

FAKULTA MECHATRONIKY,
INFORMATIKY A MEZIOBOROVÝCH
STUDIÍ TUL

Elektronika a softwarová struktura BMS

Electronics and software structure BMS

Disertační práce

Studijní program: P2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Autor práce: **Ing. Ondřej Mach**
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Akademický rok: 2022/23

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Ing. Ondřej Mach

Osobní číslo: M16000219

Studijní program: P2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Název tématu: Elektronika a softwarová struktura BMS

Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické kybernetiky

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte problematiku současných moderních BMS
2. Navrhněte vhodný koncept elektroniky reflektující moderní trendy pro experimentální uplatnění matematických modelů
3. Otestujte základní matematické algoritmy pro SoC vycházející z CC a OCV

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména §60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto směrem bych chtěl vyjádřit poděkování všem, kteří různou měrou morálně, vědomostně ale i cílenými laickými dotazy a připomínkami podpořili průběh vývoje projektu. Časová náročnost realizace dlouhodobě ovlivňovala mé okolí, které ovšem se vší tolerancí chápalo důležitost a tím mi i spousty věcí usnadňovalo. Významnou motivací byl celý náš tým na TUL zastřešený elektromobilitou a také významné autority, pan prof. Ing. Aleš Richter, CSc., pan doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D. a pan Ing. Pavel Jandura, Ph.D. Skrze studované předměty vedoucí k úspěšnému splnění doktorského studia vznikl významný potenciál čerpat tematické informace od akademických špiček v oboru od pana doc. Ing. Pavla Rydla, Ph.D, pana doc. Ing. Milana Koláře, CSc. a v neposlední řadě také od pana doc. Ing. Jana Šembery, Ph.D..

Anotace

Disertační práce zpracovává komplexní téma pokročilých battery management systémů. Úvodní část rámcově podkryvá problematiku vybraných současných řešení, shrnuje jejich funkcionalitu a typické konstrukční limity. Uvedené koncepty topologií blokově vystihují typy obvodových struktur a režimy modulárního rozšiřování. Vývoj specifického řešení a realizace pokročilého systému řízení elektronického managementu současných moderních Li-Ion článků lze principiálně kategorizovat na více dílčích částí. Z pohledu elektroniky na výkonové rozhraní, monitorovací analog front-end obvody, komunikační periferie a centrální řídicí jednotku. Firmwareová výbava zohledňuje matematicko-fyzikální modely baterie. Battery management system slouží pro kontinuální dynamické monitorování toku elektrické energie a může být realizován například podpůrnými obvody firmy Texas Instruments řady BQ769x0 nebo BQ7961x. Volba konkrétního AFE obvodu ovlivňuje především variabilní sériovou kombinaci článků, možnosti jejich přístupu, parametry registrů a externí komunikační rozhraní. Jednoprocesorová řídicí jednotka, mimo své úsporné provozní fáze, s požadovanou periodou vyčítá z AFE obvodů provozní informace, které jsou zpracovávány implementovanými algoritmy. Princip pokročilého řízení vyžaduje plnou kontrolu nad připojenými Li-Ion články, které jsou na počátku prvními provozními cykly důkladně mapovány. Centrální řídicí jednotka dále disponuje možností sériového řetězení s ostatními bateriovými bloky. Vzájemná komunikace je k vysokým napěťovým potenciálům nutná galvanicky oddělovat. Hlavními problémy práce se jeví jednak mechanické provedení celého systému s ohledem na potenciálně vysoké provozní proudy spínacích prvků, problematika elektromagnetické kompatibility doprovodných řídicích obvodů, ale také i vhodné softwarové vybavení. Poslední kapitola práce zaměřuje pozornost na matematicko-fyzikální modelování baterie a techniku transformace vztahů do softwarových struktur integrovaného MCU.

Klíčová slova

System správy baterií, Li-Ion baterie, aktivní vyvažování článků, baterie, stav nabití

Annotation

The dissertation deals with the complex topic of advanced battery management systems. The introductory part outlines the issues of selected current solutions, summarizes their functionality and typical design limits. The topology concepts presented block diagrammatically capture the types of circuit structures and modular expansion schemes. The development of a specific solution and the implementation of an advanced electronic management system for today's advanced Li-Ion cells can be principally categorized into several subparts. From an electronics perspective, the power interface, the monitoring analog front-end circuitry, the communication peripherals and the central control unit. The firmware takes into account the mathematical and physical models of the battery. The battery management system is used for continuous dynamic power flow monitoring and can be implemented, for example, by Texas Instruments BQ769x0 or BQ7961x series support circuits. The choice of a particular AFE circuit is mainly influenced by the variable series combination of cells, their access options, register parameters and external communication interface. The single-processor controller, apart from its economical operating phases, reads the operating information from the AFE circuits with the required period, which is processed by the implemented algorithms. The principle of advanced control requires full control over the connected Li-Ion cells, which are thoroughly mapped at the beginning of the first operating cycles. The central control unit also has the possibility of serial chaining with other battery blocks. Intercommunication is required to galvanically isolate the high voltage potentials. The main problems of the work appear to be the mechanical design of the whole system with respect to the potentially high operating currents of the switching elements, the electromagnetic compatibility issues of the accompanying control circuits, but also the appropriate software. The last chapter of the thesis focuses attention on the mathematical and physical modelling of the battery and the technique of transforming the relations into software structures of the integrated MCU.

Key words

Battery Management System, Li-Ion Battery, Active Cell Balancing, Batteries, State of charge

Obsah

Seznam tabulek	9
Seznam obrázků	10
Seznam veličin a jednotek.....	12
Seznam zkratk a výrazů.....	13
Úvod.....	16
1. Elektrochemické akumulátory	17
1.1. Elektrochemická struktura.....	19
1.2. Pouzdra a značení článků	29
1.3. Integrované ochrany pouzder 18650	29
1.4. Sério-paralelní řazení článků.....	33
1.5. Snímání teploty článků.....	35
2. Komerční systémy	38
2.1. TinyBMS s516.....	38
2.2. EMUS BMS mini	40
2.3. LLT POWER BMS	42
2.4. Orion BMS (Original)	44
2.5. Orion BMS2	45
3. Battery management systém (BMS).....	47
3.1. Topologie pokročilých systémů	48
3.2. Technika balancování článků	49
3.3. Obvody „PreCharge“ a „PreDisCharge“	50
3.4. Multirozsahové měření proudů.....	52
3.5. Komunikační rozhraní.....	54
4. Vývoj elektroniky centralizované HW jednotky BMS	55
4.1. Bateriové rozhraní BQ76940.....	56
4.2. Obvod dohledu BQ78350.....	58
4.3. Zapojení obvodu „PreCharge“	58
5. Vývoj elektroniky decentralizované HW jednotky BMS.....	60
6. Matematické modelování dynamických vlastností Li-Ion	62
6.1. Obecné matematické modelování.....	64
6.2. Metody pro odhad SoC.....	66
6.3. Přímé metody – počítání Coulombova náboje (CC)	66

6.4. Přímé metody – Otevřený napěťový obvod (OCV)	67
6.5. Odhad založený na měření impedance	69
6.6. Nepřímé metody	70
6.7. Metody odhadu založené na modelu	70
6.8. Odhad založený na modelu elektrického obvodu (ECM)	71
6.9. Adaptivní metody odhadu založené na filtru.....	76
Závěr.....	80
Citovaná literatura	84
Seznam publikací, funkčních vzorků a užitého vzoru.....	88

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Specifikace Lithium Cobalt Oxide (LiCoO_2).....	21
Tabulka 2 – Specifikace Lithium Manganese Oxide (LiMn_2O_4).....	21
Tabulka 3 – Specifikace Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO_2)	23
Tabulka 4 – Specifikace Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4)	24
Tabulka 5 – Specifikace Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO_2).....	24
Tabulka 6 – Specifikace Lithium Titanate (Li_2TiO_3).....	25
Tabulka 7 – Důležitá napětí LCO Li-Ion článků.....	35
Tabulka 8 – TinyBMS s516, základní parametry	39
Tabulka 9 – EMUS BMS mini, základní parametry	40
Tabulka 10 – LLT POWER BMS, základní parametry	42
Tabulka 11 – Orion BMS, základní parametry	44

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Mechanická struktura vrstev dobíjecích Li-Ion článků [8].....	17
Obrázek 2 – 3D model poškození struktur Li-Ion článku vlivem rychlo-nabíjení [9].....	18
Obrázek 3 – Lithium-iontové technologie dostupné na trhu [10]	19
Obrázek 4 – Vizuální zařazení technologií – napětí / energetická hustota	26
Obrázek 5 – Strukturování aktivních vrstev a separátoru [13].....	27
Obrázek 6 – Přenos a interkalace lithiových iontů v LiFePO ₄	28
Obrázek 7 – Princip kódování cylindrických článků [14].....	29
Obrázek 8 – PTC a CID ochrany cylindrických článků [15]	30
Obrázek 9 – Ochranná elektronika integrovatelná v člancích 18650.....	32
Obrázek 10 – Vnitřní struktura sériového řazení článků Li-Ion akumulátorů [16]	33
Obrázek 11 – Cylindrická, prizmatická, pouch konstrukce	34
Obrázek 12 – Simulace teplotního prostupu vrstveným akumulátorem [17].....	35
Obrázek 13 – TinyBMS s516, dostupné periferie.....	38
Obrázek 14 – TinyBMS s516 elektronika.....	39
Obrázek 15 – EMUS BMS mini, elektronika	41
Obrázek 16 – LLT POWER BMS, elektronika.....	43
Obrázek 17 – Orion BMS, elektronika.....	44
Obrázek 18 – Orion BMS, nezbytné periferie – proudový senzor, CANdapter	45
Obrázek 19 – Orion BMS2, elektronika.....	46
Obrázek 20 – Návaznost funkčních bloků BMS [18]	47
Obrázek 21 – Obvody decentralizované topologie BMS systému [19].....	48
Obrázek 22 – Princip aktivního / pasivního balancování článků [20]	49
Obrázek 23 – Průběh spínání kapacitní zátěže.....	50
Obrázek 24 – Bezjiskřicí propojení [21]	51
Obrázek 25 – Elektronický „antispark circuit“ s exponenciálním náběhem.....	52
Obrázek 26 – Centralizovaná BMS jednotka, AFE BQ76940.....	55
Obrázek 27 – Konfigurace předřazených balančních obvodů	56
Obrázek 28 – Zapojení bateriového rozhraní s obvodem BQ76940	57
Obrázek 29 – Blokovaná návaznost obvodů řady BQ	58
Obrázek 30 – Výkonové spínání proudu se snímáním hodnot pomocí bočníku R _{SNS}	59

Obrázek 31 – Decentralizovatelná BMS jednotka, AFE BQ79616	60
Obrázek 32 – Blokovaná decentralizace na Master a Slave moduly	61
Obrázek 33 – Náhradní elektrický obvod	62
Obrázek 34 – Závislost napětí a proudu při nabíjení	62
Obrázek 35 – Závislost napětí a proudu při vybíjení	63
Obrázek 36 – Lineární systém diskrétního času z rovnic (6.7) a (6.8)	65
Obrázek 37 – Nelineární systém diskrétního času z rovnic (6.9) a (6.10)	65
Obrázek 38 – OCV vs. SoC během nabíjení pro různé články stejné série	69
Obrázek 39 – ECM druhého řádu	71
Obrázek 40 – ECM závislý na zdroji	72
Obrázek 41 – Kalmanuv iterační filtr	78
Obrázek 42 – Rozšířený iterační diagram Kalmanova filtru	79

Seznam veličin a jednotek

Veličina	Jednotka	Popis významu
I	A	Elektrický proud
U	V	Elektrické napětí
R	Ω	Elektrický odpor
P	W	Elektrický výkon
T	$^{\circ}\text{C} / \text{K}$	Teplota
L	H	Indukčnost cívky
τ	s	Časová konstanta dynamických průběhů
C	Ah	Akumulátorový elektrický náboj
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
ρ	$\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$	Měrná rezistivita
G/s	$\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	Iontová vodivost elektrolytu

Seznam zkratek a výrazů

AFE	Analog Front End – obvod zprostředkovávající rozhraní od článků k MCU
Accupack	Sériové, paralelní či obvykle smíšené propojení více článků baterie
Antispark	Konektory či propojení omezující jiskření
BMS	Battery Management System – systém správy baterií
CAN	Controller Area Network sběrnice, určeno pro komunikaci
CANdapter	Komunikační překladač
CC	Coulomb Counting – Metoda počítání Coulombova náboje
CID	Current Interrupt Device
COV	Cell Overvoltage – přepětí článků
CUV	Cell Undervoltage – podpětí článků
DC/DC	step-down / step-up, forma spínaných zdrojů
DoD	Deep of Discharge – podíl kapacity odebrané z plně nabitě baterie
ECM	Ekvivalentní model elektrického obvodu
EES	Systémů skladování nadbytečné energie
EChM	Elektrochemický model
EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie
EKF	Rozšířený Kalmanův filtr
Elektrolyt	Rozpuštěná iontová sloučenina
EMI	Elektromagnetická interference (rušení)
EMS	Elektromagnetická susceptibilita (odolnost)
EoL	Technologický konec životnosti
ESD	Krátkodobý elektrostatický výboj
EV	Electric Vehicle – elektrické vozidlo
FET	Unipolární tranzistory
GPE	Gel-polymerový elektrolyt
HCT	Obdoba logických obvodů HC s výstupy kompatibilními s TTL technologií
HEV	Hybrid Electric Vehicle – kombinace spalovacího motoru a elektromotoru
CHAdEMO	Rozhraní dobíjecích standardů
I2C	Multi-masterová sériová sběrnice (Inter-Integrated Circuit)
I/O	Komunikační označení sběrnice (Input / Output)

