal vedoucí této práce. BMS není na trhu žádnou novinkou a tak je třeba se odlišit od konkurence. V tomto případě by komparativní výhodu měl tvořit právě balancér. Otázku balancování jsem tedy podrobně studoval z několika zdrojů a našel podobná řešení (Cell to Cell) s poměrně vysokými účinnostmi (viz tabulka 9). Neúčinnější balancér z tabulky 9 má velmi podobnou myšlenku a bude dále popsán v části 9.2.3.

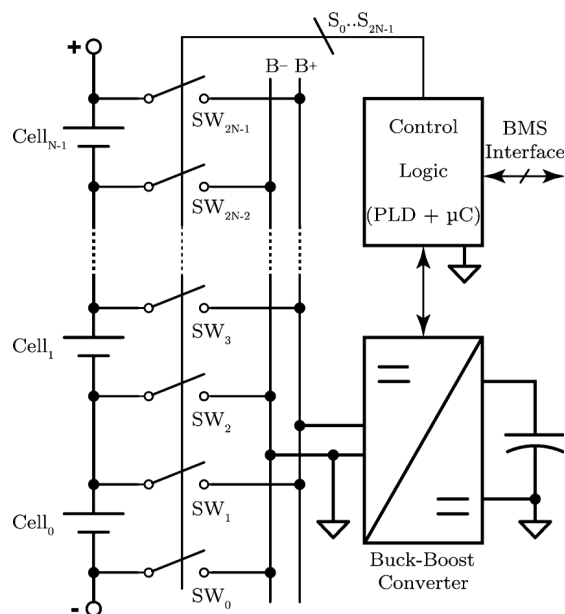
Myšlenka navrhovaného způsobu vyrovnávání napětí článků spočívá v jejich paralelním spojení přes DC/DC měniče (galvanicky odděleno). Libovolnou kombinaci článků je takto možné připojit na společnou sběrnici pomocí synchronně řízených měničů, které též umožní obousměrný tok energie. Tato technika balancování by měla umožnit vytvoření robustní baterii, u které bude možné měnit články na konci životnosti jednotlivě. Oproti většině jiných metod je zde totiž možné balancovat množství článků zároveň. Měnič bude dimenzován na proud určený v sekci 9.2.4. Konstrukce měniče bude obohacena o vysokofrekvenční planární transformátor s nízkou hmotností. Tento transformátor je realizovat přímo v společnosti Poll, případně je možné jej zakoupit od americké firmy Payton.



Obrázek 25. Principiální zapojení navrhaného aktivního balancování (upravený obrázek ze zdroje [27])

9.2.3. Technika balancování publikovaná v [27]

Jedná se též o C2C techniku právě s tím rozdílem, že zde je možné připojit ke společné sběrnici vždy pouze jeden článek.



Obrázek 26. Principiální schéma balancéru publikovaném v [27]

Důležitý je závěr této studie, kde autor hodnotí techniku balancování jako vysoce efektivní. Dosažená účinnost je uvedena v již mnohokrát zmíněné tabulce 9.

9.2.4. Výpočet maximálního proudu balancéru

Odhad proudů balancéru není tak jednoduché provést, neboť tento proud závisí na odlišnosti článků v aktuální hodnotě SOC, ale též v jejich maximální kapacitě a vnitřním odporu. A pochopitelně tato hodnota odvisí od požadovaného nabíjecího proudu a způsobu balancování (obousměrné/jednosměrné). Je tedy potřeba zvolit domnělou maximální odchylku v parametrech článků. Budeme uvažovat odchylku kapacity, nikoliv balancování vniklé v důsledku významné odchylky v SOC. Tento scénář by měl odpovídat běžnému provozu baterie. Odhad vyjde ze vztahu mezi jednotlivými kapacitami a proudy v oblasti nabíjecího režimu CC:

$$I_1 : I_2 : \dots : I_n = C_1 : C_2 : \dots : C_n. \quad (28)$$

$$I_x = + \frac{I \cdot C_x \cdot \sum_{i=1}^n U_i}{\sum_{i=1}^n U_i \cdot C_i}, \quad (29)$$

kde x je index sledovaného článku, proud I potom značí celkový proud baterií. Pozorný čtenář však okamžitě zjistí, že tato rovnice neposkytne jasný výsledek. Jednu hodnotu balancujícího proudu bude nutné zvolit. Předchozí rovnici je proto možné dále upravit takto:

$$I_{x\,bal} = I_{x0\,bal} + \frac{I \cdot (C_x - C_{x0}) \cdot \sum_{i=1}^n U_i}{\sum_{i=1}^n U_i \cdot C_i}. \quad (30)$$

Jak bylo řečeno výše, nyní nepředpokládáme větší rozdíly v napětí jednotlivých článků, rovnice lze tedy zjednodušit:

$$I_{x\,bal} = I_{x0\,bal} + \frac{I \cdot (C_x - C_{x0})}{\sum_{i=1}^n C_i}. \quad (31)$$

Pro maximální zvolený rozdíl v kapacitě článků 20%, který odpovídá rozdílu mezi článkem zcela novým a článkem na konci své životnosti, pak vychází nejvyšší balancující proud shodně 20% z proudu nabíjecího pro jednosměrné balancování a 10% pro navržené obousměrné balancování.

Pro baterii o kapacitě 300 Ah nabíjení proudem 1 C to znamená proud obousměrným balancérem až 30 A. Vybíjení však může probíhat i vyššími proudy. Tímto výpočtem tak vychází vyrovnávací proud dosti vysoký. Výpočet vychází z předpokladů, že bateriové články bude možné měnit separátně a prodloužit tak životnost baterie jako celku. Podobný výpočet je též uveden ve studii [28]. Nakonec i komerčně dostupný produkt od společnosti MGM compro, který počítá s odchylkou v parametrech článků do 5% je dimenzován na odpovídající vyrovnávací proud o hodnotě 5% nabíjecího proudu, který je i zde roven 1 C.

V neposlední řadě problematika balancování zahrnuje zajištění chlazení pro odpovídající množství disipované energie. V tomto případě ztrátové výkony jednotlivých

měníčů odpovídají hodnotě získané vyčíslením rovnice:

$$\Delta P_x = |I_{x\,bal}| \cdot U_x \cdot (1 - \eta_x), \quad (32)$$

kde ΔP_x je ztrátový výkon a η_x účinnost měniče.

Výpočet celkové disipované energie i tepla vyvinutého jednotlivými měniči je opět komplikovanější. Nejlépe bude zvolit statistický přístup a namodelovat situaci s několika články o určitých odchylkách v jejich parametrech. Diplomová práce však počítá s testováním BMS na malých článcích a tak se chlazením nyní nebudu podrobněji zabývat. Regulace teploty bateriového boxu je samostatnou kapitolou patřící spíše ke konstrukčnímu řešení celé baterie. Předpoklad trvale nerovnoměrného ohřevu jednotlivých měničů v důsledku nehomogenity článků vybízí k připojení měničů na společný chladič.

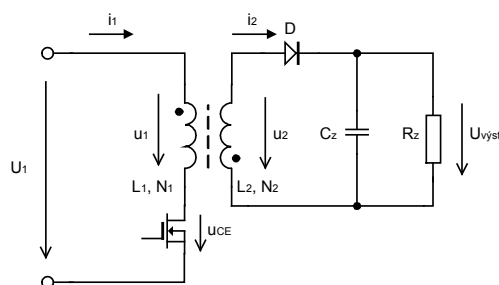
10. DC/DC měnič pro balancování

Měnič je hlavní a v podstatě jedinou součástí zamýšleného balancéru s principiálním zapojením uvedeným na obrázku 25. A bude též výhradním předmětem realizační části. Právě zamýšlený balancér by mohl na trh přinést něco nového a jako každá nová myšlenka bude potřebovat otestovat. Návrh desky s BMS ICS Texas Instruments zveřejnil a jednalo by se tak spíše o pečlivější výtvar osazovacího výkresu s ohledem na konkrétní aplikaci. Případně by bylo možné též tuto desku s čipy zakoupit za několik stovek dolarů. V této fázi ale konkrétní uplatnění před sebou nemáme, tudíž je výhodnější se zabývat podrobněji jinými částmi. Po balancéru se dalším cílem eventuálně stane vývoj části programu BMS MCU. Důležitou částí je sledování baterie a odhad jejich parametrů, kde mají mnohé systémy pro správu baterií mezery.

Vzhledem k volbě předmětu realizace, kterým bude měnič pro vyrovnávání napětí článků, se navrhovaná BMS bude podle klasifikace uvedené v části 8.1 řadit do kategorie balancérů.

10.1. Blokující měnič (FLYBACK)

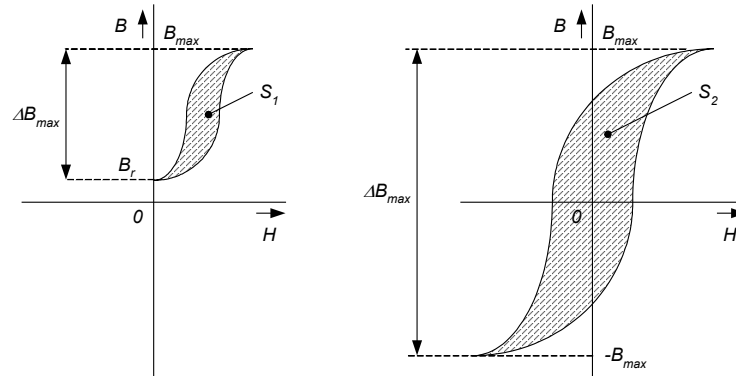
Název blokujícího měniče pramení z principu činnosti. Kdy oproti měničům propustným dochází k předání energie v době vypnutých tranzistorů. V okamžiku sepnutí tranzistorů je na impulzní transformátor přivedeno napětí (v tomto případě z LiPol článku) a dochází k akumulaci energie po dobu otevření řízených ventilů a v době vypnutí pak dochází k jejímu odčerpání. V případě blokujících měničů je tedy velikost jádra transformátoru úměrná velikosti přenášeného výkonu. Z toho důvodu se pro výkonové aplikace volí spíše měniče propustné. Balancující výkony jsou však podle teoretických předpokladů poměrně malé a nebudou tak vyžadovat rozměrný magnetický obvod.



Obrázek 27. Jednočinný blokující měnič [29]

Sekundární strana nevyžaduje filtrační tlumivku, dostačující je akumulací prvek a dioda. Na samotný transformátor lze nahlížet jako na tlumivku s dvojím vinutím na společném magnetickém obvodu.

Jednočinný je měnič dostal své jméno z důvodu uskutečnění přenosu energie jednou za spínací periodu. Propustné typy mohou být i dvojčinné, čímž efektivněji využijí transformátor. Sycení feromagnetika dvojčinných měničů je oboupolaritní a rozkmit sycení ΔB_{max} je s ohledem na remanentní indukci více než dvojnásobný. Graficky tuto skutečnost zachycuje obrázek 28.



Obrázek 28. Sycení jádra jednočinného (vlevo) a dvojčinného měniče (vpravo) [29]

Rozkmit sycení ΔB_{max} je důležitým výchozím parametrem pro návrh magnetického obvodu transformátoru a bude mu ještě věnována pozornost.

10.1.1. Transformátor pro flyback měnič

Hlavní součástí měniče je vedle spínacích prvků transformátor, který do jisté míry určuje dosažitelné parametry měniče. Jeho návrh vychází mimo jiné z velikosti výstupního napětí, rozsahu vstupního napětí, pracovní frekvence a zmíněného přenášeného výkonu. Problematika návrhu vyžaduje určité teoretické znalosti, které budou uvedeny na následujících řádcích.

Spražený magnetický tok Transformátor v zásadě tvoří soustava vzájemně magneticky vázaných cívek. Dále bude pro jednoduchost popsán transformátor s jedním primárním a jedním sekundárním vinutím. Vazbu elektrického a magnetického pole zachycuje Faradayův indukční zákon:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (33)$$

Pro jeden vodič tvořící smyčku l bude indukované napětí rovno:

$$u(t) = \frac{d\Psi}{dt}. \quad (34)$$

Záporné znaménko je vynecháno pro případ, že na cívku se hledí jako na spotřebič (primární vinutí). Taková cívka pak generuje časově proměnné magnetické pole:

$$\Psi(t) = \Psi_0 + \int u(t) \cdot dt. \quad (35)$$

Magnetický tok je složen s integrační konstanty Ψ_0 a proměnného toku úměrného integraci napětí na cívce. Všimněme si, že proměnná složka je úměrná velikosti proudu pouze ve speciálním případě (lineární magnetický obvod). Z toho vyplývá, že magnetický tok je shodný pro vzduchové cívky i cívky s feromagnetickým jádrem. Rozdíl těchto dvou cívek spočívá pouze v průběhu proudu a jeho maximální hodnoty.

Pro návrh magnetického obvodu cívky je užitečné vyjádřit sprážený magnetický tok též takto:

$$\Psi(t) = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}, \quad (36)$$

kde S je orientovaná plocha s hraniční křivkou l (rovnice 33). Křivka l je umístěna v ose vodiče a probíhá celou jeho délkou.

Tento vztah je obecně platný, avšak z praktického pohledu obtížně aplikovatelný. Metodou konečných prvků jej dokáží vyčíslit některé softwary (např. Ansoft Maxwell 3D) jinak lze určení maximální hodnoty magnetické indukce ze známého průběhu napětí zjednodušit.

V reálné aplikaci se část magnetického obvodu bude uzavírat mimo feromagnetické jádro, rovnice 36 nabude této podoby:

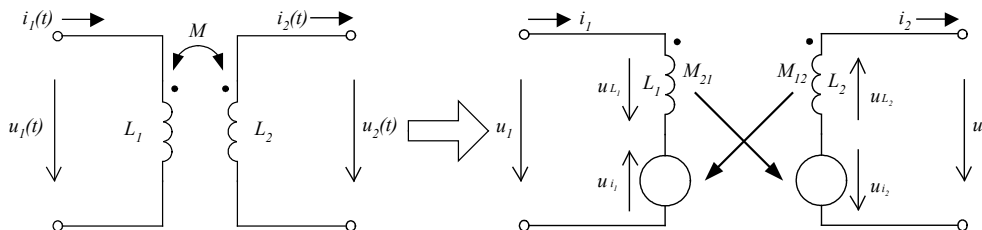
$$\Psi(t) = \oint_{S_{vz}} \vec{B}_{vz} \cdot d\vec{S}_{vz} + \oint_{S_{Fe}} \vec{B}_{Fe} \cdot d\vec{S}_{Fe}. \quad (37)$$

Zjednodušení spočívá v zanedbání rozptylového toku, předpokladu homogenně rozloženého magnetického toku ve feromagnetiku a kolmosti siločár k průřezu jádra. Potom lze psát:

$$\Psi(t) \approx N \cdot B_{Fe}(t) \cdot S_{Fe} = N \cdot \Phi(t). \quad (38)$$

Vztah je použitelný pro cívky se zanedbatelným rozptylovým tokem.

Lineární model transformátoru napětí Transformátor napětí jakožto lineární čtyřpól lze popsat čtvercovou maticí 2×2 . Prvky matice, vlastní a vzájemné indukčnosti jsou považovány za konstantní. Pro zjednodušení budu předpokládat ideální napěťový zdroj na primární straně a nulové odpory vinutí.



Obrázek 29. Transformátor jako dvě magneticky vázané cívky (lineární model) [29]

Vzájemná vazba M umožní indukci napětí na sekundárním vinutí (u_{i1}):

$$u_1(t) = u_{L1}(t) - u_{i1}(t), \quad (39)$$

$$u_2(t) = u_{i2}(t) - u_{L2}(t). \quad (40)$$

Pro lineární magnetický obvod je možné psát:

$$u_1(t) = L_1 \cdot \frac{d i_1(t)}{d t} - M_{12} \cdot \frac{d i_2(t)}{d t}, \quad (41)$$

$$u_2(t) = M_{21} \cdot \frac{d i_1(t)}{d t} - L_2 \cdot \frac{d i_2(t)}{d t}. \quad (42)$$

Z principu reciprocity platné pro lineární pasivní čtyřpóly plyne:

$$M_{12} = M_{21} = M. \quad (43)$$

Přenosové vlastnosti transformátoru tedy popisují 3 nezávislé parametry: L_1 , L_2 a M nebo L_1 , L_2 a k . Činitel vazby souvisí se vzájemnou indukčností následovně:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}. \quad (44)$$

Činitel vazby popisuje dokonalost magnetické vazby nebo též existenci rozptylových toků. Nabývá hodnot 0 až 1 (dokonalá vazba). V technické praxi lze rozlišit rozptylové a těsné transformátory. U rozptylového transformátoru je hodnota činitele vazby menší než 1, u těsného je potom snaha přiblížit se vazbě dokonalé $k \rightarrow 1$ (reálně $k \leq 0,9995$).

Základní fyzikální model představují rovnice 41 a 42. Nejčastěji lze tuto soustavu použít pro výpočet napětí při známých proudech a parametrech transformátoru (tj. impedanční matice).

Lineární model transformátoru bude použit v simulaci elektrického obvodu měniče, který poslouží k určení (ověření) parametrů jednotlivých prvků měniče.

10.2. Návrh měniče

Pro účely balancování bude použit blokující měnič s tranzistorem na primární i sekundární straně transformátoru. To umožní v jedné fázi přesun energie z primární strany na sekundární a v druhé fázi opačně. Lithium-Ion články s vyšším napětím budou v první fázi více proudově namáhány a v druhé zase méně. Tímto způsobem by mělo dojít k postupnému vybalancování článků a to bez zpětnovazebného řízení pulzů. Pulzy obou tranzistorů budou mít pevnou střihu a budou fázově posuny o $\frac{T}{2}$. S ohledem na tzv. deadtime střída musí být menší než 0,5 (zvolme 0,45).

Zapojení jednoho tohoto měniče je umístěné v příloze I. Toto schéma též posloužilo k ověření návrhu měniče. Balancování několika článků bude provedeno přednostně v simulinku a uvedeno v části V.

10.2.1. Bližší popis činnosti blokujícího měniče

Vyjdeme z původního měniče s jedním tranzistorem - viz obrázek 27. K objasnění principu činnosti pomohou průběhy veličin uvedené v příloze H, která též pomůže objasnit rozdíl mezi měničem s jedním a dvěma tranzistory.

Při sepnutí tranzistoru T_1 dojde k nárůstu proudu primárním vinutím a s ním svázaného magnetického toku (podle rovnice 35). Počáteční hodnota proudu je nenulová pro oblast nepřerušovaných proudů, kde se I_0 vyjádří jako:

$$I_0 = i_{02}(t_{T1on}) \cdot \frac{N_2}{N_1}, \quad (45)$$

přičemž $i_{02}(t_{T1on})$ vyjadřuje proud sekundárním vynutím v okamžiku sepnutí T_1 , N_1 počet závitů primáru a N_2 počet závitů sekundárního vinutí.

Podobně i magnetický tok nedosahuje v okamžiku sepnutí T_1 nulové hodnoty, pokud měnič pracuje v oblasti nepřerušovaného proudu. V naší aplikaci ale předpokládáme, že měnič se bude nacházet v oblasti přerušovaných proudů.

Změna proudu během doby sepnutí T_1 lze vyjádřit:

$$\Delta I = \frac{U_1 \cdot t_1}{L_1}, \quad (46)$$

kde t_1 je doba otevření ventilu T_1 .

Po vypnutí T_1 dojde k přerušování proudu primárním vinutím a nárůstu proudu sekundárním vinutím. Magnetický tok, jakožto energetická veličina, se nemůže měnit skokově. Dochází tedy k plynulému poklesu magnetického toku po celou dobu vypnutí T_1 . Přitom na primárním vinutí je \dot{U}_1 , které se superponuje na napětí Li-Ion článku a podílí se napěťovým namáháním tranzistoru na primární straně. Nutnou podmínkou pro nepřesycování transformátoru je splnění nerovnosti (plyne z rovnice 35):

$$\int_0^{t_1} u_1(t) \cdot dt \leq \int_0^{t_2} \dot{u}_1(t) \cdot dt. \quad (47)$$

Při nesplnění výše uvedené nerovnosti dojde k přesycení jádra a značnému poklesu indukčnosti L_1 . Pokud nerovnice platí, lze psát:

$$U'_1 = U_1 \cdot \frac{s}{1-s}, \quad (48)$$

kde s je střída ($s = \frac{t_1}{T}$) a U'_1 napětí v závěrném směru.

Přepočítání na výstupní napětí vypadá takto:

$$U_2 = U'_1 \frac{N_2}{N_1} = U_1 \cdot \frac{s}{1-s} \cdot \frac{N_2}{N_1}. \quad (49)$$

Nyní můžeme též upravit rovnici pro přírůstek proudu primárním vinutím:

$$\Delta I = \frac{U_1 \cdot s}{L_1 \cdot f}, \quad (50)$$

kde f je spínací frekvence T_1 .

Pro návrh transformátoru z rovnice 50 vyjádříme indukčnost:

$$L_1 = \frac{U_1 \cdot s_{max}}{f \cdot \Delta I_{max}}. \quad (51)$$

Maximální hodnota proudu I_{1max} v čase t_1 je dána:

$$I_{1max} = I_0 \cdot \frac{N_2}{N_1} + \Delta I_{max}. \quad (52)$$

Při zanedbání pilovitého zvlnění nepřerušovaného proudu sekundáru a označení převodu transformátoru $p = \frac{N_2}{N_1}$ lze vztah dále upravit:

$$I_{1max} = p \cdot \frac{I_{2avg}}{1 - s_{max}} \Delta I_{max}. \quad (53)$$

Nyní lze uvést důležitou rovnici pro výpočet minimálního počtu závitů tak, aby nedocházelo k přesycení transformátoru:

$$N_1 = \frac{L_1 \cdot I_{1max}}{(B_{max} - B_r) \cdot S_{Fe}}, \quad (54)$$

kde B_r je remanentní indukce, B_{max} je indukce pro mez nasycení jádra a S_{Fe} je ekvivalentní průřez magnetického obvodu.

Další klíčovou rovnicí pro výpočet parametrů transformátoru je vztah mezi indukčností a magnetickým odporem jádra:

$$L_1 = \frac{N_1^2}{R_m}, \quad (55)$$

kde R_m je magnetický odpor.

Magnetický odpor bývá u blokujících měničů záměrně zvyšován za účelem dosažení potřebné indukčnosti. Obvyklý způsob snížení magnetické vodivosti je přidání vzduchové mezery do magnetického obvodu. Vzduchová mezera má několik výhod. Pomůže zajistit nepřehřívání jádra a eliminuje závislost indukčnosti na velikosti proudu. Velikost vzduchové mezery δ lze vyjádřit:

$$\delta = \left(\frac{N_1^2}{L_1} - \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{l_{Fe}}{S_{Fe}} \right) \cdot \mu_0 \cdot S_{Fe}, \quad (56)$$

přičemž $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ je permeabilita vakua (též přibližně odpovídá permeabilitě vzduchové mezery), μ_r je relativní permeabilita feromagnetika, l_{Fe} střední délka siločár ve feromagnetiku.

V rovnici 56 lze při uvažování vysoké relativní permeability feromagnetického materiálu vynechat menšitele a ponechat v závorce pouze menšence. Tohoto vztahu bude dále využito pro výpočet parametrů magnetického obvodu transformátoru, vztah ale bude zřejmě nutné upravit s ohledem na geometrii magnetického obvodu.

Počet závitů sekundárního obvodu plyne ze vztahu:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_2 \cdot (1 - s_{max})}{U_1 \cdot s_{max}}. \quad (57)$$

Naposled výkon měniče v režimu přerušovaných proudů získáme následovně:

$$P = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot \Delta I_{max}^2 \cdot f. \quad (58)$$

10.2.2. Volba parametrů měniče

Vstupní veličinou je balancující proud, resp. výkon. Návrh uvažuje LiPol články o kapacitě 4,8 Ah, a nabíjení proudem 1 C. Z textu uvedeného v kapitole 9.2.4 plyne požadavek na balancující proud o velikosti 0,48 A. Balancující výkon dostaneme vynásobením tohoto proudu jmenovitým napětím článku (3,7 V), tj. 1,776 W.

Řešením soustavy rovnic 51 a 58 získáme indukčnost $L_1 = 7,8 \mu H$ a změnu proudu $\Delta I_{max} = 2,13 A$. S použitím vzorců 57 a 55 dostaneme $L_2 = 186,43 \mu H$.

Spínací frekvence je dána použitou budicí a řídicí deskou. Využijí DPS, které má firma k dispozici (úprava z jiného měniče) s $f = 100 kHz$.

10.2.3. Volba spínacích součástek

S ohledem na frekvenci, požadované proudy a závěrné napětí (ze simulace vychází desítky Voltů) bylo zvoleno následující:

- MOSFET 300 V, 42 A (STP46NF30 s pouzdem TO220)
- Rychlá dioda 200 V, $2 \times 10 A$ (VB200200G též s pouzdem TO220)

Zvolený tranzistor vyniká nízkou hodnotou odporu v propustném směru $R_{DS(on)} \leq 75 m\Omega$ a vysokým pulsním proudem $I_{DM} = 168 A$. Ovládací napětí $V_{GS} = \pm 20 V$ odpovídá budicímu obvodu, která máme pro měření k dispozici.

Poměr dovolených proudů tranzistoru a Schottkyho diody přibližně odpovídá převodu transformátoru. Nepředpokládají se významné proudové špičky při přesunu energie směrem do akumulátoru. Fyzicky se jedná o dvě diody v jednom pouzdře. Použití jedné součástky pro celý měnič není možné (galvanické oddělení). Proto jsem zvolil paralelní zapojení dvou diod z jednoho pouzdra a navýšení maximálního bezpečného proudu diodou.

10.2.4. Volba pasivních prvků

Kondenzátor sekundární strany musí být volen s ohledem na dovozené proudy, ze simulace vychází maximální hodnota přibližně $100 \mu F$. Naopak pro primární stranu můžeme určit minimální hodnotu, při které budou pulzní proudy akumulátorem prakticky nulové. Simulace se chová rozumně pro hodnoty vyšší než $2000 \mu F$.

10.2.5. Návrh transformátoru

Návrh transformátoru bude proveden ve 3 bodech:

- Výběr lakovaného vodiče
- Výběr jádra
- Výpočet vzduchové mezery

Výběr vodiče Při volbě vodiče se omezíme na lakovanou měď. Výpočtem určíme jejich minimální průřez. Maximální proudovou hustotu volím s ohledem na chlazení vinutí $J_{max} = 4 A \cdot mm^{-2}$. Proud primárního vinutí odhadnu shodný s maximálním balancujícím proudem, tj. $0,48 A$. Efektivní hodnota proudu bude však vyšší.

Pro zvolené $I_{avg} = 0,48 A$ a střihu $s_{max} = 0,45$ lze dopočítat efektivní hodnotu proudu. S využitím již známé změny proudu v průběhu sepnutí T1 $\Delta I_{max} = 2,13 A$ je možné napsat:

$$I_{ef max} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i^2 \cdot (\tau) \cdot d\tau} = \sqrt{\int_0^{0,45} \frac{2,13^2}{0,45^2} \cdot \tau^2 \cdot d\tau} \doteq 0,825 A. \quad (59)$$

Vzhledem k vysoké spínací frekvenci je nutné brát v potaz skinefekt. Ten soustředí proudovou hustotu na povrch vodiče. Průběh velikosti proudu v závislosti na vzdálenosti od povrchu vodiče je vyjádřen exponenciálou:

$$J(d) = J_s \cdot e^{-\frac{d}{\delta}}, \quad (60)$$

kde J_s představuje proudovou hustotu na povrchu vodiče a δ hloubku vniku, která se spočte následovně:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\omega \cdot \mu}}, \quad (61)$$

kde ρ je hustot materiálu.

Pro měď lze rovnici zjednodušit [30]:

$$\delta(mm) = \frac{65}{\sqrt{f}}. \quad (62)$$

Zvolený poloměr vodiče by měl být menší než hloubka vniku [30]. Podle firemních zkušeností by průměr vodiče při frekvenci $100 kHz$ neměl být větší než $0,4 mm$. Což je přibližně ekvivalentní předešlé podmínce.

10. DC/DC měnič pro balancování

Výpočet poloměru vodiče na základě zvoleného maximálního proudu a proudové hustoty:

$$r = \sqrt{\frac{I_{ef\ max}}{J_{max} \cdot \pi}}. \quad (63)$$

Zvolený vodič bude mít poloměr 0,2 mm, což odpovídá průřezu 0,125 mm². Dle tabulek vychází činitel plnění $k_p = 0,63$. Jelikož ze vzorce 63 vychází minimální poloměr přibližně 0,26 mm použijeme svazek dvou vodičů.

Nakonec můžeme vypočítat proudovou hustotu na povrchu vodiče jako násobek zvolené maximální průměrné proudové hustoty a to s využitím vzorce 65 a :

$$J_{01} \cdot S_{Cu} = \int \int_N J(x, y) \cdot dx \cdot dy, \quad (64)$$

kde plocha N vyjadřuje průřez vodičem. Tato plocha je ohraničená kružnicí $x^2 + y^2 = 0,2^2$. Pro výpočet integrálu bude přejít do polárních souřadnic:

$$J_{01} \cdot S_{Cu} = J_{02} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{0,2} \rho \cdot e^{\frac{-(0,2-\rho)}{0,206}} \cdot d\rho \cdot d\varphi, \quad (65)$$

kde ρ je poloměr, φ označuje úhel a ρ v integrandu je Jakobián transformace do polárních souřadnic.