IC	Integrated circuit – integrované obvody
Interkalace	Vměšování lithiových iontu do krystalové mřížky materiálu
Interkalát	Obohacený materiál či interkalační sloučenina
IP	Stupeň krytí proti vniknutí cizího tělesa či vniknutí kapalin
LCO	Katodové složení Lithium Cobalt Oxide (LiCoO_2)
LDO	Nízko úbytkové typy stabilizátorů / regulátorů (Low-dropout regulator)
LEM DHAB S	Externí proudový senzor
LFP	Katodové složení Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4)
Li-Ion	Lithium-iontový akumulátor
Li-Pol	Lithium-polymerový akumulátor
LiB	Lithium-iontové baterie
LiPF_6	Chemie lihných solí/rozpuštědla hexafluorofosfát
LMO	Katodové složení Lithium Manganese Oxide (LiMn_2O_4)
LowESR	Vlastnost kondenzátorů týkající se velikosti vnitřního odporu
LTO	Katodové složení Lithium Titanate (Li_2TiO_3)
MCU	Jednočipový mikrokontrolér
MLCC	Typ vysokokapacitních kondenzátorů
NCA	Katodové složení Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO_2)
NiMH	Nikl-metal hydridový akumulátor
NMC	Katodové složení Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO_2)
OBD2	Diagnostická jednotka
OCC	Overcurrent Charge – nabíjecí nadproud
OCD	Overcurrent Discharge – vybíjecí nadproud
OCV	Open Circuit Voltage – Napětí nezatíženého obvodu
OP VVV	Operační program pro výzkum, vývoj a vzdělání MŠMT
OSN	Pařížská dohoda úmluvy o změně klimatu
OT	Overtemperature – přehřátí
PAN	Polyakrylonitril – elektrolytický rosol
PCB	Printed Circuit Board – Deska plošných spojů
PE	Polyethylen – materiál separátoru
PEO	Polyetylenoxid – elektrolytický rosol
Pouch	Měkká konstrukce pouzdra článků

PP	Polypropylen – materiál separátoru
PreCharge	Obvod eliminující počáteční špičky při spínání / odpínání obvodů
PTC	Positive Temperature Coefficient – integrovaná ochrana článků
PVDF	Poly-vinyliden difluorid – elektrolytický rosol
RC	ECM založené na odporu a kapacitě
RUL	Remaining Useful Life – zbývající životnost článku
SEI	Solid-Electrolyte-Interface – vrstva na rozhraní elektrod
SoC	State of Charge – dostupná kapacita baterie
SoC-BAR	Externí vizualizační jednotka
SoE	State of Energy – Celková kapacita baterie
SoH	State of Health – stav snížení kapacity oproti původní
SPI	Sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface)
UART	Sériové rozhraní (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)
UT	Undertemperature – podchlazení
XT90-S	Výkonové konektory pro bezjiskřící propojování obvodů

Úvod

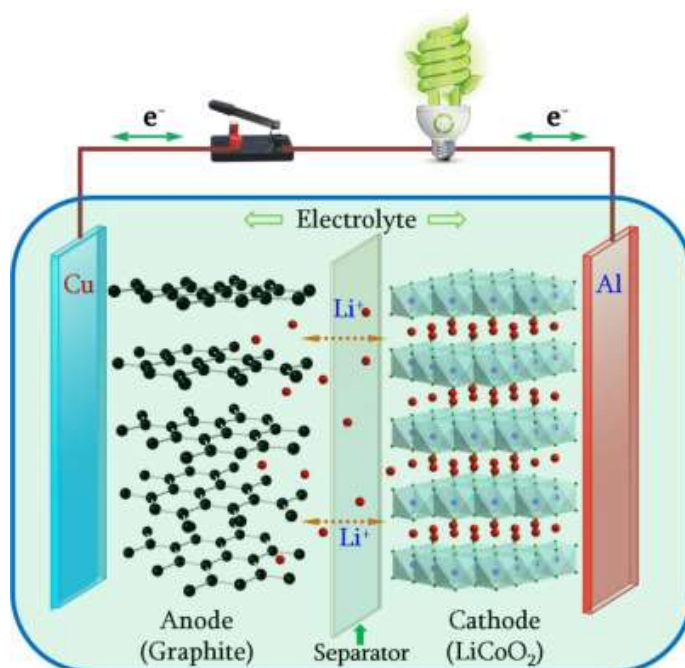
Pařížská dohoda úmluvy OSN o změně klimatu [1] [2] si klade za cíl omezit emise skleníkových plynů po roce 2020 a navázat tak na Kjótský protokol. Ambiciózní plán vyžaduje snížení emisí ze všech odvětví. Když stojíte na zelené trávě a sucho zažijete jen nárazově, nemusí být jasné, že čelíme rozsáhlé klimatické krizi, která se týká celé naší planety. Jenže tento proces už nenávratně probíhá. Koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře je nyní nejvyšší za poslední čtyři miliony let. Fakta ověřená řadou vědců jasně ukazují, že se naše planeta vlivem působení člověka trvale ohřívá. Před zahájením procesu spalování uhlí byl výskyt oxidu uhličitého v atmosféře 280 částic na milion, nyní je to přes 400 [3] [4]. Pokud chceme dostat globální oteplování pod snesitelnou úroveň dvou stupňů celsia, je potřeba do roku 2030 výrazně omezit emise oxidu uhličitého. Klimatická změna má setrvačnost 20 let. Elektromobilita je celosvětově zásadním nástrojem při snižování dopadu dopravy na životní prostředí. Přijetí elektrických vozidel (EV) má environmentální výhody spojené s nižšími emisemi a hladinou hluku, které zlepšují kvalitu života, zejména v městských oblastech. Aby však bylo možné tyto výhody využít, je třeba reformovat odvětví energetiky i dopravy. Německá studie Centra pro sluneční energii a výzkum vodíku ze Stuttgartu odhaluje světová naleziště lithia pokrývající výrobu akumulátorů pro 10 miliard automobilů. Přibližně polovina zásob se ale nachází v politicky nestabilních zemích, Bolívii a Chile [5].

Čím více se vracíme na různých úrovních k obnovitelným zdrojům, tím častěji s nimi bývají spojovány baterie, jakožto zdroj opakovatelně akumulující elektrickou energii. Aby jejich vnitřní elektrochemické struktury vydržely co nejdéle a využitý soubor cenných hornin s náročným technologickým procesem zpracování vyšel v důsledku co nejefektivněji, musí se k nim adekvátně přistupovat. Mezi jednotlivé články a koncovou aplikaci vyžadující elektrickou energii se vkládá specifická elektronika se schopností monitorovat a organizovat dostupný potenciál na základě kombinace elektrických, ale i řady neelektrických parametrů. Platformy komerčních řešení neumožňují vstup vlastních algoritmů matematických modelů založených na simulacích. Pouze sledují výrobcem definovaná pravidla. Co když ale obecně pro některé typy konkrétních aplikací nevyhovují? Stačí připojit jinou (třeba i experimentální novou) chemii článků nebo s nimi pracovat v jiných režimech a najednou se parametry zbývající dostupné kapacity mohou úplně odchýlit od očekávané reality.

1. Elektrochemické akumulátory

Napájecí elektrochemické akumulátory různých formátů a chemií jsou nedílnou součástí dnes již téměř všech spotřebních či mobilních aplikací. Potenciál lithia v bateriích se začal významněji projevovat na počátku 20. století. Jedná se o kov s nejnižší hustotou, vysokým elektrochemickým potenciálem a dosažitelným vysokým energetickým poměrem k jednotce hmotnosti. První experimenty se datují od roku 1912 z laboratoře amerického chemického fyzika George Newtona Lewise [6]. Komerční prototypy pak spatřily trhy o šedesát let později. Významný progres lithium-iontových článků nastal v roce 1979, kdy prošly úpravou týmu profesora Johna B. Goodenougha a Koichi Mizushima z Oxfordské univerzity. Vytvořili nový koncept lithiové baterie založené na interkalačním materiálu LiCoO_2 , ve které lithium prochází elektrolytem z jedné elektrody na druhou v podobě elektricky nabitých iontů. Během vybíjení migrují lithiové ionty z uhlíkové anody na katodu ze směsi oxidu lithného a dalších kovů, kde jsou vázány v pórovitých strukturách. Během nabíjení se proces analogicky obrací. Teoreticky papírově dosažitelnou kapacitu $276 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ s napětím 3,88 V doprovázela velmi vysoká rizikovitost samovznícení.

Nespornou výhodou současné technologie Li-Ion baterií, oproti tehdy dominujícím nikl-kadmiovým článkům, je nárůst nominálního napětí z 1,2 V na 3,6 V, potlačení paměťového efektu během cyklování, pomalejší samovybíjení a také méně škodlivý sekundární vliv na životní prostředí [7].



Obrázek 1 – Mechanická struktura vrstev dobíjecích Li-Ion článků [8]

Výhody současné technologie:

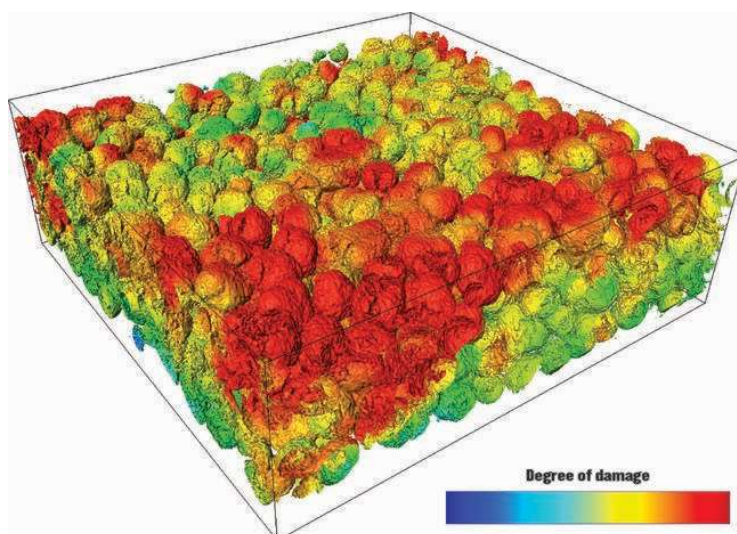
- Výrobně lze dosáhnout libovolných tvarů a konstrukcí
- Vysoká energetická hustota až $280 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Vysoké nominální napětí (3,6 V)
- Nízká míra samo-vybíjení (do 5 %)
- Životnost 500 až 1200 nabíjecích cyklů
- Bez paměťového efektu a nutnosti počátečního formátování

Nevýhody současné technologie:

- Nebezpečí vznícení při nesprávné manipulaci a náročné hašení
- Nepřetržitě stárnutí (průběžná ztráta kapacity), počínaje výrobou
- Citlivost na dodržení parametrů, pod-vybitím se nevratně ničí
- Omezený (pracovní) teplotní rozsah
- Obtížná a nákladná recyklace s malou výtěžností
- Nebezpečné pro životní prostředí

Zásady prodloužení životnosti:

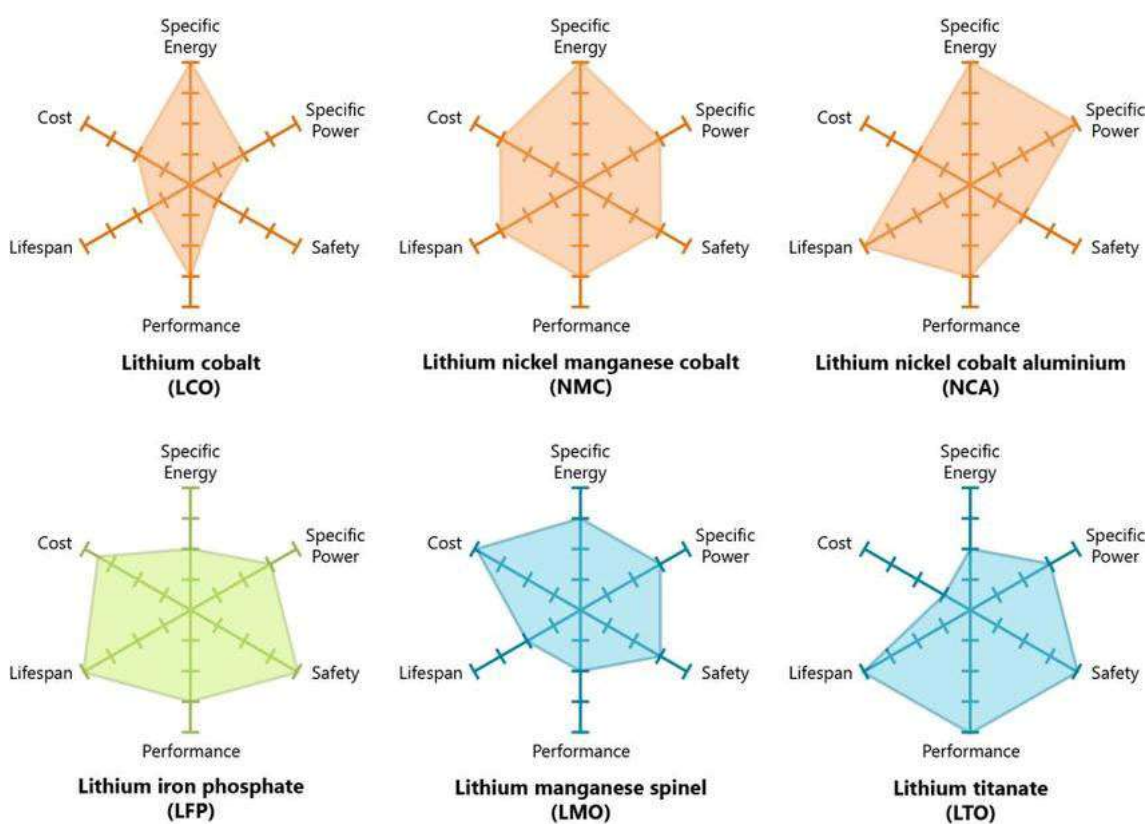
- Omezení přenosu vysokých násobků „C“ (rychlo-nabíjení / rychlo-vybíjení)
- Udržování / skladování mezi 20 až 80 % kapacity
- Udržování / skladování při stabilních teplotách, ideálně $+5$ až $+15$ °C
- Pro dlouhodobá uskladnění počítat s rezervou pro samovybíjení



Obrázek 2 – 3D model poškození struktur Li-Ion článku vlivem rychlo-nabíjení [9]

1.1. Elektrochemická struktura

Vývoj nových struktur s modifikací chemických složení urychluje zejména poptávka dnešní doby po výkonných bateriích. Snahou je dosáhnout co nejlepších kompromisů mezi cenou, energetickou hustotou, bezpečností, životností a enviromentální stopou (toxicitou, recyklovatelností). Vnitřní konstrukce významně ovlivňuje chování článku a tím určuje i jeho možnosti a optimální využití. Uživatelsky správné pochopení základních chemií proto může vést k lepší klasifikaci pro koncové aplikace.



Obrázek 3 – Lithium-iontové technologie dostupné na trhu [10]

Struktura většiny běžně dostupných článků se skládá ze čtyř základních komponent, anody, katody, separátoru a elektrolytu. Ze stejných principů vycházejí i Li-Ion články používající grafit na měděné anodě a interkalační sloučeninu lithia na hliníkové katodě. Množství lithia, naneseného aktivního materiálu na katodě určuje kapacitu. Napětí vychází z potenciálového rozdílu mezi anodou / katodou a rychlost nabíjení / vybíjení závisí pak na struktuře anody. Aktivní sloučeniny mezi sebou interagují souběžně komplexním a komplementárním způsobem, což podmiňuje rychlé a pomalé procesy.

Struktura a význam anody

Záporná elektroda slouží pro strukturované ukládání lithiových iontů. Počátky vedly skrze perspektivní vysoce-kapacitní kovové lithium, u kterého se ale později prokázala přímá spojitost se vznikajícími požáry. Opakovaným cyklováním rostly na jeho povrchu ostré jehličky nazývané dendrity postupně vyvolávající vnitřní zkraty. Současnou náhradou jsou stabilnější materiály na bázi uhlíku dosahující teoretické kapacity až ke $372 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$. Redukovaná povrchová plocha zajišťuje vyšší stabilitu elektrochemického systému se současně nižšími ztrátami kapacity. Uhlíkové vrstvy charakterizují hexagonálně uspořádané atomy vázané Van der Walsovými silami, samotné atomy pak spojují kovalentní vazby ve $0,142 \text{ nm}$ mřížce se třemi dalšími atomy. Čtvrtý valenční elektron zůstává volný a odpoutáním z elektronového obalu vytváří grafitu podmínky elektrické vodivosti. Anodová rovnice (1.1) shrnuje poměrovou bilanci, ze které vyplývá potřeba šesti uhlíkových atomů k udržení lithiového iontu. U křemíkových anod stačí jeden atom na čtyři lithiové ionty. Rovnice (1.2) se týká vratných elektrochemických katodových dějů.



Kladná elektroda tvořena lithium-kobalt oxidem při nabíjení oxiduje a kobaltem uvolněné ionty Co^{3+} přecházejí na Co^{4+} . Vybíjení pak opačně doprovází proces redukce.

Lithium Cobalt Oxide (LiCoO_2) – LCO

Lithium-kobaltový oxid, známý jako kobaltan lithný, tvoří typ Li-Ion článku, jehož katoda je vrstvenou kompozicí lithia, kobaltu a kyslíku. Kobalt, nosný prvek LCO technologie, je materiál s vysokou energetickou hustotou, vykazující silnou těkavost. Články vynikají specifickou energií, ale zároveň nejsou vhodné pro vysoký energetický přenos a teplotně exponovaná prostředí. Grafitová anoda omezuje životnost měnicím se rozhraním pevného elektrolytu, zahušťováním na anodě a lithiovým pokovením při rychlém nabíjení a nabíjení při nízké teplotě. Horší materiálová stabilita, relativně krátká životnost, omezené možnosti zatěžování, zvýšená citlivost na přebíjení a teplotní výkyvy vedou k časté záměně za NMC a NCA technologie. Novější a mnohdy i lacinější alternativy zahrnují nikl, mangan a hliník pro zlepšení životnosti a nabíjecích schopností.

Tabulka 1 – Specifikace Lithium Cobalt Oxide (LiCoO_2)

Pracovní napětí	3,6 V // 3,0 V až 4,2 V
Energie (kapacita)	150 až 240 Wh·kg ⁻¹
Nabíjení	0,7 až 1C // 3h
Vybíjení	≤ 1C
Životnost	500 až 1000 plných cyklů při optimálním provozování

Shrnutí: LCO články jsou vhodnější pro použití v aplikacích, jako jsou chytré telefony, digitální fotoaparáty, notebooky... Aby nedocházelo k přehřívání vlivem nadměrného namáhání a zkracování životnosti, neměly by se články nabíjet ani vybíjet proudem vyšším, než je jeho C-hodnota

Lithium Manganese Oxide (LiMn_2O_4) – LMO

Lithium-manganové články jsou založeny na oxidu manganu, což je netoxický hojně se vyskytující prvek, díky čemuž vycházejí ekonomicky výhodně. Architektura tvoří trojrozměrnou spinelovou strukturu, která zlepšuje tok iontů na elektrodě, což má za následek nižší vnitřní odpor a lepší přenos proudu. LMO články vynikají nízkou mírou samovybíjení a při vybíjení umožňují dosahovat vysokých násobků C. U pouzder 18650 Lithium-manganových chemií nezpůsobují proudová přetížení 20 až 30 A žádná významná oteplení. Nižší vnitřní odpor s vysokou teplotní stabilitou z nich činí bezpečnější volbu pro energeticky náročné aplikace. Mezi hlavními nevýhodami LMO článků vyniká omezená energetická kapacita s nízkou provozní životností, proto se kombinují s lithium-nikl-manganovým oxidem kobaltnatým (NMC).

Tabulka 2 – Specifikace Lithium Manganese Oxide (LiMn_2O_4)

Pracovní napětí	3,8 V // 3,0 V až 4,2 V
Energie (kapacita)	100 až 150 Wh·kg ⁻¹
Nabíjení	0,7 až 1C // 3h
Vybíjení	1C až 10C
Životnost	300 až 700 cyklů

Shrnutí: LMO články se používají v aplikacích vyžadujících vysoký nepřetržitý výkon a jsou tak ideální pro použití v ručním nářadí, dronech, elektrokoloběžkách, lékařských, vojenských a průmyslových aplikacích s vysokými proudovými špičkami.

Současný výzkum technologií tíhne především k perspektivní kombinaci Li-manganu s kobaltem, niklem a hliníkem jako aktivním katodovým materiálem. Některé architektury umožňují anodové příměsi křemíku, které poskytují zvýšení kapacity o 25 procent. Nárůst je však vykoupen kratší životností, jelikož cyklický proces nabíjení a vybíjení způsobuje mechanická namáhání – křemík roste a zmenšuje.

Aktivní kovy, stejně jako křemíkové vylepšení, lze cíleně kombinovat pro zvýšení specifické energie (kapacita), specifického výkonu (zatížitelnost) nebo životnosti. Spotřebitelská zařízení vyžadují baterie s vysokou dostupnou kapacitou a příležitostně vysokými vybíjecími proudy. Zatímco průmyslové aplikace se staví na robustnějších bateriových systémech s dobrými nabíjecími vlastnostmi, poskytujícími bezpečný, spolehlivý provoz s dlouhou životností.

Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO₂) – NMC

Lithium-nikl manganové články s oxidem kobaltnatým mají katodu velice úspěšně sestavenou z kompozitu niklu, manganu a kobaltu zastoupených přibližně stejným podílem. Nikl je známý svou specifickou schopností akumulovat energii, ale zároveň také špatnou stabilitou. Mangan vyniká schopností vytváření spinelových struktur, které se projevují nízkým vnitřním odporem, ale také nízkou měrnou energií. Kombinací prvků se vzájemně posilují a jejich podíl přímo ovlivňuje parametry článku. Lze dosáhnout buď vyššího specifického výkonu nebo vyšší specifické hustoty energie. Zastoupení NMC článků perspektivně roste, neboť pro dosažení dobrého výkonu může být sestaven zároveň i velmi ekonomicky. Vyvíjené elektrolyty a přísady pro zvýšení kapacity článku umožňují dosahovat maximálního napětí až 4,4 V.

Tabulka 3 – Specifikace Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO_2)

Pracovní napětí	3,7 V // 3,0 V až 4,2 V
Energie (kapacita)	150 až 220 Wh·kg ⁻¹
Nabíjení	0,7 až 1C // 3h
Vybíjení	1C až 2C
Životnost	1000 až 2000 cyklů

Shrnutí: NMC články se používají v elektrickém nářadí, lékařských zařízeních, elektrokolech a jsou jednou z nejpreferovanějších alternativou elektrických pohonných jednotek a intenzivně cyklovaných systémů pro skladování energie (EES).

Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) – LFP

Lithium-železofosfátové články patří v dnešní době stále mezi jedny z úplně nejběžnějších. Díky nano-fosfátovému katodovému materiálu akumulují nižší množství energie než mnoho jiných, ale vynikají velmi vysokou provozní životností, tepelnou stabilitou, nízkým vnitřním odporem a lepší tolerancí vůči přebíjení. Dlouhodobé udržování plného nabití článků nezpůsobuje, pro Li-Ion chemie typická namáhání vedoucí k plynulému poškození. Nižší jmenovité napětí snižuje dostupnou energii pod úroveň kobaltových článků. LFP články svými parametry vybočují od běžných nastavení BMS jednotek a žádají si volbu jiných matematických modelů a robustnější elektroniku. Rozdílným stárnutím vlivem materiálových nečistot při výrobě a silnějším efektem samovybíjení rostou nároky na vyvažovací obvody.

Dobrá elektrochemická výkon charakterizuje články vhodné pro náročné operace, zejména se jedná o ekologičtější náhrady olověných baterií s kyselinou sírovou. Při zachování srovnatelných napětí lze v automobilech nahradit šesti-článkový akumulátor čtyř-článkovým LFP. K zabránění sulface, postupného vzniku krystalického síranu olovnatého se využívá nastavené systematické přebíjení a dlouhodobé udržování hranice 14,40 V (2,40 V na olověný článek), tedy 3,6 V na LFP článek. Reálnou praktičnost ukáže až delší časový odstup, nízká teplota napříč všemi Li-Ion snižuje dostupný alokovaný výkon a zvýšená teplota skladování zkracuje životnost.

Tabulka 4 – Specifikace Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4)

Pracovní napětí	3,3 V // 2,5 V až 3,6 V
Energie (kapacita)	90 až 120 $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$
Nabíjení	1C // 3h
Vybíjení	1C až 25C
Životnost	>2000 cyklů

Shrnutí: LFP články se uplatňují v náročných podmínkách a jsou vhodné pro aplikace s požadovaným vysokým výkonem. Využívají se také pro průmyslová zařízení, která se dříve spoléhala na olověné baterie – automobily, vysokozdvizné vozíky, těžké stroje.

Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO_2) – NCA

Lithium-nikl-kobaltové články s oxidem hliníovým vycházejí technologicky z LCO článků, které mají katodu rozšířenou o nikl a hliník. Vysoký podíl niklu v katodě zlepšuje energetickou hustotu, ale zároveň také nabourává stabilitu celého elektrochemického systému. Bezpečnostní požadavky může externě suplovat propracovaná elektronika určená pro sledování jejich chování. Omezená dostupnost kobaltu a niklu činí NCA články drahými a zůstávají převážně pro speciální aplikace.