Výsledkem je povrchová proudová hustota $J_{02} \doteq 1,352 \cdot J_{01}$. Nyní můžeme ještě využít již známý průběh proudové hustoty a porovnat ohmické ztráty ve vodiči v případě průchodu stejnosměrného proudu a proudu střídavého s frekvencí 100 kHz. U střídavého proudu předpokládáme harmonický průběh. Poloměr vodiče vezmeme 0,2 mm a proudové zatížení $J_{01} = 4 \text{ A/mm}^2$. Dále předpokládáme homogenní vodič, jehož odpor je dán pouze měrným odporem, jeho délkou a průřezem. Numerickou integrací (Matlab) vychází ztrátový výkon při průchodu dříve definovaného střídavého proudu přibližně o 4% vyšší.

Výběr jádra

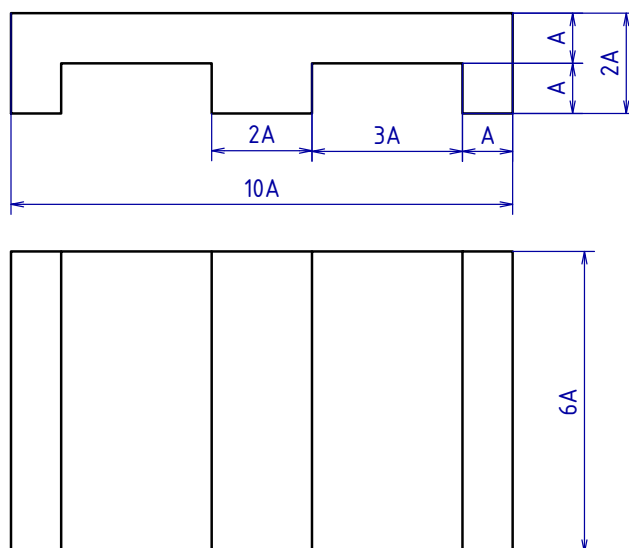
Pro jádro vzhledem k frekvenci nelze použít transformátorové plechy. V úvahu připadají amorfní materiály nebo ferity. Nám postačí levnější ferity. Ty nabízí relativní permeabilitu v řádu tisíců a sycení do 0,3 – 0,4 T. Z výpočtu plyne, že sycení není omezující. Výhoda vyšší odolnosti proti přesycení jde tedy stranou.

Proto volím ferit ELP 32/6/20 (materiál N87) s parametry:

- Ekvivalentní délka siločáry $l_e = 41,4 \text{ mm}$
- Ekvivalentní průřez jádra $S_e = 130 \text{ mm}^2$
- Mez saturace $B_s^* = 300 \text{ mT}$
* uvedeno pro $H = 250 \text{ A/m}$; $f = 10 \text{ kHz}$; $T = 100 \text{ °C}$

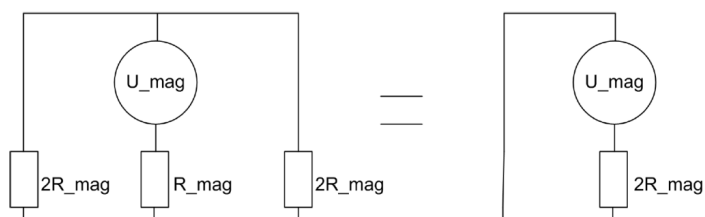
Ze vzorce 54 vychází minimální počet závitů primárního vinutí přibližně jedna. Sycení nás tedy neomezuje.

Výpočet vzduchové mezery Společnost TDK vyrábějící zvolené ferity nedovoluje šířit a upravovat obsah katalogových listů. Tvar feritu tak zachycuje následující obrázek.



Obrázek 30. Tvar a rozměry feritu ($A = 3,175 \text{ mm}$)

Pro uvažování pouze magnetického odporu vzduchové mezery lze počítat se zjednodušeným magnetickým obvodem.



Obrázek 31. Schéma zjednodušeného magnetického obvodu

Vzduchová mezera se potom s dostatečnou přesností určí ze vzorce:

$$\delta = \frac{N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot S_e}{2L_1}. \quad (66)$$

Počet primárních závitů volím 5, čemuž odpovídá vzduchová mezera $\delta = 0,26 \text{ mm}$. Vypočtené indukčnosti L_2 se potom nejvíce přiblížíme navinutím sekundáru o 24 závitů.

Vypočtená vzduchová mezera bude realizována vložením několika listů tenkého papíru mezi obě části feritu (E, I). Její skutečnou velikost ale ovlivňuje též stah a to, jak se ukázalo poměrně významně. Z toho důvodu byla vlastní indukčnost obou vinutí ověřena měřením, kde odchylky byly kompenzovány právě stahem.

Část V.

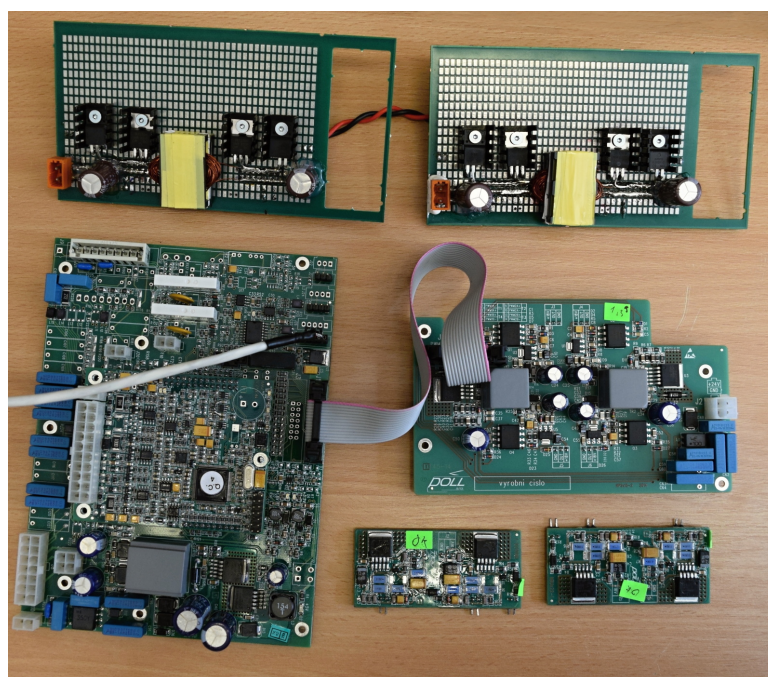
Ověření funkce návrhu

11. Ověření návrhu měniče

K ověření správné funkce navrženého balancéru je zapotřebí zkonstruovat minimálně 2 blokové měniče. Dále je nutné zajistit řídicí pulzy požadované kvality a v neposlední době též akumulátorové články. Pojdme se tedy podívat na měřicí pracoviště.

11.1. Popis přípravku a měřicího pracoviště

Vytvořený měnič zachycuje obrázek 32, v jeho vrchní části jsou silové části 2 blokových měničů, který byl popsán v předchozí kapitole. V levé dolní části se nachází procesorová deska s podkladem se zdroji, A/D vstupy a výstupy a obvody komunikace (CAN, RS232). Vpravo dole najdeme desky buzení schopné generovat 4 galvanicky oddělené pulzy.



Obrázek 32. 2 realizované blokové měniče

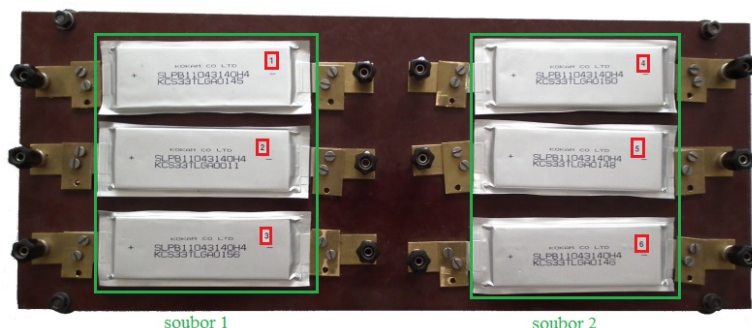
11.1.1. Řídicí pulzy

Řídicí pulzy jsou generovány pomocí vybraných DPS ze zdrojové soupravy pro vozy elektrické jednopodlažní jednotky typové řady 7Ev, které firma vyrábí. Zdrojová souprava je zdrojem bezpečného malého napětí a zajišťuje napájení přístrojů a zařízení připojených k palubní síti malého napětí o jmenovité hodnotě 24 V DC. Měřené hodnoty může posílat po komunikační lince CAN.

Zdrojová souprava byla zvolena pro generování potřebných pulzů z několika důvodů. Prvním důvodem je shodná frekvence (100 kHz) nabíječe a balancéru. Společně s frekvencí jsou vhodné i další parametry pulzů. Strída rovná 0,45, ovládací napětí $\pm 18\text{ V}$ a množství pulzů s vhodným fázovým posunutím $\frac{T}{2}$. Podkladová deska procesoru nabízí dostatek analogových vstupů pro měření napětí i proudů obou článků. Měřené hodnoty je možné sledovat v programu TST¹. Kruhový zásobník umožňuje zobrazit dostatečné množství hodnot, současně program nabízí volbu exportu dat do .csv souboru.

11.1.2. Akumulátorové články

Měření proběhlo na již zmíněných NMC akumulátorech, které nám zapůjčila fakulta. Přípravek vznikl jako součást mé bakalářské práce, ta měla za cíl stanovit vliv nabíjení vyššími proudy na parametry LiPol akumulátorů. Články byly rozděleny do dvou skupin z nichž jedna se blíží konci své životnosti a druhá naopak disponuje téměř 100% SOH. Přípravek je tedy pro test balancéru velmi vhodný.



Obrázek 33. Přípravek s „nakontaktovanými“ články [11]

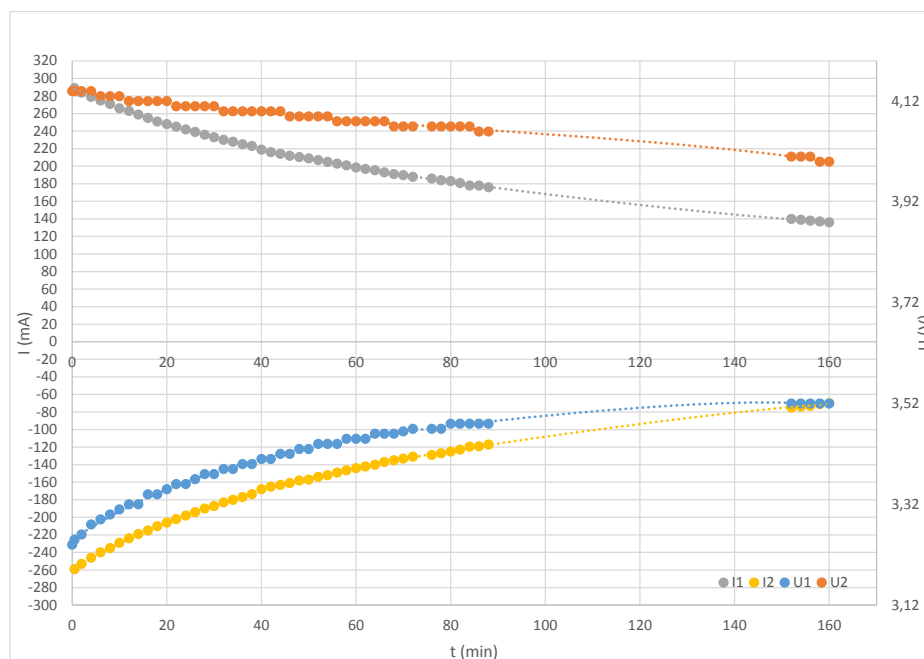
11.2. Naměřené hodnoty

Měření proběhlo na dvou člancích, které byly nejprve uvedeny do stavu různého stupně nabití a poté balancovány vyrobeným zařízením. Záznam dat z důvodu nedostatečné přesnosti měření (zejména proudu) bylo posléze realizováno vícero multimetry a manuálním odečtem hodnot.

Reálné proudy jsou nižší, než proudy vypočtené. Měření ukázalo, že napěťový rozdíl článků nedostačuje pro neřízené balancování. Nízká napěťová hladina primární strany měniče má též za následek vyšší procento ztrát. Významnou roli hraje úbytek na diodě, který je řádově též několik desetin Voltu. Pro snížení ztrát je v každém případě vhodné zvolit jiný polovodičový ventil. Dioda ale též určuje pracovní oblast neřízeného měniče. Balancování může efektivně probíhat pouze při rozdílu napětí obou akumulátorů vyšším než 1 V. Se snižujícím se napětí rapidně klesá i celková účinnost přenosu energie mezi články. Pro rozdíl napětí článků blízký se právě napěťovému úbytku na diodě (V_F) přechází balancér do režimu pasivního balancování. V tu chvíli nemá smysl spínat primární strany obou měničů, ale pouze měniče připojeného na článek s vyšším napětím. Měnič pak slouží stejně jako bypass prvek určený pro disipaci energie více nabitého akumulátoru.

¹Tuning and Service Tool

Obrázek 34 ukazuje nízké hodnoty balancujících proudů a obrázek 35 nevalné účinnosti pro „malý“ napěťový rozdíl článků.



Obrázek 34. Průběh balancování 2 NMC článků

Závěrem prvního měření je nutnost provedení změn v řízení. Také s úpravou topologie by bylo možné dosáhnout přijatelnějších hodnot účinnosti. Těmito úvahami se postupně budeme přibližovat dříve zmíněnému konceptu ze studie [27]. Ta popisuje připínání článků k jednomu DC/DC měniči pomocí tranzistorů (menší ztráty než na diodě). Mohli bychom zvolit kompromis zachovávající co možná nejvíce výhod. Pro rychlejší nabíjení ponecháme měnič pro každý akumulátor. Diody vyměníme za tranzistory, pulzy lze vzít od původních tranzistorů (křížem - spínací prvek na místě D_1 bude řízen pulzy pro T_2). Matice měničů bude řízena tak, aby v prvním taktu byly na společnou sběrnici připnuty články s vyšším než průměrným napětím a v taktu druhém bude energie ze sekundární strany poslána zbylým článkům. Nabíjení superkapacitoru na společné sekundární straně bude probíhat více než jednu periodu. Doba připnutí článků může odpovídat jejich SOC (nejvíce nabitě články budou nejdéle předávat energii a nejvíce vybité akumulátory ji budou nejdéle přijímat).

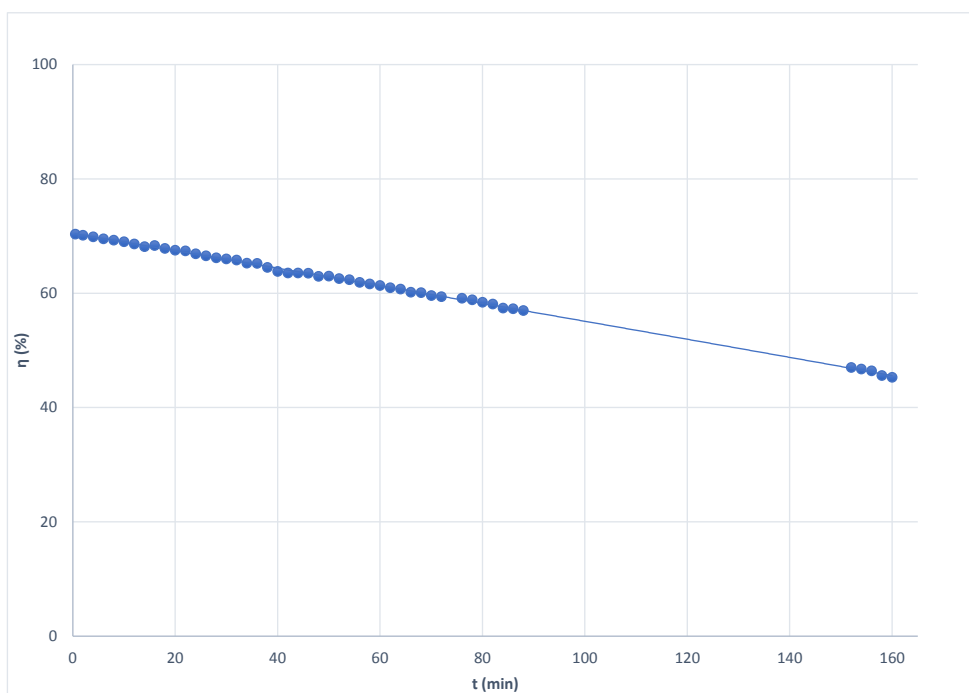
Účinnost přenosu energie zachycená na obrázku 35 je poměrně nízká. Protože se jedná o dvojitou konverzi není ale tato hodnota enormní. Nejvyšší průměrná účinnost se vypočte takto:

$$\eta_{avg} = \sqrt{\eta_m} \doteq 85 \%, \quad (67)$$

přičemž symbolem $\sqrt{\eta_m}$ značím naměřenou celkovou účinnost.

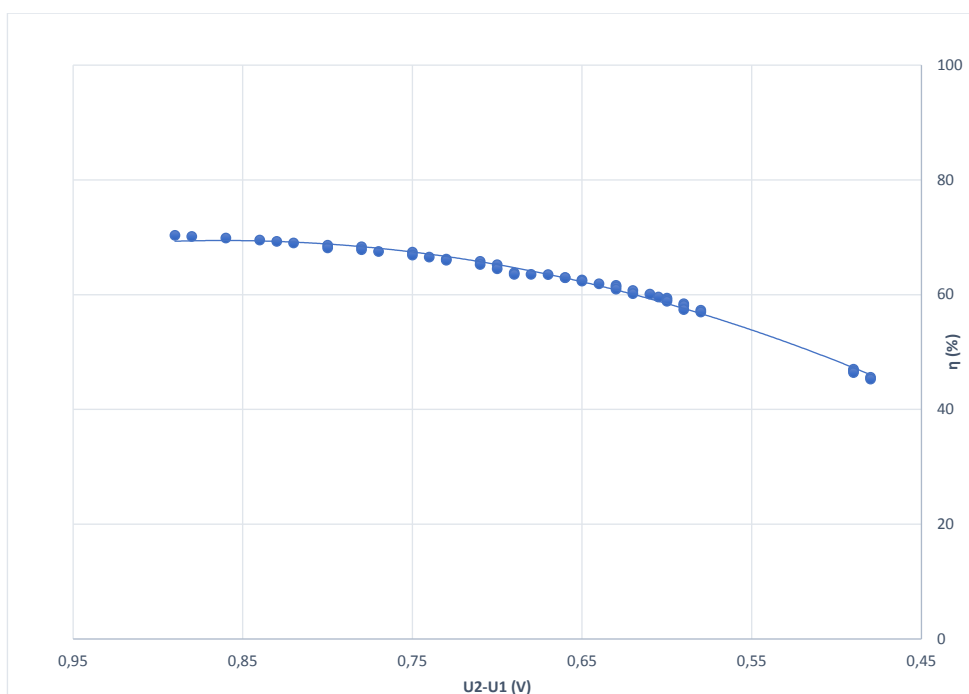
Efektivita jedné konverze 85 % dává naději upravené variantě balancéru dosáhnout rozumnější celkové účinnosti.

11. Ověření návrhu měniče



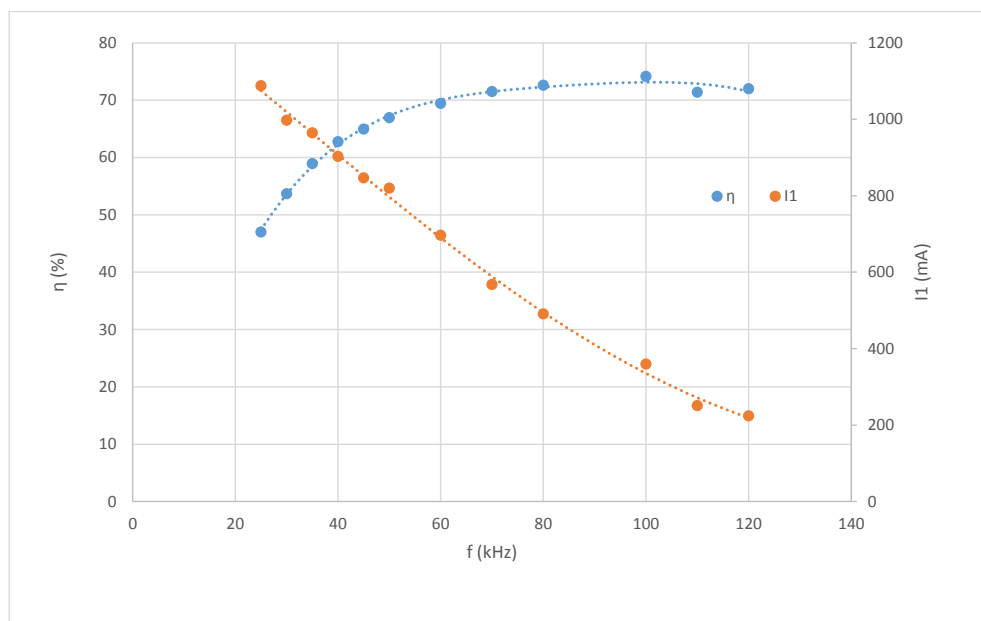
Obrázek 35. Průběh balancování 2 NMC článků - celková účinnost

Obrázek 35 je trochu zavádějící. Závislost účinnosti na čase obecně není moc vypovídající. Zvláště je zde uveden z toho důvodu, že do předchozího grafu nebylo možné účinnost svázat z žádnou z os y tak, aby byl patrný její vývoj. Efektivita přenosu energie je ale funkcí rozdílu v napětí článků, to je zaneseno do grafu níže.



Obrázek 36. Celková účinnost jako funkce rozdílu napětí balancovaných akumulátorů

Po zásahu do SW procesorové jednotky nabíječe NZB 3017 mohl být proveden ještě jeden experiment a to vliv spínací frekvence na velikost proudu vybíjeného akumulátoru a účinnosti měniče. Pro měření byly použity dva akumulátory s rozdílem v napětí přibližně rovným 1,1 V. Výsledek zachycuje obrázek 37.



Obrázek 37. Závislost proudu primárním vinutím vybíjeného článku a celkové účinnosti přenosu energie mezi 2 akumulátory na frekvenci

Účinnost klesá s frekvencí pravděpodobně vlivem přesycení magnetického obvodu. V oblasti vyšších frekvencí se pohybuje nad hranicí 70 %. Pro další zvyšování kmitočtu by bylo vhodné použít naopak méně rozměrný magnetický obvod, lze předpokládat snížení účinnosti i směrem k vyšším frekvencím.

Zhodnocení návrhu a zamýšlené změny jsou předmětem rozvahy psané v závěru.

Část VI.

Závěr

12. Shrnutí a zhodnocení

Diplomová práce postupně specifikuje způsob akumulace energie vhodný pro užití v elektrobusech. Aktuálně používané lithium-ion baterie vyžadují zvláštní zacházení o které se stará elektronika označovaná zkratkou BMS. Její topologie a komplexita je významně korelována se zamýšlenou aplikací baterie. Velké trakční baterie na bázi lithia se začínají na trhu objevovat až v posledních letech. Baterie pohánějící elektrobuse můžeme zajisté považovat za „velkou“ a to ve smyslu počtu akumulátorových článků i uchovávané energie. Zásadní odlišnost elektroniky vysokokapacitních baterií představují obvody balancéru. U množství akumulátorů zapojených do série problematika vyrovnavání napětí vyžaduje dimenzování příslušných obvodů na poměrně značné proudy. Vysoké výkony balancéru v podstatě vylučují jednoduchou disipaci energie na rezistoru z důvodů nejen konstrukčních. Disperze kapacity a vnitřního odporu článků v průběhu života baterie narůstá, zvláště pak, pokud dojde k potřebě výměny některého z akumulátorů. Robustní BMS a především její výkonová část obstarávající balancování dokáže citelně zvýšit životnost. Aby prodloužení života výměnou jednotlivých článků mělo praktický význam musíme se zabývat též účinností balancování.

Odhad velikosti baterie pro pozdější stanovení proudových mezí balancéru byl proveden na základě modelu vozu, baterie a uvažované trati. V této části jsou uvedeny reálné parametry elektrobuse včetně jeho baterie. Konfigurace baterie odpovídá v první řadě požadované napěťové hladině, různé elektrobuse se tedy nebudou významně rozcházet v počtu sériově zapojených akumulátorů. Proudový balancér tak s jmenovitou energií baterie porostou přibližně přímo úměrně.

Realizační část obsahuje nejprve, jak zadání vyžaduje, blokovou strukturu systému pro správu velkých trakčních baterií. S ohledem na množství článků a možnost spínání externího balancéru bylo zvoleno řešení od Texas Instruments. Myšlenka balancování, nad kterou vniklo zadání této práce, byla nejprve ověřena vyhledáním studií vztaheným k „C2C“ (Cell to Cell) metodě vyrovnavání napětí. Po ověření v podobě nalezených metod s vysokou efektivitou a jejich porovnání následoval návrh měniče balancéru.

Měření na navrženém měniči ukázalo nedostatky původní myšlenky a směr dalšího vývoje. Balancér vzhledem malým napěťovým rozdílům akumulátorů nemůže fungovat na bázi synchronně spínaných měničů bez důmyslnějšího řízení toku energie. Původní myšlenka připojení každého ze série článků pomocí měničů s galvanickým oddělením na společnou sběrnici (paralelní spojení dílčích akumulátorů) se nejeví jako příliš efektivní. Nicméně navržený měnič můžeme doplnit o řízení toku energie. A po nahrazení diod jinými spínacími prvky s nižšími ztráty v propustném směru, by bylo možné dosáhnout dodatečné účinnosti.

Blokující měnič lze s výhodou použít i pro „C2P“ (Cell to Pack) balancování. V tomto případě by se řízení zjednodušilo a též by navýšila kapacita balancéru. Ten by nemusel pracovat ve dvou taktech, ale pouze v jednom režimu přesunu energie z nejvíce nabitých

článků do celé baterie (jednosměrná konverze). Je otázkou, zda by se více osvědčil tento způsob, který by obsahoval transformaci z velmi nízkého napětí (cca 3,5 V) na napětí celé baterie (stovky V). I když pro transformaci napětí na významně vyšší hladiny by byl právě flyback poměrně vhodný.

Poslední logicky vyvozená varianta představuje určitý kompromis. Metoda uvažující přenos energie z článku do části baterie - „C2S“ (Cell to Stack) by transformovala napětí článků pouze na napětí stacku (desítky V) a při nutnosti by se balancovaly též jednotlivé stacky mezi sebou. Nevýhoda je opět v možnosti vícenásobné konverze energie. Naproti tomu bychom nepotřebovali transformovat napětí na tak vysoké úrovně a vyrovnávání celých stacků by pravděpodobně probíhalo s vyšší účinností právě v důsledku jejich výhodnějšího napětí.

Efektivitu balancéru je možné dále navýšit pomocí vhodného algoritmu. Program BMS MCU zajisté dokáže posunout vpřed data získaná měřeními na velké baterii. Základní úlohou s tím související je přesné určení SOC jednotlivých článků. Jak již bylo psáno v sekci 7.2, spolehlivé stanovení SOC představuje náročný úkol, který byl předmětem mnoha odborných publikací. Systém disponující důvěryhodnými informacemi o jednotlivých člancích (včetně aktuálních hodnot SOC nebo SOH) má slušný potenciál nejen pro navýšení účinnosti balancování nebo zkrácení času potřebného k nabití baterie. Slabší články by mohly být při vybíjení trvale udržovány na vyšším napětí a akumulátory s lepšími parametry naopak (nutno nalézt optimální charakteristiku balancujícího proudu k SOC).

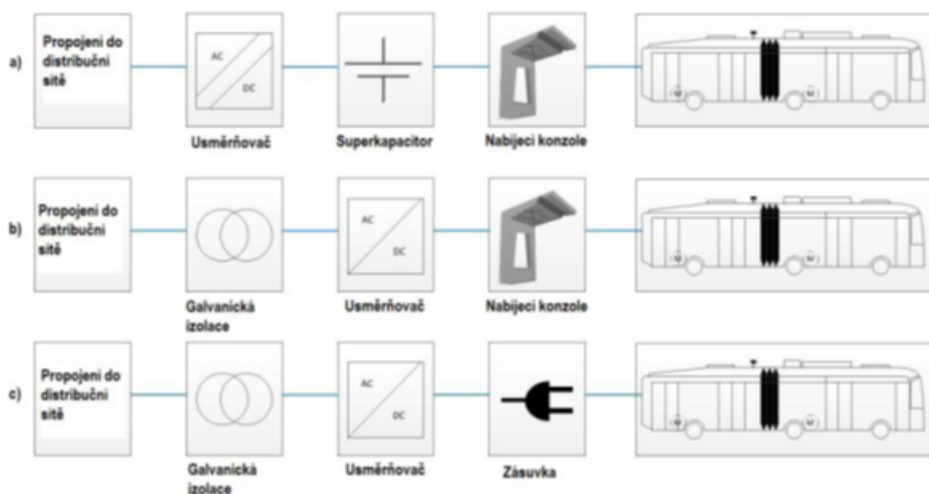
Práce postupující od obecné analýzy požadavků BMS k návrhu struktury vhodné pro velké trakční baterie a následného otestování vzorku vyčerpala všechny body zadání. Též dala prostor a směr zdokonalení části zodpovědné za balancování, upozornila na význačné body návrhu systému pro správu baterií a dala tak odlišit jednoduché od kvalitních systémů. V neposlední řadě uvedla možné komerčně dostupné produkty vhodné pro sestavení BMS „na míru“.