Tabulka 5 – Specifikace Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO_2)

Pracovní napětí	3,6 V // 3,0 V až 4,2 V
Energie (kapacita)	200 až 260 $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$
Nabíjení	0,7C // 3h
Vybíjení	1C
Životnost	500 cyklů

Shrnutí: NCA články mají vysokou hustotu energie, díky čemuž jsou vhodné pro skladování energie v síti nebo pro použití v elektrických pohonných jednotkách.

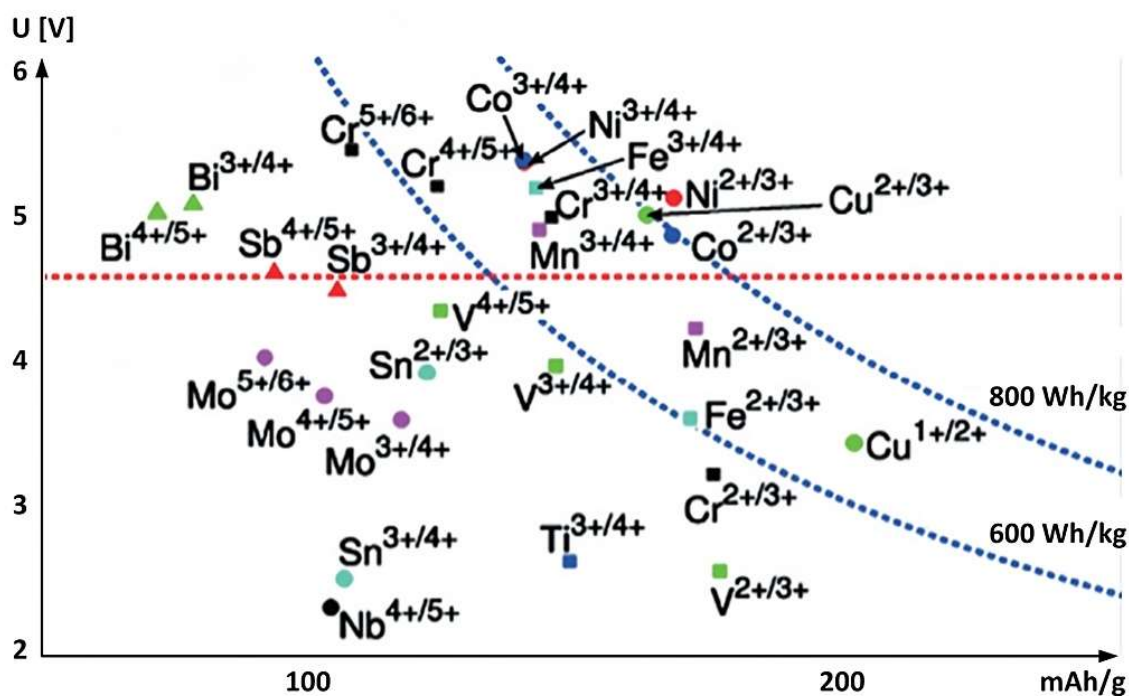
Lithium Titanate (Li_2TiO_3) – LTO

Lithiumtitanát, uváděný také jako Li-titanát, jsou články s pokročilou anodovou nanotechnologií. Oproti ostatním, založených primárně na grafitu, tvoří anodu titaničitan lithný, vysoce porézní materiál, až s 33krát dosažitelně větším povrchem na jednotku hmotnosti než uhlík. Masivnější přesun elektronů umožňuje podstatně silnější energetický přenos a krátkodobé přetěžování přesahující hodnotu kapacity 20C. Většina přenosných baterií je však dimenzována na 1C. Oproti konvenčním Li-Ion s příměsí kobaltu a grafitovou anodou nabízí LTO technologie výhody v tepelné stabilitě. Menší vnitřní namáhání potlačuje vytváření SEI filmu a pokovování lithiem při rychlém nabíjení a nabíjení při nízké teplotě. LTO struktura s velmi vysokou provozní životností, patří mezi jednu z nejbezpečnějších na trhu, ale zároveň naopak také poměrně drahou.

Tabulka 6 – Specifikace Lithium Titanate (Li_2TiO_3)

Pracovní napětí	2,4 V // 1,8 V až 2,8 V
Energie (kapacita)	50 až 80 Wh·kg ⁻¹
Nabíjení	1C až 5C // 3h
Vybíjení	10 C až 20 C
Životnost	3000 až 7000 cyklů

Shrnutí: LTO články využívala japonská varianta i-MiEV Mitsubishi a motocykly Honda. Kvůli jejich nižší energetické hustotě, ale zároveň rychlému nabíjení jsou vhodné pro pohonné jednotky těžkých strojů, manuální náradí, solární pouliční osvětlení, UPS... V budoucnu mohou najít uplatnění při vytváření chytrých sítí a skladování nárazové energie z obnovitelných zdrojů.



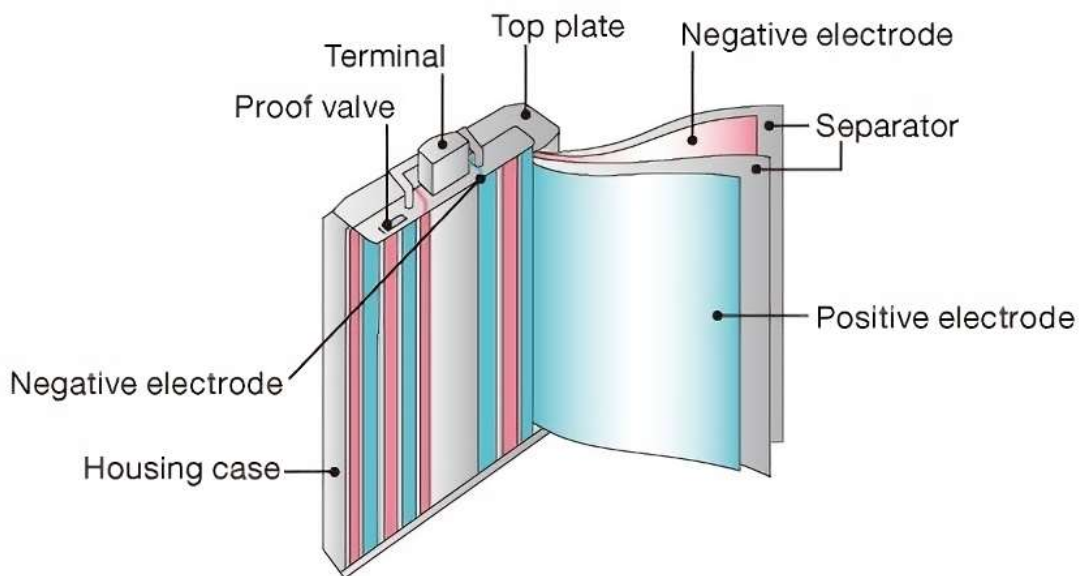
Obrázek 4 – Vizuální zařazení technologií – napětí / energetická hustota

Elektrolyt

Médium vazebně spojující vysoce reaktivní materiály, bez ohledu na konzistenci se označuje souhrnně elektrolytem. Mohou být kapalné, gelové i pevné. Jeho komplexní vlastnosti iontového přenosu se přímo promítají do výkonnosti a bezpečnosti celého elektrochemického Li-Ion systému. Složení vychází z lithných solí rozpuštěných ve dvou či více organických rozpouštědlech. Volba rozpouštědla je rozhodující pro vytvoření stabilního pevného elektrolytického rozhraní SEI (solid-electrolyte-interface). Velmi časté bývá využití hexafluorofosfátu LiPF₆ splňující mnohostranné požadavky iontové vodivosti <math><10\text{mS/cm}</math> v EC/DMC při 20 °C. Tekuté elektrolyty nabízejí lepší přenos, zatímco pevné gel-polymerové GPE vyšší bezpečnost. GPE sestávají v tuhý rosol polymerní matrice, mezi které můžou patřit například polyakrylonitril PAN, polyetylenoxid PEO, poly-methyl metakrylát PMMA a poly-vinyliden difluorid PVDF. U rozpouštědel se dbá na vysokou dielektrickou pevnost ovlivňující proces samovybití, řadí se mezi ně dimethylsulfoxid, propylenkarbonát, ethylenkarbonát a další. [11] [12]

Separátor

Separátor zajišťuje rovnoměrný distanční nevodivý odstup mezi jednotlivými elektrodami a omezuje volné proudění elektrolytu. Konstrukčně zůstává propustný pouze pro pohybující se elektricky polarizované ionty. Velmi tenká fólie se vyrábí z mikroporézních plastů jako je polypropylen (PP), polyethylen (PE), může být také polymerová nebo v podobě plstěného či tkaného nylonu. Z *Obrázek 5* je patrné strukturování, které zajišťuje dosažení odpovídajících kapacit. Pásky elektrod, vzájemně oddělených separátorem jsou srolovány případně naskládány a vloženy do odpovídajícího (kovového) pouzdra. Forma aktivovaného kapalného elektrolytu je v malém množství absorbována separátorem. Lithium polymerové články (Li-Pol), založené na polymerovém, tedy tuhém elektrolytu separátory principiálně nevyužívají.



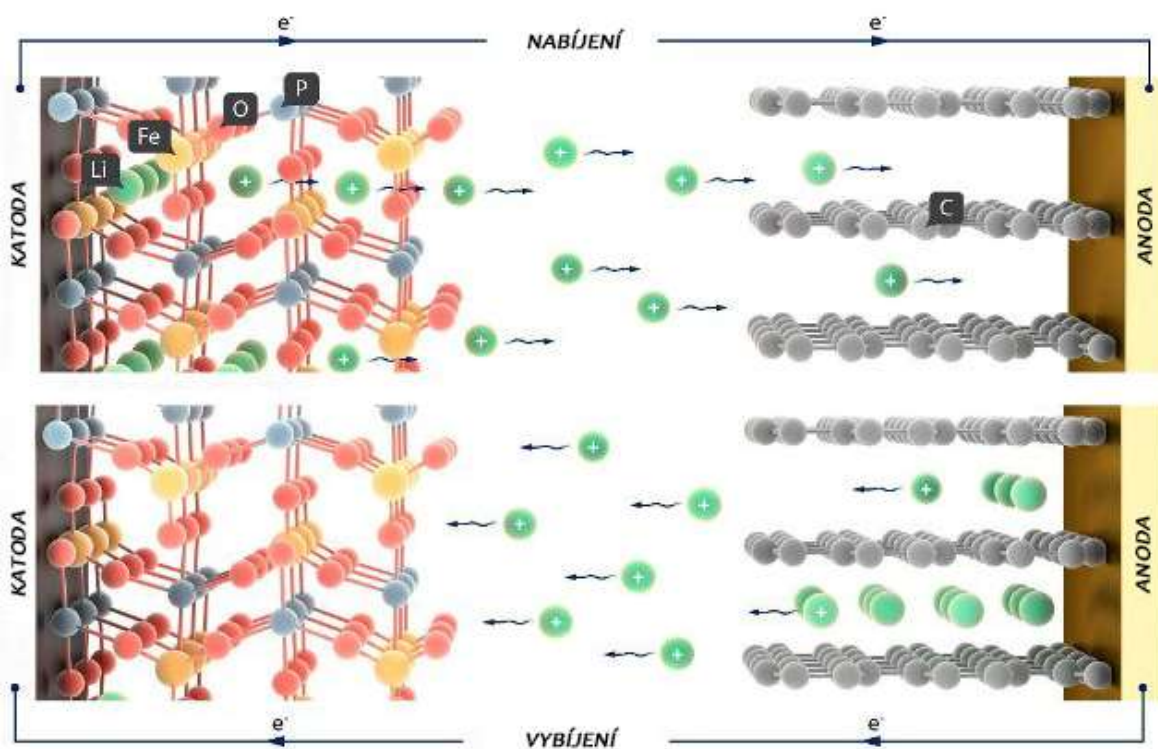
Obrázek 5 – Strukturování aktivních vrstev a separátoru [13]

Solid-Electrolyte-Interface (SEI)

Samovolně vznikající vrstva SEI pasivuje povrch elektrody při prvním styku elektrolytu a uhlíkové anody. Ochranná bariéra brání další redukci rozpouštědla a působí jako selektivní vrstva umožňující průniku lithiových iontů. Složení elektrolytu a původ složek SEI patří mezi žádaná výzkumná témata s cílem odhalení nových rozpouštědel a lithných solí se zlepšenou iontovou vodivostí a vyššími teplotními rozsahy.

Interkalace

Lithiové oxidy kovů a grafity jsou vrstvené pórovité materiály s intersticiálními prostory určenými k interkalaci lithných iontů. Proces interkalace v člancích zajišťuje vměšování lithiových iontů do krystalové mřížky materiálu bez vyvolání chemické reakce. Oproti ostatním typům sekundárních elektrochemických zdrojů se tak dosahuje výrazně delší životnosti. Během nabíjení článku se rozpouštědly naštěpené ionty lithia ionizací přesouvají z kladné elektrody na zápornou. Obohacený materiál se označuje interkalační sloučeninou nebo jako interkalát. Procesu interkalace napomáhá rozhraní SEI, které se tvoří na povrchu každé elektrody plnící kritickou roli.