Příloha A.

Příklady konkrétních produktů pro e-mobilitu v MHD

TOSA DC nabíjecí systém a trakční výzbroj (ABB), způsoby dobíjení:

- ve vybraných zastávkách, při využití superkapacitoru (tzv. flash), po dobu 15 s výkonem 400 kW
- na konečných zastávkách po dobu 3 až 4 minut výkonem 200 kW
- v depu po dobu 45 minut výkonem 50 kW



Obrázek 38. TOSA Charging System – kombinovaný nabíjecí systém o výkonu 50/200/400 kW pro elektrobusy, doplněný trakční výzbrojí vozidla [5]

Hlavní přednosti produktu

- sériová výroba (první svého druhu)
- konfigurovatelnost
- ABB dodává jako komplet
- finančně výhodná alternativa k trolejbusům

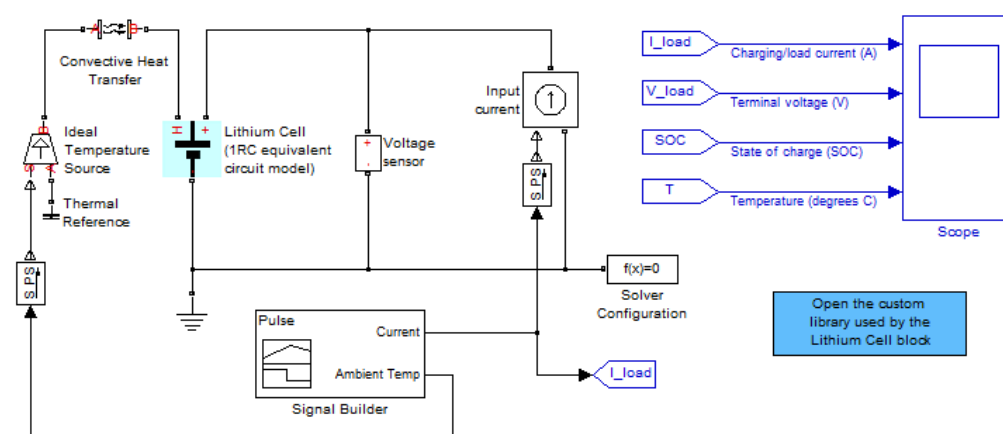
„Celkové provozní náklady počítané na linku jsou nižší, než v případě nasazení trolejbusů. Projekt TOSA proto vzbudil velký zájem měst a dopravních podniků z celého světa. S postupným snižováním cen akumulátorů a nabíjecích technologií lze očekávat i pokles cen dodávané technologie.“[5]



Příloha B.

Model Lion článku a 80-ti článkové baterie v MATLABu

Model je součástí práce [31], jako archiv je zveřejněn na stránkách společnosti MathWorks. Součástí modelu jsou .m soubory s parametry baterie a simulinkové schéma jehož výňatek najdete na obrázcích níže.

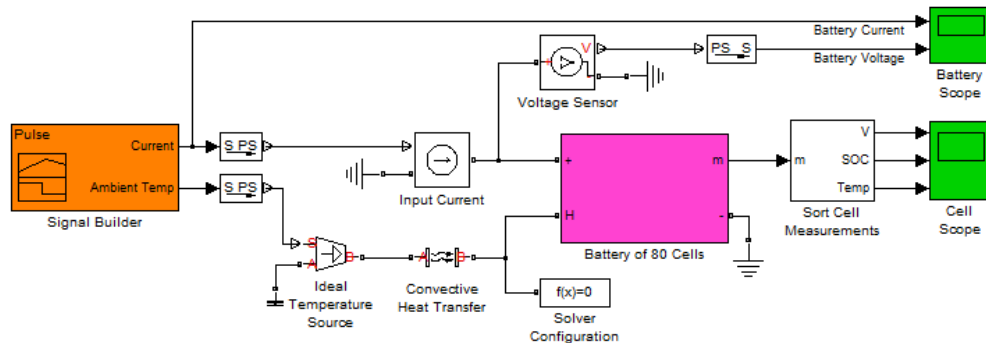


Lithium Battery Cell - 1 RC Branch Equivalent Circuit

This demo implements a model of a lithium cell using the Simscape language to implement the elements of an equivalent circuit model with one RC branch. For the defining equations and their validation, see T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, R. Jockey. "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells," IEEE International Electric Vehicle Conference, March 2012. A simple thermal model is used to model battery temperature. It is assumed that cooling is primarily via convection, and that heating is primarily from internal resistance. A battery pack can be modeled by connecting multiple copies of the battery cell block in series.

Copyright 2012 The MathWorks, Inc.

Obrázek 39. RC model článku [31]

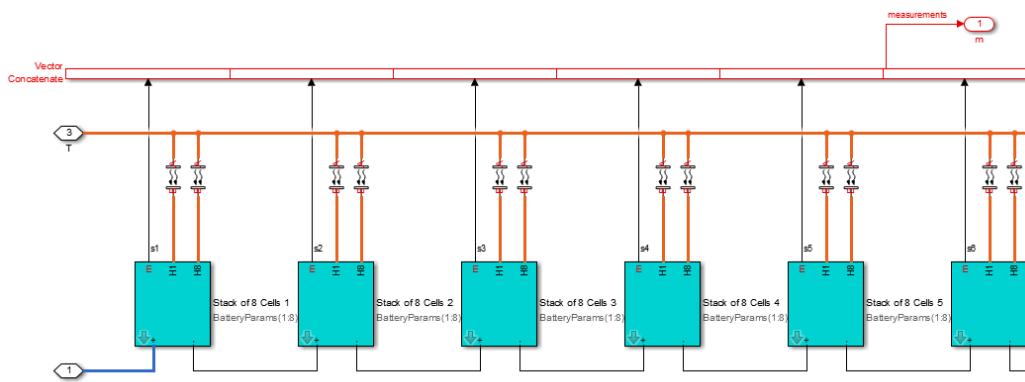


Lithium Battery Pack

This demo implements a model of a lithium battery pack. For the defining equations of each cell and their validation, see T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzari, R. Jodkey, "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells," IEEE International Electric Vehicle Conference, March 2012. A simple thermal model is used to model battery temperature. It is assumed that cooling is primarily via convection, and that heating is primarily from internal resistance. The battery is organized into thermally isolated stacks of 8 prismatic cells each.

Copyright 2012 The MathWorks, Inc.




Obrázek 40. Model Lion baterie [31]



Obrázek 41. Model Lion baterie - detail [31]

Příloha C.

Jízdní řád pražské autobusové linky 216

216		PRAŽSKÁ INTEGROVANÁ DOPRAVA (PID) - Městská doprava Praha		Platnost:
  		Dopravce: Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost, Sokolovská 217/42, 190 22 Praha 9 Informace o provozu PID na tel.: 296 191 817; na internetu: www.dpp.cz		od 30.8.2014
orientační doba jízdy (min)	Tarifní pásmo P	PRACOVNÍ DEN (☼)	SOBOTA (Ⓢ) a NEDĚLE (†)	
• BOŘISLAVKA	4		4	
1 x Starodejvická	5	40	5	1 1
2 x Pod Vyhliškou	6	10 40	6	2 1
3 x Macharovo náměstí	7	10 40	7	2 1
4 x Vozovna Střešovice	8	10 40	8	2 1
6 x Sibeliova	9	10 40	9	2 1
7 x Norbertov	10	10 40	10	2 1
8 x Náměstí Před Bateriemi	11	10 40	11	2 1
9 x Talichova	12	10 40	12	2 1
10 x U Vojenské nemocnice	13	10 40	13	2 1
11 x Vojenská nemocnice	14	10 40	14	2 1
12 POLIKLINIKA PETŘINY	15	10 40	15	2 1
x - na znamení	16	10 40	16	2 1
☼ - Všechny spoje zajišťuje nízkopodlažní vozidlo.	17	10 40	17	2 1
24.12. provoz ukončen v cca 18 hod.	18	10 40	18	2 1
31.12. provoz ukončen v cca 22 hod.	19	10 40	19	2 1
25.12. a 1.1. provoz zahájen v cca 7 hod.	20	10 40	20	2 1
	21	40	21	1 1
	22	40	22	1 1
	23	40	23	1 1
	0		0	
	1		1	
	2		2	
	3		3	

Platí Smluvní přepravní podmínky PID a Tarif PID.
 Jízda s předem zakoupenou jízdenkou.
 Doplnkový prodej jízdenek s přírazkou u řidiče.
 Území hl. m. Prahy se počítá jako 4 tarifní pásma.

O svátcích jede jako v neděli (†). Soft. CHAPS spol. s r.o. A

Graf.: T3989,T3990 Chron.: 6 Zast.: 40/6 Šabl.: Šablona 15|10|TP

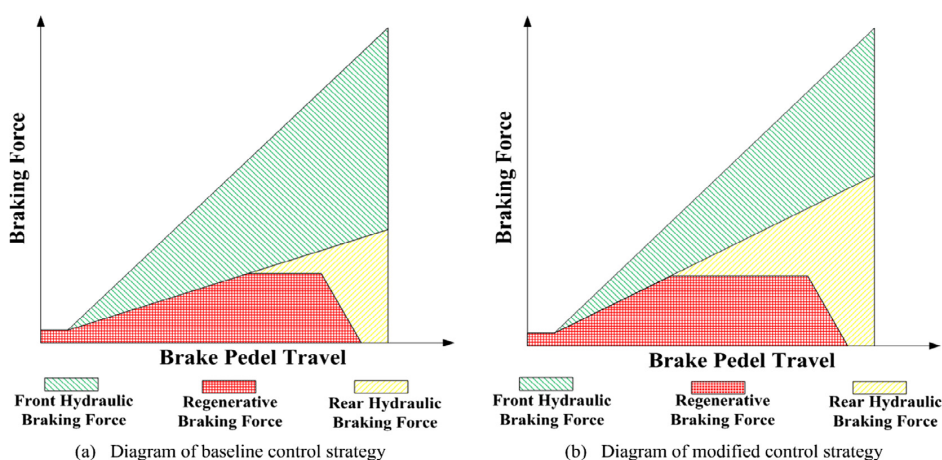
Obrázek 42. Jízdní řád linky 216 ve směru Poliklinika Petřiny [32]

Příloha D.

Účinnost regenerativního brzdění RWD elektrických vozů

Poměrně nízká účinnost regeneračního brzdění je způsobena požadavkem na bezpečnost a komfort při brzdění společně s citlivostí brzdového pedálu. Bezpečnost v tomto případě skrývá rozložení brzdové síly mezi přední a zadní nápravu v určitém poměru, to značně omezí možnosti rekuperace vozů s pohonem zadních kol. Komfort při brzdění znamená, že výsledné zpomalení vozu by mělo být přibližně konstantní. Jinými slovy, je potřeba se vypořádat s přerušением brzdící síly během řazení. Obecně se obtížně dosahuje vysokého komfortu při brzdění a zároveň vysoké účinnosti rekuperace. [19]

Ve studii [19] je navržena modifikace brzdění za účelem zvýšit podíl regenerované energie. Návrh spočívá především ve změně rozložení brzdící síly mezi nápravu. Tímto se nepatrně prodloužila brzdící dráha (desetiny procent) a citelně zvýšila účinnost. Brzdící sílu jednotlivých náprav v závislosti na pozici pedálu zobrazuje obrázek níže.



Obrázek 43. Brzdící síla jednotlivých náprav v závislosti na poloze brzdového pedálu [19]

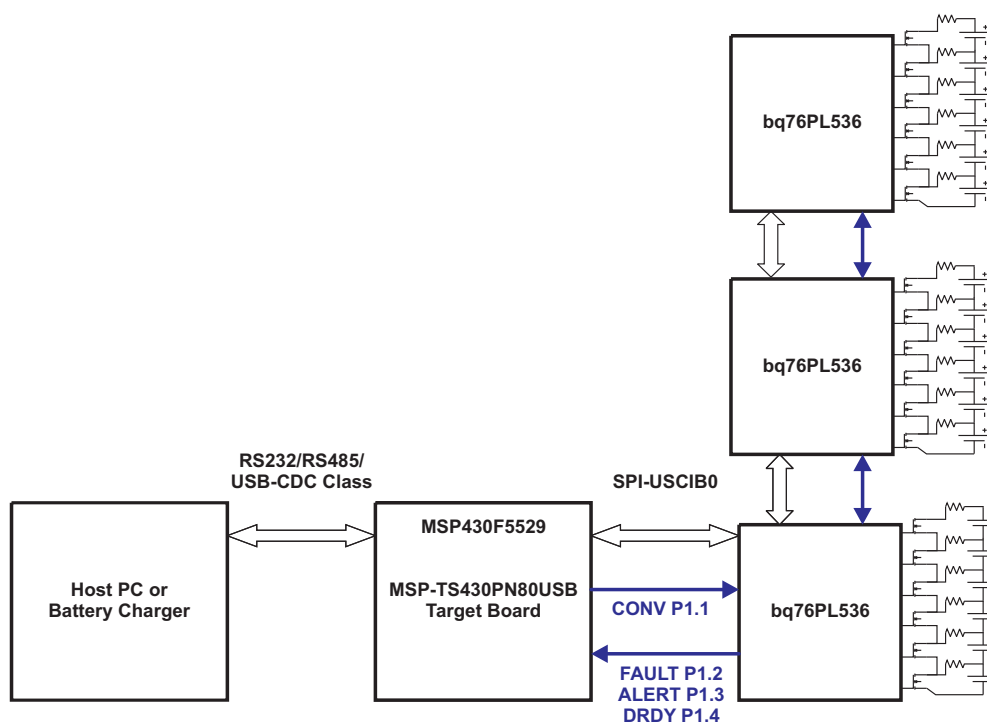
Při odlehčeném plynovém i brzdovém pedálu motor mírně brzdí, hydraulické brzdy jsou v klidu. S postupným stlačováním pedálu se přidávají přední hydraulické brzdy a při nedostatečném brzdícím výkonu zadní nápravy se připojí i zadní brzdy.

Autoři uvádí účinnost rekuperace 32% a 47% (před a po modifikaci). V prvním případě to znamená snížení celkové spotřeby vozu o cca 25% a ve druhém dokonce až 45%. V modelu, který byl v této práci použit pro výpočet spotřeby vozu rekuperace přináší úsporu energie ve výši 21,5%.

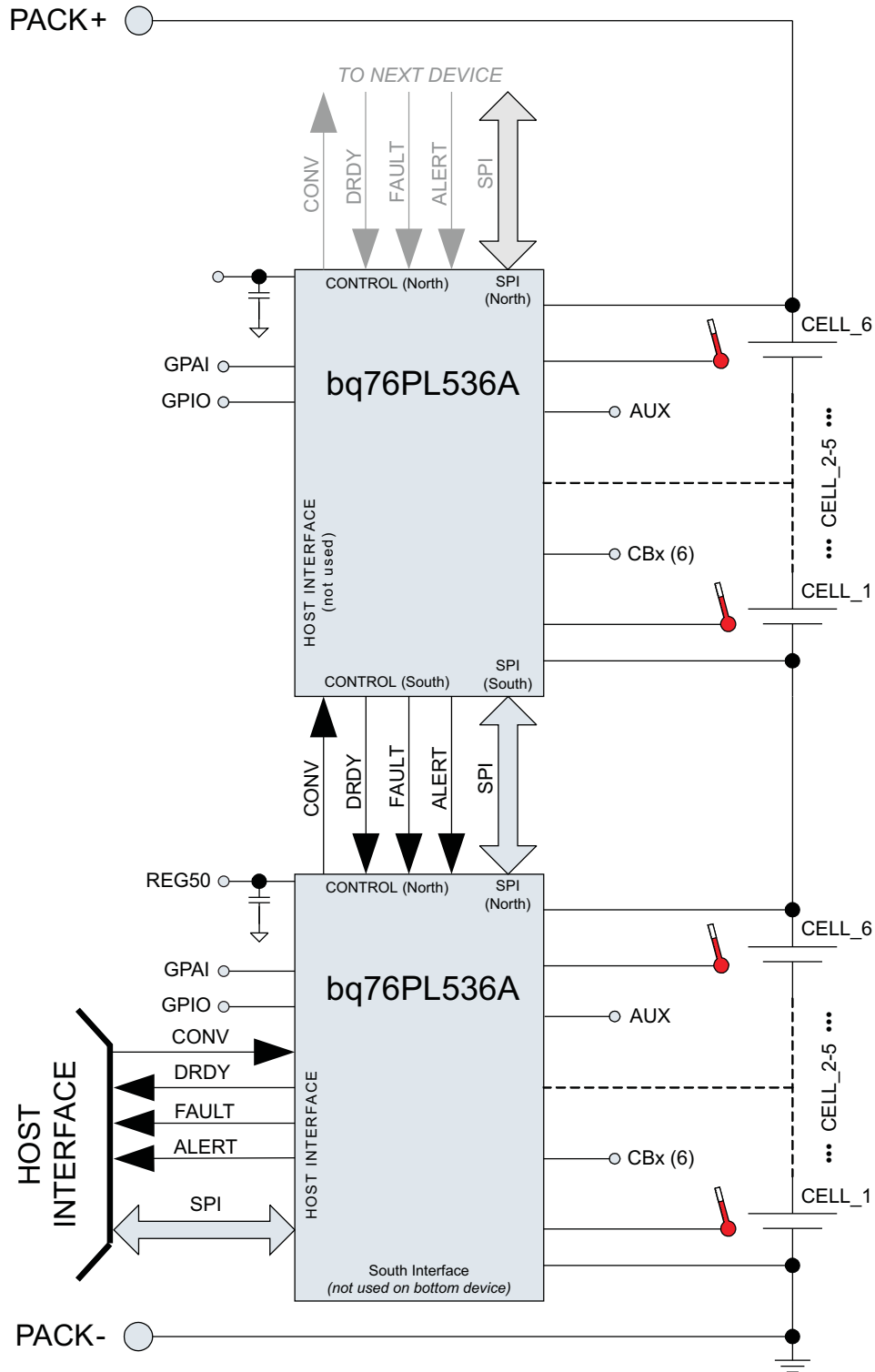
Příloha E.

Blokový diagram BMS s čipy od TI

Obrázek 44. Schéma zapojení BMS a komunikace komponent [33]



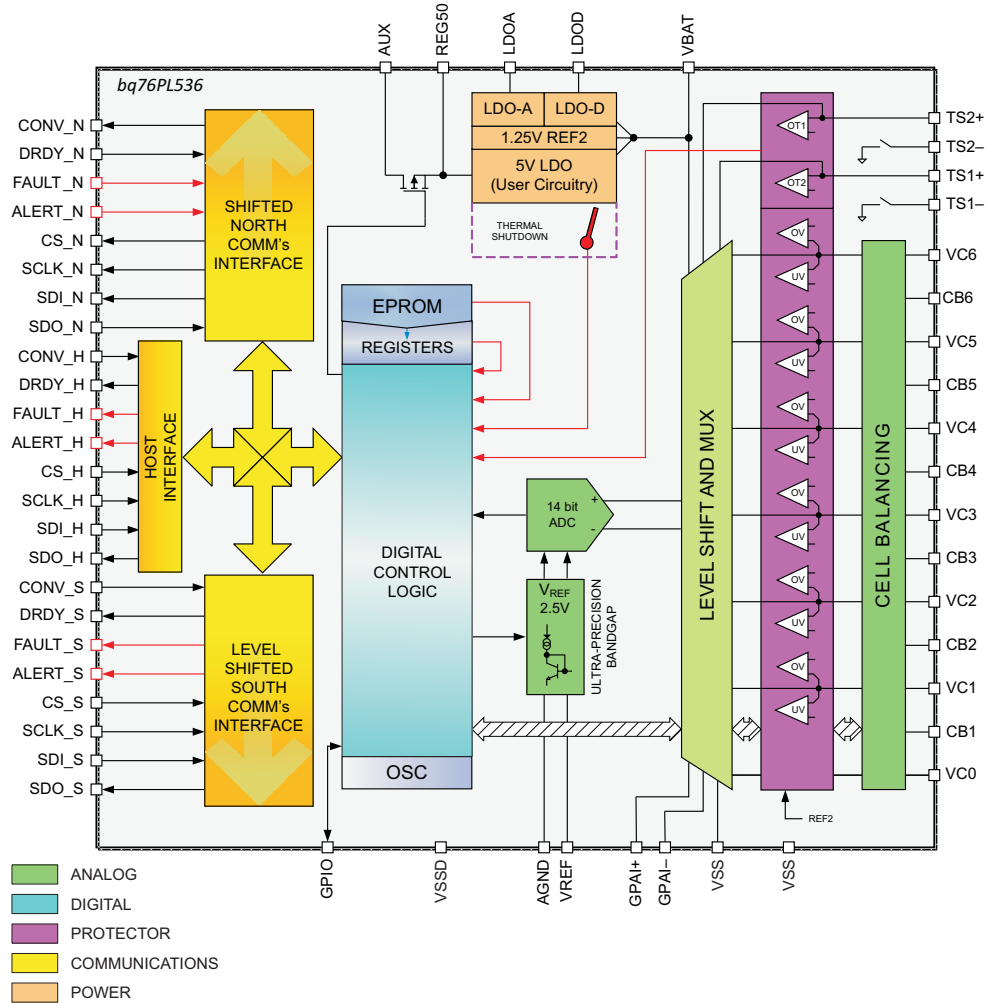
Obrázek 45. Detail zapojení BMS ICs [33]



Příloha F.

Schéma funkčních bloků BQ76PL536A

Obrázek 46. Schéma funkčních bloků BQ76PL536A [33]

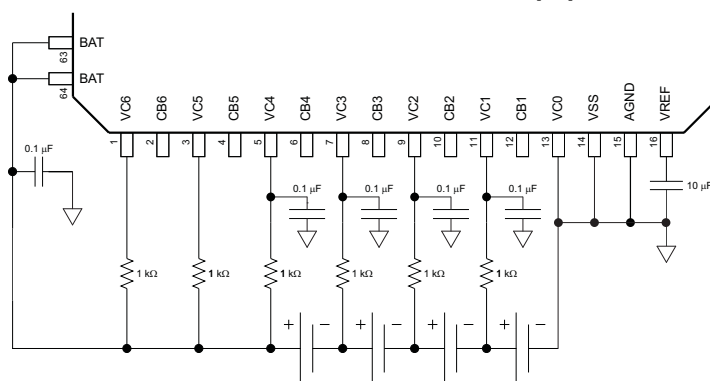


Příloha G.

Realizace měřicí DPS s BMS ICs

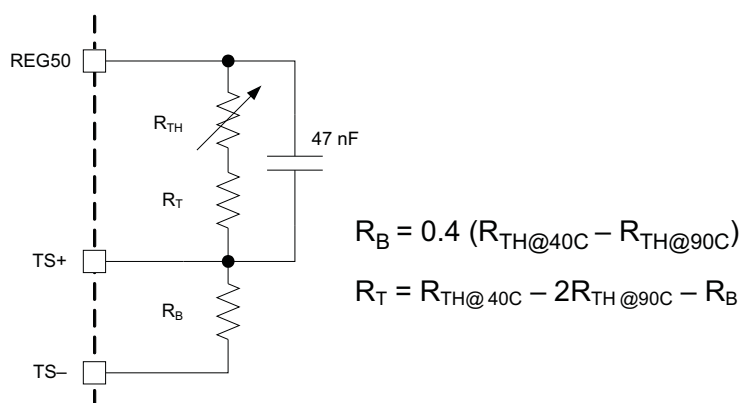
Připojení 3 až 6 článků k bq76pl536a Pokud je připojeno méně než 6 článků, musí být kladný pól série spojen s piny BAT1/BAT2 přes RC člen, R je umístěn u nepoužitých nožiček VCx - viz 47. Pro urychlení AD převodu se nastaví vnitřní multiplexer tak, aby skenoval pouze vstupy připojené k akumulátorům (ADC_CONTROL[CN2:0] bits).

Obrázek 47. Zapojení článků [33]



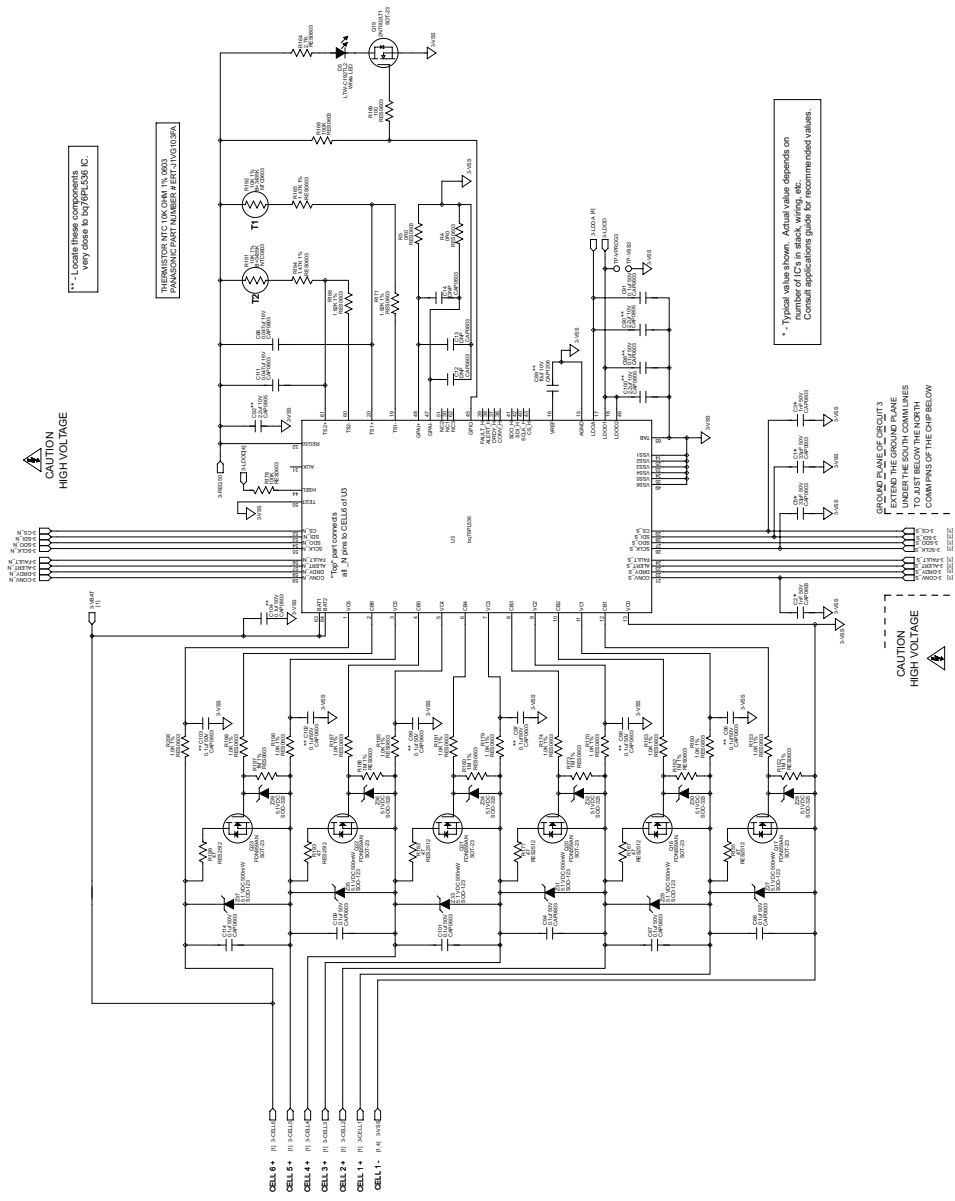
Zařízení je připraveno pro použití termistoru 10 kΩ při 25 °C s negativním teplotním koeficientem jako je například Panasonic ERT-J1VG103FA.