Obrázek 6 – Přenos a interkalace lithiových iontů v LiFePO_4

1.2. Pouzdra a značení článků

Li-Ion článek je vysoce komplexní elektrochemický mechanicky stabilní systém pro dlouhodobější opakované uchovávání (akumulaci) elektrické energie. Jak již bylo uvedeno na *Obrázek 1*, technologicky se skládá z elektrod, separátoru a elektrolytu. Konstrukce může mít mnoho libovolných tvarů od robustnějších (výměnných) cylindrických / prizmatických provedení až po tvárnější pouch články, naopak častěji využívaných v zabudovaných aplikacích, *Obrázek 11*. Velice známé bývá provedení 18650, kde číslo analogicky kóduje rozměry ve znění 18 mm průměr článku a 65 mm jeho délka, přičemž kapacitu mívají do 3500 mAh. Proudové parametry v násobcích kapacity (tzv. C) se obecně mohou lišit v závislosti na chemické struktuře.



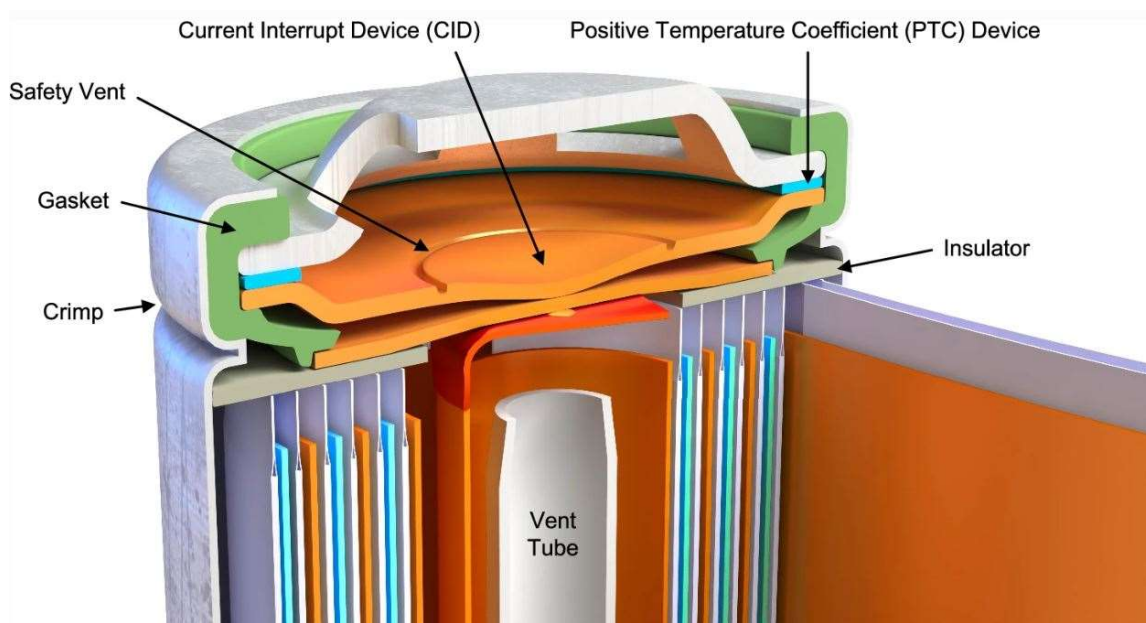
Obrázek 7 – Princip kódování cylindrických článků [14]

1.3. Integrované ochrany pouzder 18650

Přestože jsou Li-Ion baterie uživatelsky pohodlné díky jejich kompaktním rozměrům i pro drobnou elektroniku, bez řádné ochrany se mohou snadno vymknout kontrole. Časté rozlišení bývá zejména u laciné „východní“ elektroniky, počínaje svítilnami, e-cigaretami..., kde se vůbec nezohledňují provozní limity. Tzv. „nechráněné“ články mají pevně zabudované pouze základní povinné PTC a CID (mechanické) ochrany, které za běžných okolností nijak neovlivňují impedanční parametry článku. *Obrázek 8* zachycuje konstrukční rozložení v cylindrickém pouzdře. Jinak tomu bývá u tzv. PCB elektronických rozšíření, precizně hlídajících napěťové / proudové hranice a také pulzní formy zkratů. Pro využití v pokročilých aplikacích zahrnujících externí obvody dohledu

s cílem podrobnějších mapování charakteristik a stavů článků (vyvíjená BMS jednotka) se vzhledem ke zkrácení polovodičová rozšíření neuvažují.

Mechanická ochranná zařízení používaná v nejběžnějších komerčních pouzdrech jsou na úrovni samostatných článků vysoce spolehlivá a vedou k plné prevenci nebezpečných stavů. U rozsáhlejších klastrů smíšených konfigurací však simulace ale už prokazují tepelné úniky, nejčastěji vyvolávané přepětím (přebitím) a vnějšími zkraty. V uvedených situacích ochrany nefungují, jak by se očekávalo případně mohou být dokonce příčinou vzniklých nebezpečí.



Obrázek 8 – PTC a CID ochrany cylindrických článků [15]

Integrované ochrany cylindrických článků:

- PTC chrání před přehřátím a nepřímo nadproudem, automaticky se resetuje
- CID ochrana trvale deaktivuje článek, pokud je vnitřní tlak příliš vysoký (často bývá vyvolána přebitím či přetížením)
- PCB elektronická ochrana jistí článek před dosažením kritických parametrů, v závislosti na konstrukci se resetuje automaticky nebo po vložení do nabíječky

Positive Temperature Coefficient – PTC

PTC termistor, polovodičová součástka závislá na teplotě s kladným teplotním koeficientem. Charakteristika chování vychází ze složení elektricky vodivých materiálů, které lépe vedou elektrický proud při nižších teplotách než při vysokých. Jejich odpor se téměř lineárně zvyšuje s rostoucí teplotou. PTC se skládají z keramických polykrystalických titanátových směsí s mřížkovým uspořádáním atomů. Přebytné valenční elektrony (jeden na atom) způsobují pohybem ke kladnému pólu elektrickou vodivost. Pro úpravu teplotně-elektrických parametrů se směs dopuje cizími atomy. PTC obecně chrání články při vnějších zkratech a jejich charakteristiky a nastavená omezení se liší podle výrobce. Sériové napětí článků nesmí překročit výdržné napětí PTC. U vysokonapěťových baterií proto mohou být užitečné pro zvýšení bezpečnosti speciální paralelně řazené výkonové diody.

- Vestavěné téměř do všech článků 18650
- Chrání před přehřátím a vysokým vnitřním tlakem
- Zabraňuje nepřímo před proudovými rázy
- Nemusí spolehlivě fungovat pro více-čláňkové bateriové moduly
- Při aktivaci se resetuje a nevyřadí baterii trvale. Častou aktivací se opotřebovává a roste vnitřní elektrický odpor

Current Interrupt Device – CID

CID chrání články primárně proti přebití. U vysokokapacitních a vysokonapěťových baterií, kde se CID používá jako úroveň kontroly bezpečnosti, se nejprve provádí testy přebití, potvrzující jejich bezpečnou funkcionalitu. Souhrnný nabíjecí proud paralelních kombinací nesmí v případě vypnutí CID ochran způsobit zvýšení odporu PTC žádného ze zbývajících článků. Nejčastější příčiny selhání ve správném zabezpečení, bývají v nabíjecím proudu (neúmyslná aktivace PTC), vysoké teplotě (aktivace PTC nebo nekontrolovatelný tepelný únik) a při vysokém napětí způsobujícím zapálení PTC.

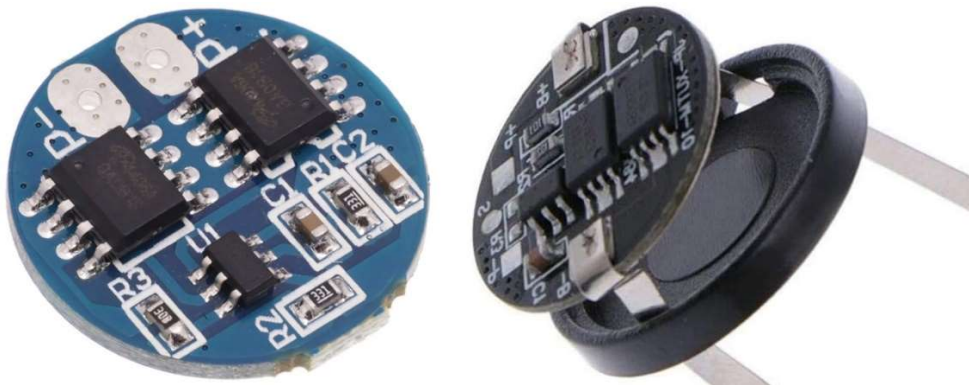
- Vestavěné téměř do všech článků 18650
- Z vnějšku pouzdra její přítomnost nerozlišitelná
- Implementováno spolu s PTC

- Nemusí spolehlivě fungovat pro více-čláňkové bateriové moduly
- Tlakový ventil, trvale přerušující kladný pól článku při dosažení 1 MPa

Printed Circuit Board protection – PCB

Zkratový stav mezi vnějšími elektrodami neboli forma nadměrného přetížení, způsobuje vybití článků Li-Ion baterie na hranici své kapacity a prudkou tvorbu tepla. Zvýšení teploty a přehřátí baterie, způsobuje poškození vnitřních struktur (zejména separátoru), což vede k nebezpečným situacím jako jsou emise toxických výparů, požár eventuálně výbuch. Integrovaná ochrana proti zkratovému proudu slouží k přerušení elektrického obvodu s reakcí nízkých jednotek mikro sekund. Přestože je funkčně podobná výbojové nadproudové ochraně, vyznačuje se elektronický zkratová ochrana rychlou odezvou na velký výbojový proud. Pasivní spotřeba typicky nepřekračuje 4 μ A.

Polovodičové obvody se integrují v rámci běžných pouzder s minimálním nárůstem rozměrů. Velký význam má zejména u samostatně využívaných LCO článků s omezenými možnostmi zatěžování a se zvýšenou citlivostí na přebíjení. Rozšířená forma ochranných struktur napříč trhem není mezi výrobci nijak sjednocena.

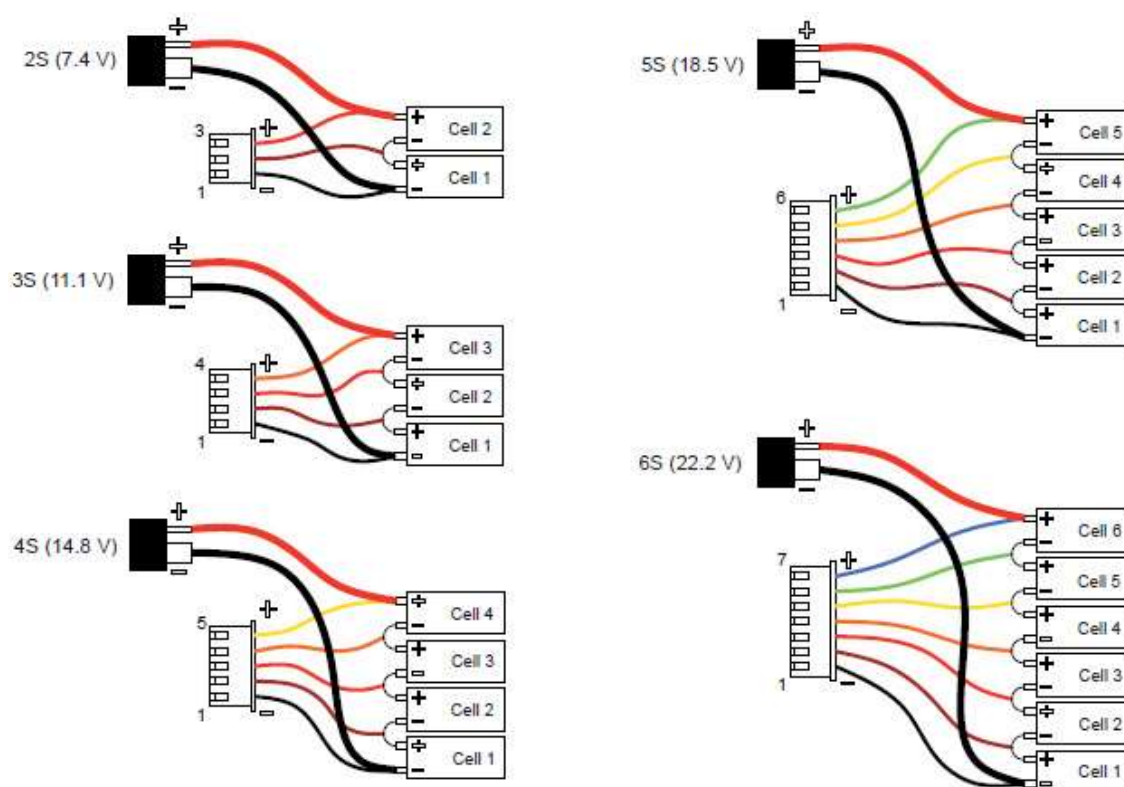


Obrázek 9 – Ochranná elektronika integrovatelná v článcích 18650

- Důrazně se doporučuje pro starší technologie Li-Ion baterií
- Identifikovatelná bočním vodičem, odlišným spodním kontaktem, rozměry
- Využitelné zejména ve svítilnách
- Chrání proti přebití, nadměrnému vybití, přetížení a zkratu

1.4. Sério-paralelní řazení článků

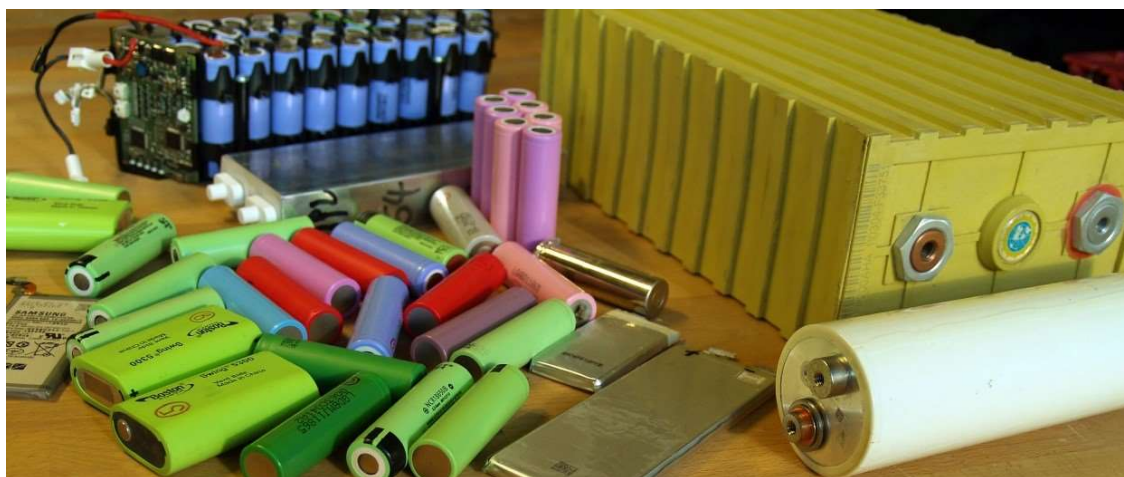
Lithium–iontové články představují v současné době jeden z nejmodernějších zdrojů akumulované energie. Vyznačují se především velmi příznivým poměrem hmotnosti na energetickou hustotu až $280 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, tedy třikrát vyšší než u starších NiMH chemií. Pracovní napětí článku odpovídá rozptylu 2,80 V až 4,20 V. Při využívání se striktně monitoruje napěťová bilance a teplota. Přebití článku přes hranici 4,25 V či naopak vybití pod 2,75 V pro chemické složení lithium-cobalt-oxide kladné elektrody a uhlíkové záporné, znamená obvykle nevratné destruktivní poškození. Hodnotu kritického napětí zpravidla nelze měřit pouze na výstupních svorkách akumulátoru v celkovém součtu, musí se korigovat pomocí balančního konektoru separátně pro každý sériový článek zvlášť. Tento konektor zprostředkovává individuální přístup ke všem dílčím článkům, viz *Obrázek 10*.



Obrázek 10 – Vnitřní struktura sériového řazení článků Li-Ion akumulátorů [16]

Za účelem zvýšení napájecího napětí a obvykle i kapacity se jednotlivé články seskupují do accupacků. Accupack představuje sériové, paralelní, či smíšené propojení

článků v rámci jednoho obalu baterie. Při sériovém zapojení se sčítá jejich napětí, při paralelním zapojení se sčítají naopak kapacity. S tím jsou poté spojena i pravidla značení. Pro názornost je propojování prezentováno na základních sestavách článků. Uvedené články 18650 tak mohou s následujícími pravidly tvořit baterii v notebooku o nominálním napětím 10,8 V (3s2p), ale i obrovskou baterii pro automobil Tesla P100D s napětím dosahujícím 400 V a výkonem 451 kW.



Obrázek 11 – Cylindrická, prizmatická, pouch konstrukce

2s 5000 mAh – 2s označuje zapojení dvou článků do série. V accupacku jsou dva články o stejné kapacitě 5000 mAh, přičemž se sčítá jejich napětí. Celkové napětí accupacku proto odpovídá 7,2 V ($2 \cdot 3,6$ V). V maximálních hodnotách pak 8,4 V ($2 \cdot 4,2$ V).

2s1p 5000 mAh – tento zápis, přestože je po stránce zapojení správný, se zpravidla nevyužívá. V praxi znamená, že accupack zahrnuje pouze dva sériově zapojené články. Jedná se o ekvivalent k variantě 2s 5000 mAh a proto se údaj 1p vesměs neuvádí a zkracuje se jenom na 2s.

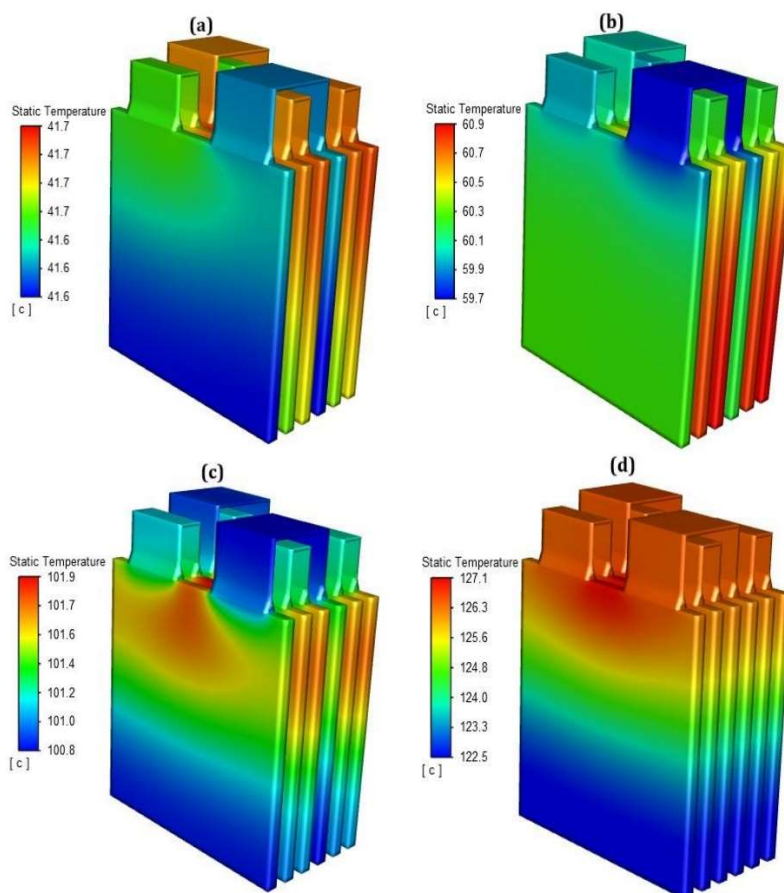
2s2p 5000 mAh – zde je situace analogická vzhledem k systému předchozích variant. V accupacku jsou zapojeny celkem čtyři články – dvě sériové kombinace článků po dvou, které jsou paralelně propojeny. Každý z jednotlivých článků má skutečnou kapacitu 2500 mAh a napětí 3,6 V. Vše se na výstupních svorkách násobí dvakrát, což vytváří accupack s nominálním napětím $2 \cdot 3,6 = 7,2$ V a kapacitou $2 \cdot 2500 = 5000$ mAh.

Tabulka 7 – Důležitá napětí LCO Li-Ion článků

Maximální napětí článku	4,25 V
Nominální napětí článku	3,60 V
Minimální napětí článku	2,75 V

1.5. Snímání teploty článků

Přesné snímání teploty článků Li-Ion akumulátorů v krajních úvratích je jedním ze stěžejních úkolů při navrhování externích možností elektroniky BMS. Každý typ článků má z konstrukčního hlediska při energetickém namáhání zcela rozdílný teplotní profil. Celkové prostupy energie nehomogenním materiálem u větších bloků lépe charakterizují empirické simulační modely eventuálně termografická měření. Nejvíce tepelně exponovaná místa mohou být důležitými body pro umístění odporových termosenzorů.



Obrázek 12 – Simulace teplotního prostupu vrstveným akumulátorem [17]

Ilustrační simulace teplotního prostupu vrstveným akumulátorem odpovídá čtyřem rychlostem vybíjení a) 0,5C, b) 1,0C, c) 3,0C a v případě d) 5,0C. Vyšší vybíjecí proudy ovlivňují homogenitu a smazávají omezený vliv pasivního chlazení proudícím vzduchem. V prvním případě je barevně vytažená diference $<0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro vyšší energetický přenos se prohlubuje ve vizualizaci až k $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Li-Ion baterie v součinnosti s vysokými vybíjecími proudy dosahují typicky výrazných tepelných gradientů. Při trvalých vysokých vybíjecích „C“ (například 5C nebo 10C) jak může být požadováno v současných mobilních aplikacích, je nutné doplňující externí chlazení zabráňující přehříváním jader akumulátorů. Optimální provozní teploty Li-Ion článků jsou definovány v rozmezí od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Konvenční přirozené chlazení pomocí volně proudícího vzduchu nemusí být vždy efektivní, a proto se velmi často využívá nucené chlazení proudícím vzduchem, případně kapalinou pomocí termovodivých desek. Nejmodernější chladicí metody využívají velké plochy a snaží se chladit baterii z povrchu. Článek se však skládá z více vrstev katody / separátoru / anody jako rosolovité role nebo ve svazcích. Vedení tepla těmito strukturami je vysoce neefektivní, protože tepelný průchod blokují polymerní membrány s nízkou tepelnou vodivostí separátorů. I když se měď a hliník používají jako sběrače proudu, efektivní tepelná vodivost mezi vrstvami je pouze asi $1\text{ až }2\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Efektivní vodivost je v sériích výrazně nižší než kolektory Al / Cu. Chlazení z povrchu bývá velmi neefektivní a vytváří gradient skrz tloušťku se zvýšením teploty střední vrstvy při vysoké míře C při vybíjení. Tyto podmínky mají za následek omezení proudů Li-Ion baterií na 5C a typické konstrukční tvary s poloměry 6 až 8 mm s dosažením co největších povrchových ploch.

Za jistých okolností se získávají také periferní teploty od stykačů, pojistek nebo dokonce elektrických přípojníc, které vedou hlavní proud akumulátoru. Ty mohou být nezbytné tehdy, předpokládá-li se trvalé zatížení bateriového bloku na svůj tepelný limit. Akumulátory se v praxi běžně konstruují s ohledem na nízkou hmotnost, a proto se vynechávají těžké měděné přípojnice, které jsou nahrazovány jinými kovy s horším absorbováním tepelných driftů. Obecně platí, že požadavek na teplotu musí brát v úvahu tři případy použití: nabíjení, vybíjení a skladování. S ohledem na bezpečný provozní rozsah by měly být dodržovány stanovené podmínky výrobce článků. Lithium-iontové baterie nemohou správně pracovat při příliš nízkých nebo příliš vysokých teplotách.

V rámci těchto limitů je velmi důležité znát správné hodnoty. Destruktivní účinek prokovování lithiem může nastat i v normálním teplotním rozsahu při příliš vysokých proudových průchodech. Aby se uvedenému efektu zabránilo, musí být přesně známa a hlídána trojice parametrů – teplota, napětí a proud. Soubor požadavků by měl také zahrnovat význam teplotních časových konstant – tepelnou anizotropní vodivost a tepelnou kapacitu jakožto základní vlastnost akumulátoru. Bateriové články mají velkou tepelnou kapacitu a dobrou tepelnou vodivost (v určitých geometrických drahách), která je ovlivněna a omezena hraničními vrstvami tepelné izolace (pouzdro, geometrie článků). Pokud nejsou umístěny teplotní senzory optimálně, mohou vzniknout slepé tepelné plochy s nesprávným zobrazováním.

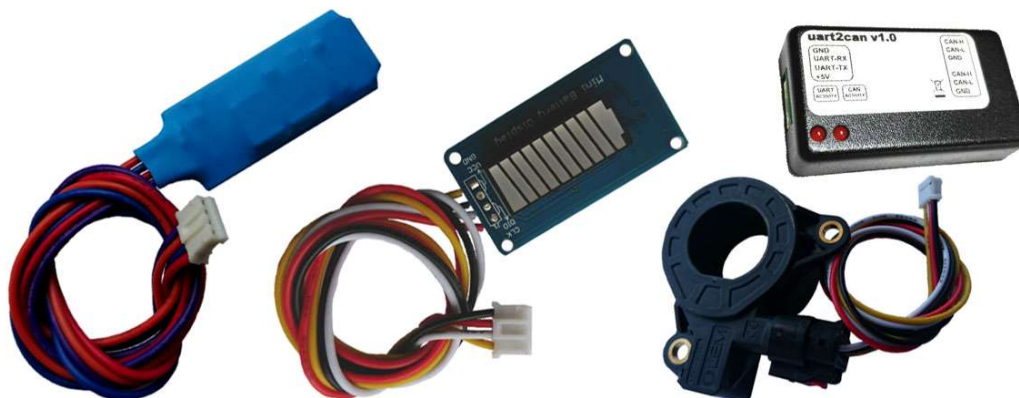
2. Komerční systémy

Obsáhlá rešerše komerčních řešení zahrnuje i užší přechod od teoretických katalogových listů jednotlivých výrobců k důkladnému laboratornímu testování srovnatelných vzorků. Problematiku lze objektivně opírat o pilíře firmwarové (softwarové) funkcionality a konstrukční limity elektroniky. Softwarovou stránku (míněnou vizuální aplikací běžící typicky na smartphonech či PC) tato disertační práce záměrně upozadí, neboť není důležitá v hlavním směru vývoje. Cílený důraz bude v průběhu směřován především k dimenzování elektroniky při výběru adekvátních obvodů a firmwaru integrovaného MCU.