Obrázek 48. Zapojení termistoru [33]



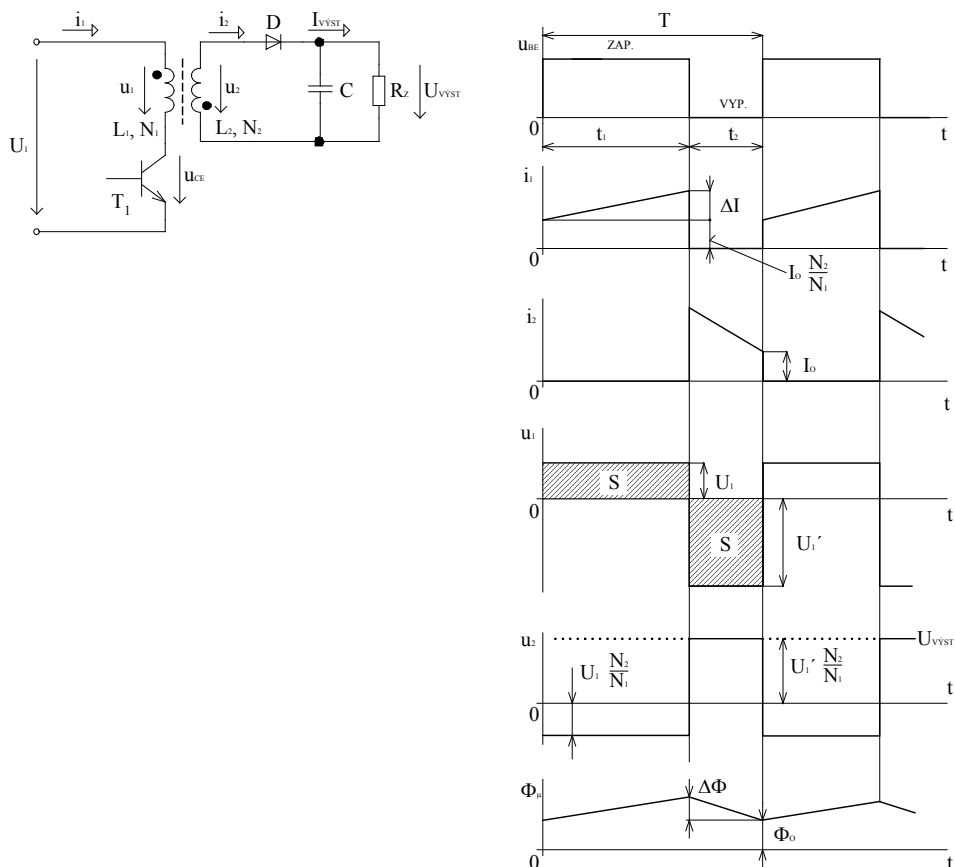
Typické hodnoty jsou: $R_T = 1,47 \text{ k}\Omega$, $R_T = 1,82 \text{ k}\Omega$ a kondenzátor se doporučuje volit v rozsahu 1 nF až 47 nF.

Obrázek 52. Doporučené zapojení bq76pl536a 4/4 [33]



Příloha H.

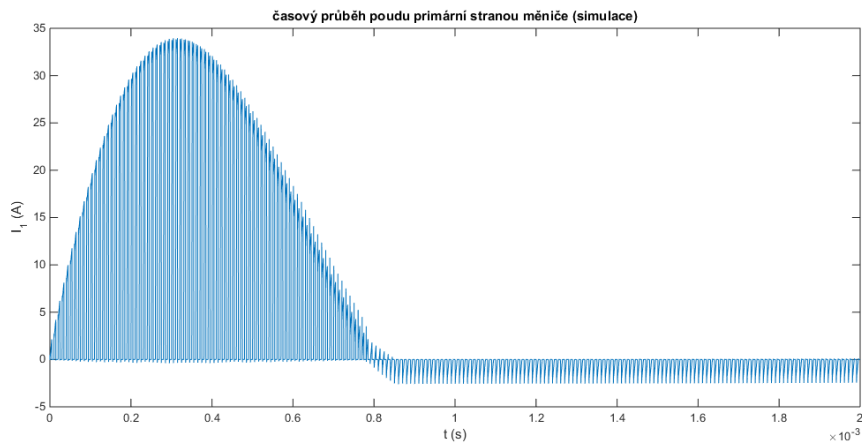
Blokovací měnič - princip



Obrázek 53. Jednočinný blokovací měnič – schéma a průběhy [29]

Výše uvedený obrázek odpovídá měničům s pouze jedním tranzistorem. Rozdíly oproti dvoutranzistorové verzi se pokusím zachytit následujícími grafy.

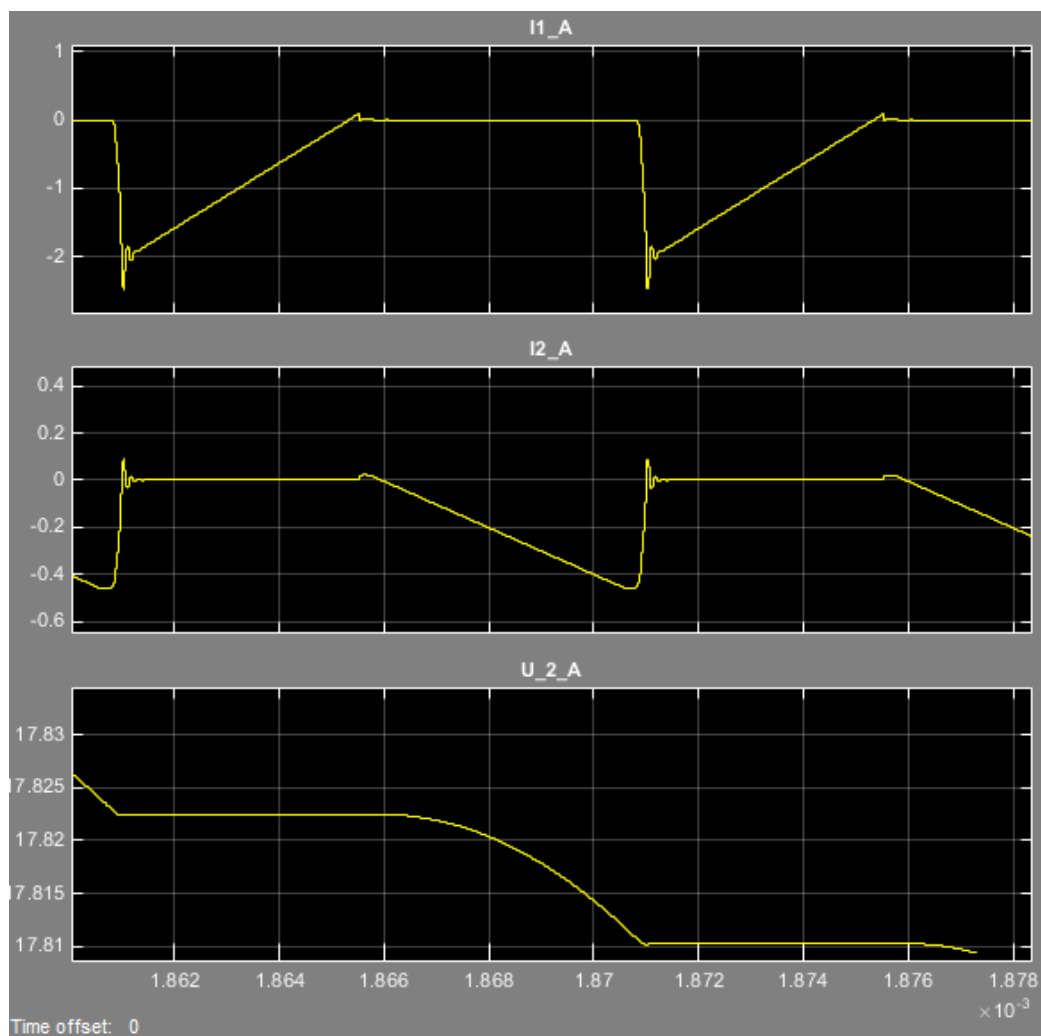
První následující graf poukazuje na fakt, že měnič bude přecházet mezi režimem přerušovaného a nepřerušovaného proudu v důsledku charakteru zátěže. Zátěž je čistě kapacitní a jakákoliv disipace energie je nežádoucí. Po uvedení do chodu vznikne proudový ráz, který odezní po nabití kondenzátoru. Poté se měnič postupně dostane do režimu přerušovaných proudů.



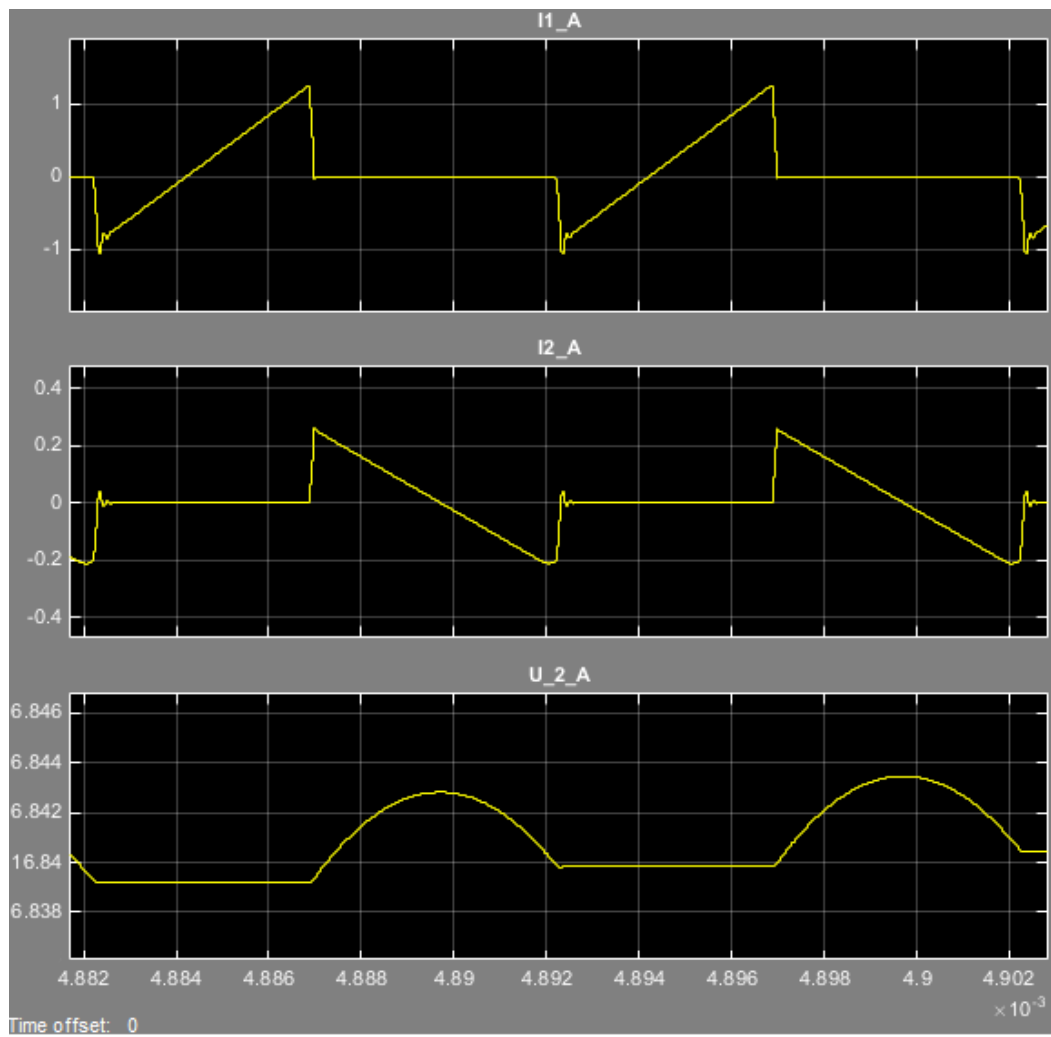
Obrázek 54. Časový průběh proudu I_1 jako výsledek simulace činnosti jednoho měniče o vypočtených parametrech (schéma uvedeno v příloze I)

Detail průběhů, čtenář promine, je zachycen přímo ze simulinku. První ze dvou simulinkových grafů je z části, kdy je akumulátor dobíjen od kondenzátoru.

Poslední graf je z oblasti blízké ustálenému stavu. Všimněme si, že ve všech případech je ΔI během sepnutého tranzistoru shodné. Simulací jsme ověřili, že výpočet parametrů dvou tranzistorového měniče lze provést pomocí vzorců pro jedno tranzistorový měnič.



Obrázek 55. Časové průběhy při vybíjení kondenzátoru (přenos energie na primární stranu)



Obrázek 56. Časové průběhy blízké rovnovážnému stavu

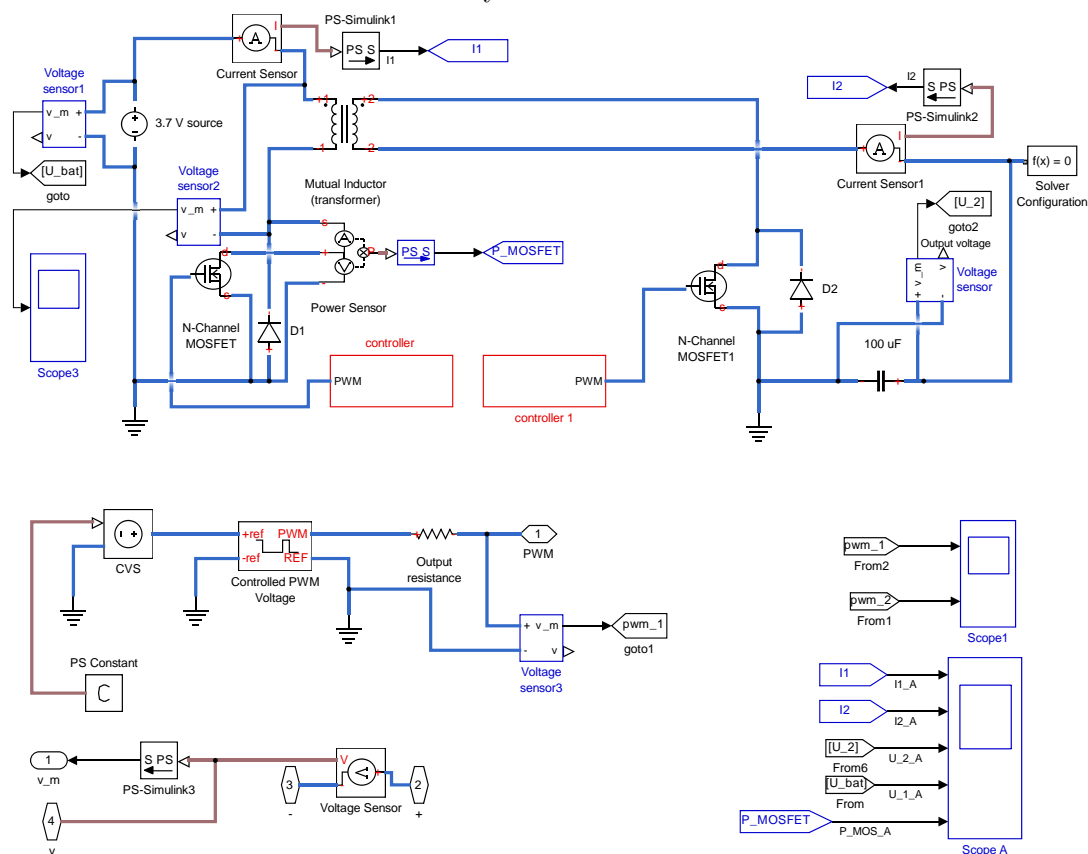
Příloha I.