Poznámka: uvedené parametry a specifikace komerčních systémů jsou platné pro aktuální revize HW/FW v době psaní tohoto textu.

2.1. TinyBMS s516

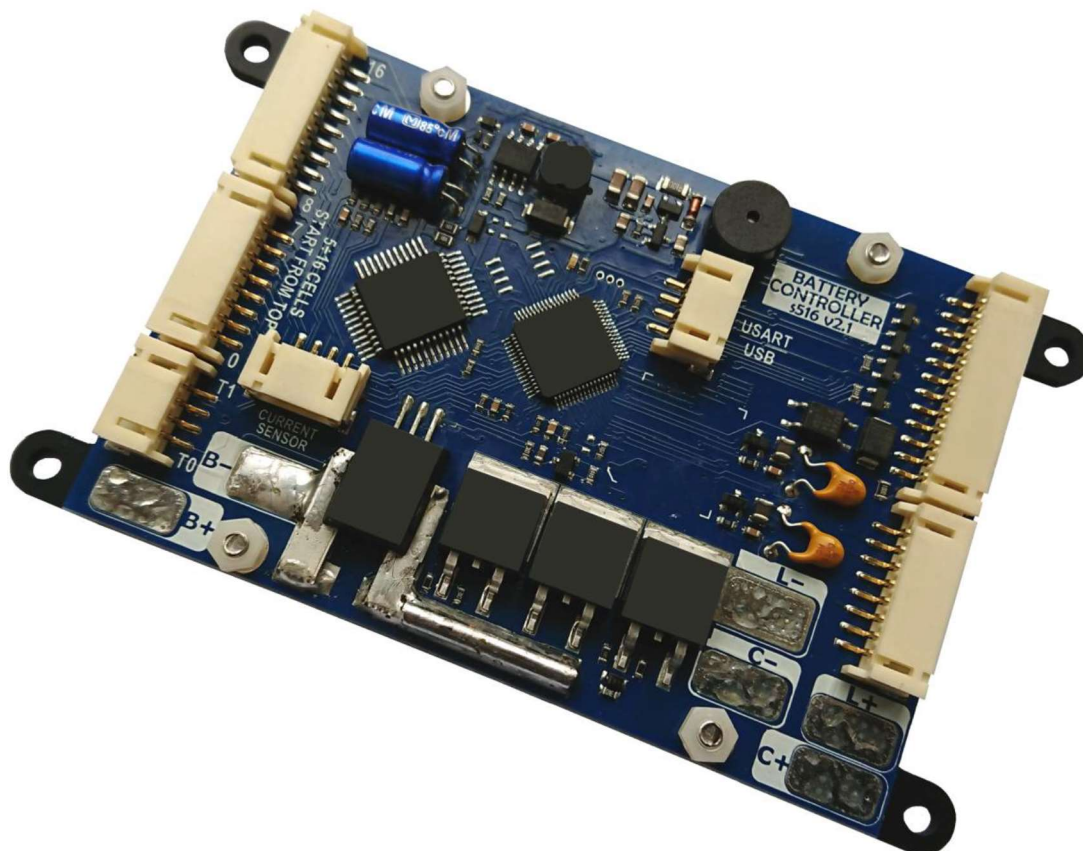
Systém TinyBMS (ENEPAQ) se řadí mezi plnohodnotné BMS střední třídy. Podporuje Li-Ion akumulátory s nominálním napětím od 12 V do 60 V a rozlišitelnou kapacitou v rozmezí od 1 Ah do 650 Ah. Nabíjecí proud může dosahovat 30 A, vybíjecí 60 A s pasivním balancováním 300 mA. Uživatelské rozhraní nabízí konfiguraci zabudovaných ochran pro polovodičové odpojení zátěže či nabíječky, pokud jsou překročeny limity teplot, proudů nebo rozsah napětí na článku/článcích. Integrovaná komunikační sběrnice umožňuje streamování dat v reálném čase. Skrze sdílený konektor lze rozšířit funkcionalitu o jednu z periferií – komunikační (UART/USB rozhraní, Bluetooth, CAN), vizualizační SoC-BAR LED indikátor nebo externí proudový senzor LEM DHAB S-133.



Obrázek 13 – TinyBMS s516, dostupné periferie

Tabulka 8 – TinyBMS s516, základní parametry

Rozsah článků	4s až 16s
Rozsah měření	1 Ah až 650 Ah
Nabíjecí / vybíjecí proud	30 A / 60 A
Schopnost odpojení	150 A
Balancování	150 mA @ 4,2 V, disipativní
Teplotní senzory	2
Komunikace	UART, MODBUS, CAN, Bluetooth
Periferie	USB–UART modul, Bluetooth modul, proudový senzor, SoC-BAR LED indikátor
Aplikace pro PC	Ano / vizualizační, konfigurační
Aktualizace firmwaru	Ano / uživatelská
Ochrany zátěže / nabíječky	Napěťové, proudové, teplotní
Rozměry	95x65x9 mm



Obrázek 14 – TinyBMS s516 elektronika

Nežádoucí vlastnosti:

- Konstantní spotřeba v režimu spánku 10 mW
- Při kritické hodnotě napětí baterie se systém neodpojí
- Hybridní komunikační čtyř-vodičový konektor umožňuje připojení pouze jedné vybrané periferie, nikoliv jejich souběžné kombinování

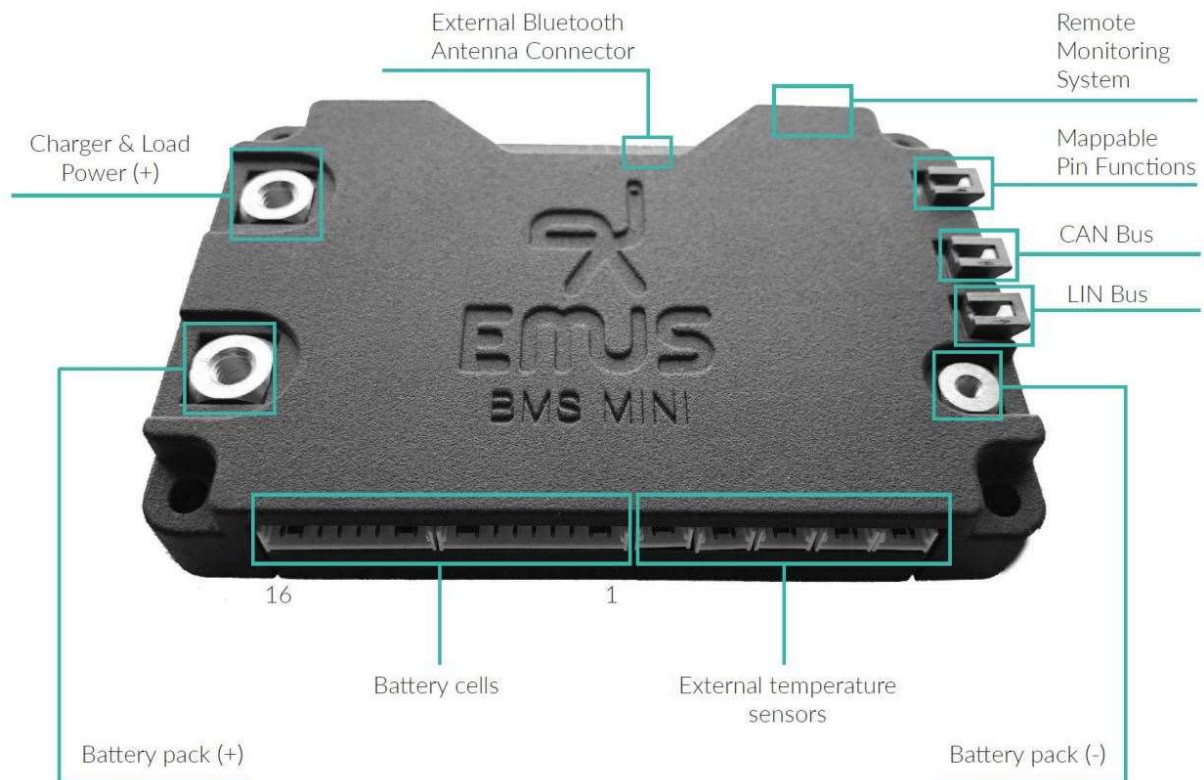
Během testování se začaly projevovat technické nedostatky zásadně diskvalifikující verzi této elektroniky (souhrnně s daným FW) i pro běžné laboratorní účely. Základní funkcionality bezpečnostních mechanismů BMS chrání především baterii před dosažením kritických parametrů. Při nízké hladině napětí dochází ke správné verifikaci a odpojení zátěže, nicméně nepropracovaná kaskádní struktura „sleep“ režimů už dále neutlumí funkce vlastní elektroniky a konstantní spotřeba 10 mW stále přetrvává. Vzhledem k minimální zbytkové kapacitě a časovému průběhu vede pasivní odběr typicky k degradacím článků baterie.

2.2. EMUS BMS mini

Porovnáním specifikací výrobců vychází EMUS BMS mini technicky lépe vybavena než předchozí TinyBMS. Rozšířením o „predischarge“ obvod se eliminují proudové rázy při spínání kapacitních či induktivních charakterů zátěží. Sběrnice CAN bus umožňuje komunikaci s nabíječkou pro optimálnější řízení procesu. Koncept BMS je kompaktní zařízení se všemi základními užitečnými funkcemi pro správu baterie. Návrh pracuje s bateriovými sadami se šesti až šestnácti sériově zapojenými články.

Tabulka 9 – EMUS BMS mini, základní parametry

Rozsah článků	6s až 16s
Nabíjecí / vybíjecí proud	75 A / 75 A
Schopnost odpojení	150 A
Balancování	200 mA @ 4,2 V, disipativní
Komunikace	CAN, LIN, Bluetooth
Aplikace pro PC	Ano / vizualizační, konfigurační
Aktualizace firmwaru	Ano / uživatelská
Ochrany zátěže / nabíječky	Napět'ové, proudové, teplotní
Rozměry	118x79x21 mm



Obrázek 15 – EMUS BMS mini, elektronika

Nežádoucí vlastnosti:

- Nedostatky v ovládacím softwaru
- Centralizovaná periferie, nedá se (zatím) řetězit
- Nepřesné měření kapacity baterie (osciluje)

Po prvních pokusech testování se jednotka BMS nechová relevantně ke své funkci, především kvůli nedostatkům v ovládacím softwaru. Měření kapacity baterie je nepřesné. Procentuální vyjádření udávaného nabití baterie osciluje a ani vzdáleně neodpovídá stavu nabití baterie. Při připojování jednotky BMS k nabíječce Elcon pomocí sběrnice CAN se vyžaduje restartování BMS, jinak se nabíjení nezahájí. V aplikaci na zařízeních Android náhodně vyskakují upozornění na chyby (červený text v záhlaví aplikace).

2.3. LLT POWER BMS

Jedná se téměř o jednoúčelová zařízení s pevnou konfigurací článků definovanou z výroby. Při nákupu lze zvolit varianty 6s, 7s, 8s, 9s, 10s nastavitelné pro Li-Ion či Lifepo4 baterie s proudovým rozsahem od 20 A do 60A. Připojením k PC lze podrobně monitorovat stav článků, hodnoty SoC, SoH. Jednotka komunikuje skrze rozhraní UART, které může být převedeno na USB standart nebo Bluetooth komunikaci. Svými vlastnostmi a cenou je BMS jednotka zajímavou alternativou pro široké spektrum mobilních platforem, zejména pro třídy lehkých motocyklů. Výrobce dodává jednoduchý software jak pro Windows, tak pro Android / IOS zařízení.

Tabulka 10 – LLT POWER BMS, základní parametry

Rozsah článků	6s až 10s, fixně
Nabíjecí / vybíjecí proud	40 A / 60 A
Schopnost odpojení	70 A
Balancování	60 mA @ 4,2 V, disipativní
Komunikace	UART, Bluetooth
Aplikace pro PC	Ano / vizualizační, konfigurační
Aktualizace firmwaru	Ano / uživatelská
Ochrany zátěže / nabíječky	Napět'ové, proudové, teplotní
Rozměry	108x65x15 mm

Nežádoucí vlastnosti:

- (Volitelně) pevný počet článků, spínací ON/OFF konektor
- (Volitelně) pevně definovaná komunikace
- Velmi nízká hodnota balančních proudů
- Absence možnosti pokročilejší parametrizace
- Absence sběrnice CAN pro komunikaci s nabíječkou – nutné využití nabíječky s pevně nastaveným napětím a proudem



Obrázek 16 – LLT POWER BMS, elektronika

Produkty portfolia Smart BMS LLT POWER se objednávají s pevnou, později neměnnou konfigurací článků. Základní struktura elektroniky se na poptání doplňuje dodatečnou možností externího spouštěcího rozhraní (konektor ON/OFF tlačítka) a zvolenou komunikací. Běžné ochrany jsou samozřejmostí. Pro starší baterie s vyšší kapacitou, u kterých roste nesourodě vnitřní odpor článků, nemusí být balanční proud 60 mA @ 4,2 V dostačující. S početnějšími poptávkami nabízí výrobce možnost implementací specifických klientských požadavků.