Flyback v Simulinku

Simulace elektrického obvodu byla provedena v Matlabu. Pro účely simulace jsou zvoleny společné napěťové reference, měnič tedy neplní funkci galvanického oddělení na rozdíl od skutečného návrhu.

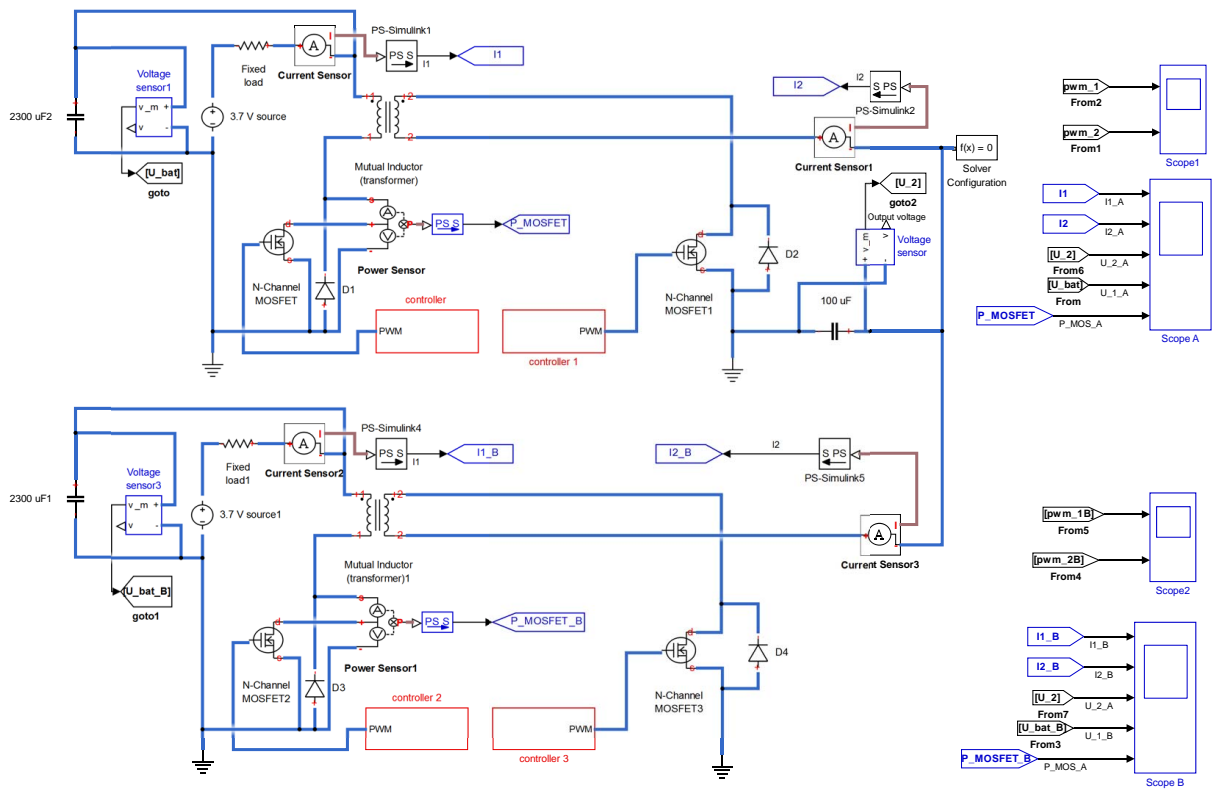
Na obrázku 57 je hlavní schéma měniče (horní část), schéma řízení (střed), vlevo dole je zapojení voltmetru a vpravo dole jsou umístěny výstupy.

Obrázek 57. Flyback v Simulinku



Následující schéma zobrazuje zapojení se společnou sekundární stranou, jak bylo navrženo pro balancér.

Obrázek 58. 2 blokujející měniče v Simulinku



Příloha J.

Obsah přiloženého DVD

- katalogové listy
 - naměřená data
 - fotografie
 - vytvořené soubory pro MATLAB
 - zdrojové soubory pro TEX
-
- elektronická podoba práce

Literatura

- [1] J. Horčík. *Spoluzakladatel Tesla Motors bude pracovat na elektromotorkách*. 2013. URL: <http://www.hybrid.cz/spoluzakladatel-tesla-motors-bude-pracovat-na-elektromotorkach> (cit. 07.02.2015).
- [2] *Alta Motors*. URL: <http://www.altamotors.co/bikes/> (cit. 07.02.2015).
- [3] *Elektrobus Škoda Perun*. URL: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/elektricke-a-hybridni-autobusy/batterybus-skoda-26bb-he/> (cit. 07.02.2015).
- [4] M. BARTŁOMIEJCZYK. *Trakční baterie v trolejbusích jako alternativní zdroj napájení*. 2014. URL: http://www.researchgate.net/publication/269166813_Trakn_baterie_v_trolejbusich_jako_alternativn_zdroj_napjen (cit. 07.02.2015).
- [5] J. Slavík. *E-mobilita v MHD*. 2013. URL: <http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/Studie1.pdf> (cit. 07.02.2015).
- [6] *Poll, s.r.o.* URL: <http://www.poll.cz/> (cit. 07.02.2015).
- [7] P. Drvořák. *Akumulace elektřiny*. URL: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny> (cit. 04.02.2015).
- [8] Giuseppe Guidi. “Energy Management Systems on Board of Electric Vehicles, Based on Power Electronics”. Dis. Norwegian University of Science a Technology, břez. 2009.
- [9] L. Bartovská. *Tab-Elektrochemie*. 2010. URL: <http://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/bartovska/Tab-Elektrochemie.pdf> (cit. 09.02.2012).
- [10] T. Jiráček. “Materiály a komponenty pro lithno-iontové zdroje proudu”. Dis. Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [11] M. Richter. “Vliv cyklického zatížení na kapacitu LiPol článku”. Bakalářská práce. ČVUT FEL, 2013.
- [12] D. Andrea. *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. Artech House, 2010. ISBN: 9781608071050. URL: <http://books.google.cz/books?id=o-QpFOR0PTcC>.
- [13] D. Djian et al. *Lithium-ion batteries with high charge rate capacity: Influence of the porous separator*. 2007.
- [14] Woongchul Choi a Jeongyong Kim. *Electrification of Public Transportation: Battery Swappable Smart Electric Bus with Battery Swapping Station*. 2014.
- [15] R. Garcia-Valle a J.A.P. Lopes. *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. Power Electronics and Power Systems. Springer New York, 2012. ISBN: 9781461401339. URL: <http://books.google.cz/books?id=cf-puAAACAAJ>.
- [16] Swagat Chopra a Pavol Bauer. *Driving Range Extension of EV With On-Road Contactless Power Transfer—A Case Study*. 2013.

- [17] *SOR EBN 8*. URL: <http://www.sor.cz/site/elektrobusy-sor-ebn-8> (cit. 17.03.2015).
- [18] *Pražská autobusová linka 216*. URL: <http://www.tram-bus.cz/mhd-praha/linky-autobusu/denni/linky-200-249/linka-216/> (cit. 17.03.2015).
- [19] Zhang Junzhi et al. “New regenerative braking control strategy for rear-driven electrified minivans”. In: *Energy Conversion and Management* (2013).
- [20] USABC. *Electric vehicle battery test procedures manual*. 1996. URL: http://avt.inl.gov/battery/pdf/usabc_manual_rev2.pdf (cit. 17.03.2015).
- [21] Wen-Yeau Chang. “The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review”. In: *ISRN Applied Mathematics* (2013). ISSN: 1551-3203. DOI: **10.1109/TII.2012.2223479**.
- [22] Zhongyue Zou et al. “Evaluation of Model Based State of Charge Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries”. In: *Energies* 7.8 (2014), s. 5065–5082.
- [23] S. Evanczuk. *High-voltage Li-ion battery stack management - the drive for safe power*. 2012. URL: <http://www.embedded.com/print/4391497> (cit. 07.02.2015).
- [24] A. Vojáček. *Jak se nabíjí Lithiové akumulátory?* URL: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/jak-se-nabijeji-lithiove-akumulatory.html> (cit. 04.02.2013).
- [25] H.J. Bergveld, W.S. Kruijt a P.H.L. Notten. *Battery Management Systems: Design by Modelling*. Philips Research Book Series. Springer, 2002. ISBN: 9781402008320. URL: <https://books.google.cz/books?id=FVvo7W3Y7wgC>.
- [26] D. Andrea. *Li-Ion BMS*. URL: <http://liionbms.com/php/index.php> (cit. 20.02.2015).
- [27] F. Baronti et al. “High-Efficiency Digitally Controlled Charge Equalizer for Series-Connected Cells Based on Switching Converter and Super-Capacitor”. In: *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* 9.2 (květ. 2013), s. 1139–1147. ISSN: 1551-3203. DOI: **10.1109/TII.2012.2223479**.
- [28] M. Einhorn et al. “A Current Equalization Method for Serially Connected Battery Cells Using a Single Power Converter for Each Cell”. In: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 60.9 (lis. 2011), s. 4227–4237. ISSN: 0018-9545. DOI: **10.1109/TVT.2011.2168988**.
- [29] Miroslav Zemánek. “Užití výkonových měničů ve zdrojích vysokého napětí”. Dis. VUT Brno, 2009.
- [30] Josef Vaculík. “Svářečka pro obloukové sváření se spínaným zdrojem”. Dipl. VUT Brno, 2011.
- [31] R. Jackey. *Lithium Battery Model, Simscape Language and Simulink Design Optimization*. 2012. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36019-lithium-battery-model--simscape-language-and-simulink-design-optimization> (cit. 04.02.2015).
- [32] *Jízdní řády pražských autobusových linek*. URL: <http://jrportal.dpp.cz/jrportal/LineList.aspx?mi=5&t=3> (cit. 20.02.2015).
- [33] Texas Instruments. *BQ76PL536A datasheet*. 2012. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76pl536a.pdf> (cit. 17.03.2015).

- [34] V. Pop. *Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*. Philips Research Book Series. Springer, 2008. ISBN: 9781402069451. URL: <http://books.google.cz/books?id=Qwxrq8tQRSAC>.
- [35] S. Dhameja. *Electric Vehicle Battery Systems*. Elsevier Science, 2001. ISBN: 9780080488769. URL: <https://books.google.cz/books?id=fhNLk4afdZ0C>.
- [36] *Cell balancing and battery matching*. URL: <http://www.mpoweruk.com/balancing.htm> (cit. 04.02.2015).
- [37] J. Larminie a J. Lowry. *Electric Vehicle Technology Explained*. Wiley, 2012. ISBN: 9781118361122. URL: <https://books.google.cz/books?id=6aWSaJUzu0EC>.
- [38] J. Černý a L. Pech. *Elektromobilita v městské hromadné přepravě osob*. URL: http://www.busportal.cz/bpextend/23_Cerny_Evmhpo-revize-I.pdf (cit. 07.02.2015).
- [39] M. Lázňovský. *Proč elektrická octavie nedojede dál než 100 let staré elektromobily*. URL: http://technet.idnes.cz/proc-elektricka-octavie-nedojede-dal-nez-100-let-stare-elektromobily-1d7-/tec-technika.aspx?c=A120117_173730_tec-technika_mla (cit. 07.02.2015).
- [40] T. B. Reddy D. Linden. *Handbook of batteries*. Third Edition. McGraw-Hill, 2001.
- [41] R.M. Dell, D.A.J. Rand a Royal Society of Chemistry (Great Britain). *Understanding batteries*. RSC, Royal Society of Chemistry, 2001. ISBN: 9780854046058.
- [42] I. Doležel. *Elektrochemie, Skripta FEL ZČU Plzeň*. 1998.
- [43] H. LIU. “Electrochemical Performance of $Li(NMC)O_2$ Cathode Materials for Li-ion Batteries”. Dis. City University of Hong Kong, břez. 2010.
- [44] *Memory effect now also found in lithium-ion batteries*. URL: <http://www.psi.ch/media/memory-effect-now-also-found-in-lithium-ion-batteries> (cit. 05.01.2013).
- [45] *Battery University*. URL: <http://batteryuniversity.com/> (cit. 07.02.2015).
- [46] *What is the Best Battery?* URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery (cit. 07.02.2015).
- [47] J. Nohejl. “Návrh akumulátorové baterie pro elektrickou formuli”. Diplomová práce. ČVUT FEL, 2012.
- [48] M. Rýzek. “BMS (Battery Management System) pro akumulátorovou baterii FSE”. Bakalářská práce. ČVUT FEL, 2013.
- [49] MIT Electric Vehicle Team. *A Guide to Understanding Battery Specifications*. 2008. URL: http://mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf (cit. 29.03.2012).
- [50] *Technické normy*. URL: <http://www.normy.biz/>.
- [51] Ludmila Tichá et al. *Jak psát vysokoškolské závěrečné práce*. 2012. URL: <http://knihovna.cvut.cz/studium/jak-psat-vskp/> (cit. 13.12.2012).
- [52] ČVUT FEL. *Směrnice děkana pro magisterské státní závěrečné zkoušky na ČVUT FEL*. 2012. URL: <http://www.fel.cvut.cz/rozvoj/smerniceMSZZ.html> (cit. 13.12.2012).
- [53] ČSN 01 6910. *Úprava písemností zpracovaných textovými editory*. Dub. 2007. URL: <http://typotipo.wz.cz/csn016910.pdf>.

- [54] *TeXample.net*. 2013. URL: <http://www.texample.net/> (cit. 05.04.2012).
- [55] Niel Kempson a Alejandro Aguilar-Sierra. *BIB_TE_X8*. 1996. URL: <http://www.ctan.org/tex-archive/biblio/bibtex/8-bit> (cit. 13.12.2012).
- [56] François Charette a Philip Kime. *Biber*. URL: <http://biblatex-biber.sourceforge.net/> (cit. 13.12.2012).
- [57] Philipp Lehman. *Bib_LA_TE_X*. 2012. URL: <http://ftp.cstug.cz/pub/tex/CTAN/help/Catalogue/entries/biblatex.html> (cit. 13.12.2012).
- [58] Tobias Oetiker et al. *Nepřiliš stručný úvod do systému *L_AT_EX**. 1998. URL: www.penguin.cz/~kocer/texty/lshort2e/lshort2e-cz.pdf.
- [59] Keith Reckdahl. *Using Imported Graphics in *L_AT_EX* and *pdf_LA_TE_X**. Led. 2006. URL: <http://mirrors.ctan.org/info/epslatex/english/epslatex.pdf>.