2.4. Orion BMS (Original)

Testování jednotky probíhalo v praktických podmínkách využitím ve druhé generaci experimentálního univerzitního vozidla eŠus. Jednotka disponuje rozhraním CAN bus, po kterém lze přímo jednotkou BMS ovládat nabíječky a přenášet aktuální data o stavu baterie. Je podporován diagnostický protokol OBD2. Články jsou chráněny vůči přepětí, podpětí, nadproudu, nadměrné teplotě a podchlazení na základě naprogramovaných parametrů minimálních a maximálních hodnot v profilu baterie. Centralizovaná konstrukce poskytuje vysokou odolnost proti EMI a šumu.

Tabulka 11 – Orion BMS, základní parametry

Rozsah článků	120 až 180, fixně po 12 článcích
Nabíjecí / vybíjecí proud	200 / 500 / 750 / 1000 A
Schopnost odpojení	70 A
Balancování	200 mA @ 4,2 V, pasivní
Komunikace	2x CANBUS 2.0B
Aplikace pro PC	Ano / vizualizační, konfigurační
Ochrany zátěže / nabíječky	Napět'ové, proudové, teplotní
Rozměry	108x65x15 mm



Obrázek 17 – Orion BMS, elektronika

Nežádoucí vlastnosti:

- Absence dobíjecích standardů CHAdeMO a J1772
- Nutnost externího CANdapter modulu
- Velmi nízká hodnota balančních proudů
- Nízká citlivost při měření malých proudů
- Prodejní cena \$1,680

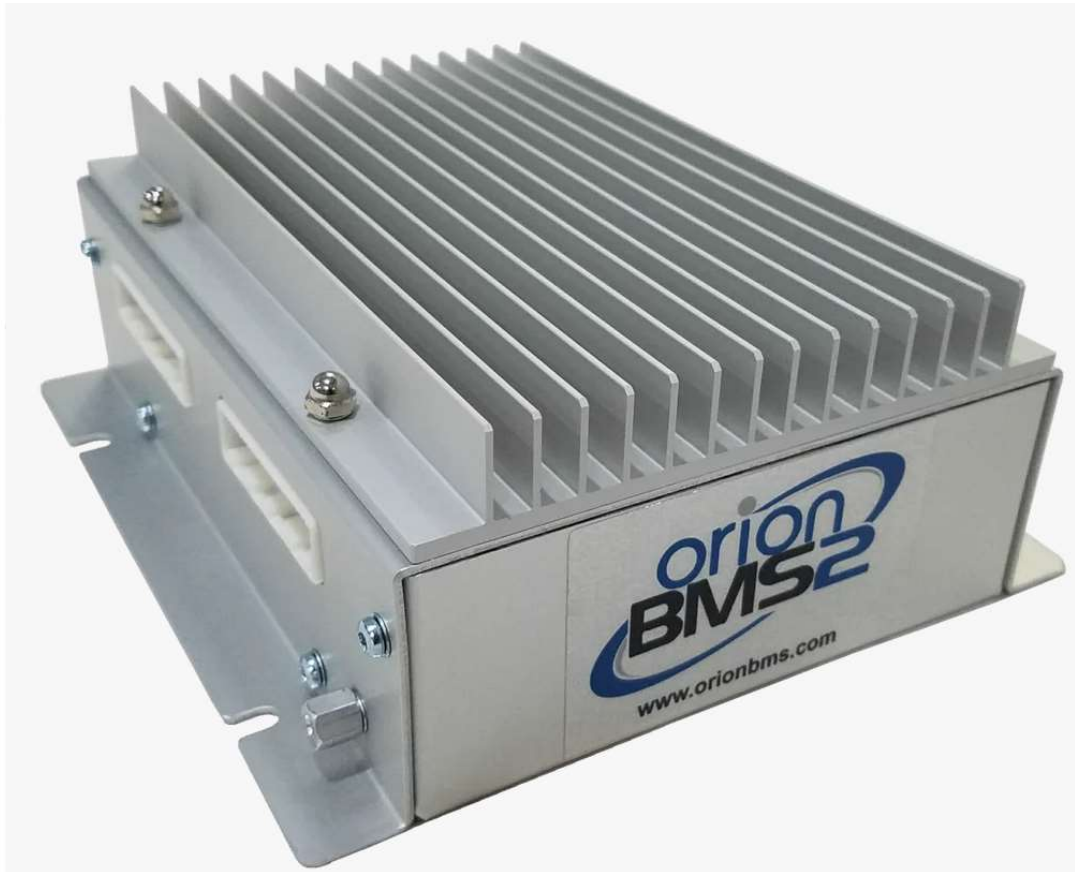
Starší generace BMS jednotky nemají implementovanou komunikaci s dobíjecími standardy CHAdeMO a J1772. Propojení rozhraní s počítačem vyžaduje dokoupení CANdapter modulu. Měření proudů zprostředkovávají externí senzory s volitelným rozsahem $\pm 200\text{A}$, $\pm 500\text{A}$, $\pm 750\text{A}$, $\pm 1000\text{A}$. Spotřebu v režimu spánku lze utlumit na minimum (v datasheetu μA bez hodnoty) a tím zamezit vybíjení baterie při jejím dlouhodobém skladování.



Obrázek 18 – Orion BMS, nezbytné periferie – proudový senzor, CANdapter

2.5. Orion BMS2

Novější verze jednotky v mnohém parametricky totožná předchozímu popisu, na TUL testovaná již ve třetí generaci experimentálního vozidla eŠus. BMS disponuje rozhraním CAN-Open a J1939, po kterém lze přímo ovládat externí nabíječky a v reálném čase standartně přenášet data o stavu baterie. Tato navazující generace implementuje, dříve chybějící, komunikaci s dobíjecími standardy CHAdeMO a J1772 skrze protokol ISO-15765 OBD2.



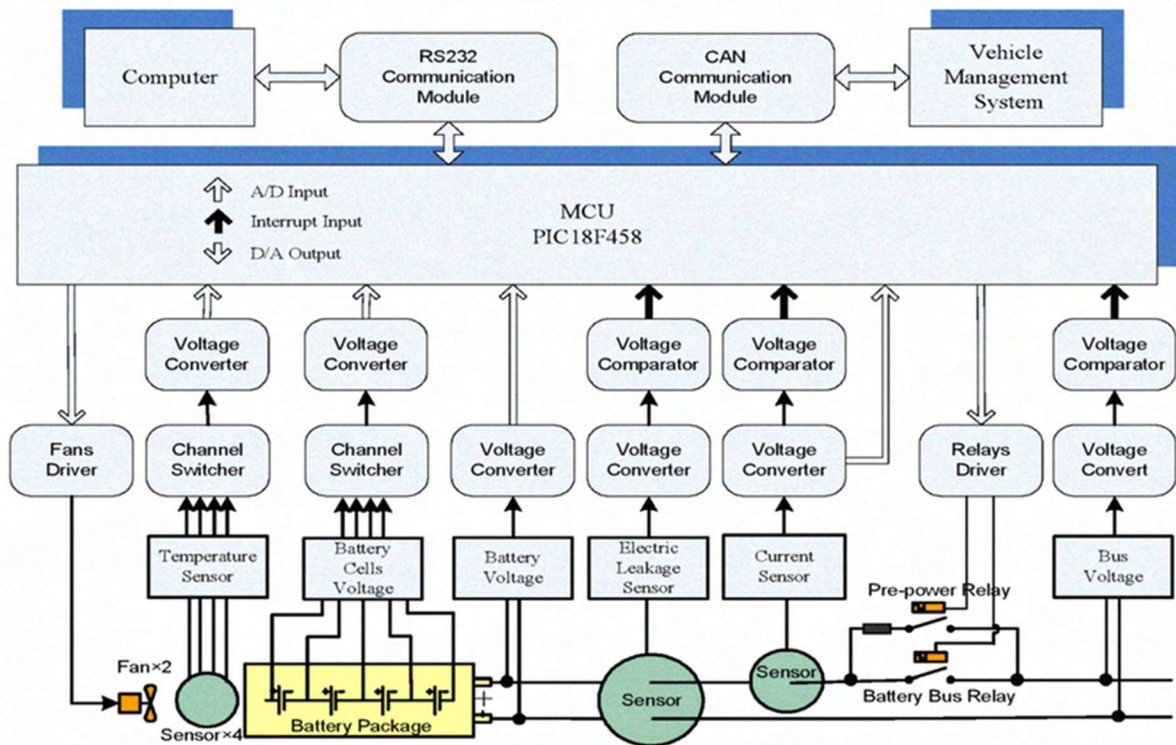
Obrázek 19 – Orion BMS2, elektronika

Nežádoucí vlastnosti:

- Nutnost externího CANdapter modulu
- Velmi nízká hodnota balančních proudů
- Nízká citlivost při měření malých proudů
- Prodejní cena \$1,680

3. Battery management systém (BMS)

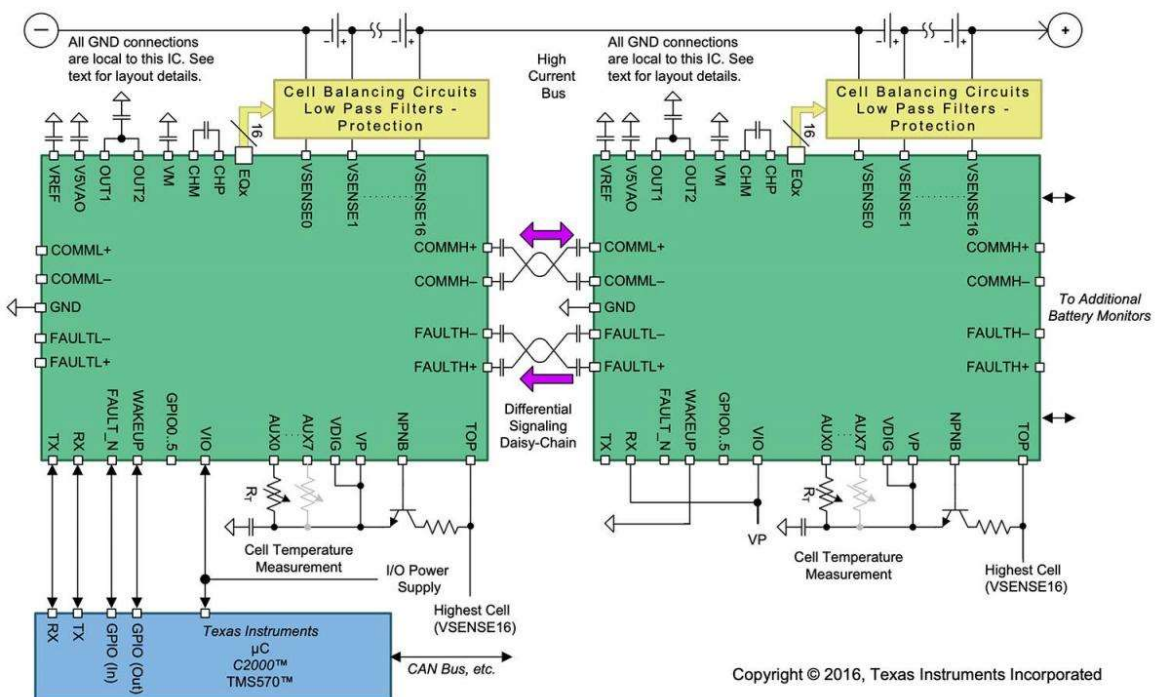
Battery management system (BMS) je specifický hardwarový systém vybavený softwarem, který v reálném čase monitoruje a řídí provozní podmínky baterie, čímž prodlužuje její životnost, zaručuje bezpečnost a poskytuje odhad zbývající hodnoty kapacity. Aby BMS plnila uvedené cíle, přistupuje v bateriovém celku k jednotlivým článkům separátně. Schopnost baterie ukládat energii postupně klesá po celou dobu její životnosti, indikátorem zhoršení oproti původní kapacitě je parametr State of Health (SoH). Zbývající životnost ať už v jednotkách času či počtu vybíjecích cyklů definuje anglická literatura jako Remaining Useful Life (RUL), dokud baterie nedosáhne konce své životnosti End of Life (EoL). Aby se zvýšila účinnost a bezpečnost baterie, musí být BMS velice spolehlivým a přesným zařízením, které z kontinuálně měřených elektrických i neelektrických hodnot dokáže předvídat SoC, SoH, RUL, kapacitu a výkon. Odhadovaný parametr SoC lze v BMS označit za jeden z nejdůležitějších, nicméně zjišťování jeho aktuální přesné hodnoty zůstává výzvou kvůli silným nelineárním a komplexním elektrochemickým reakcím v baterii a také vzhledem k průběžným procesům jejího stárnutí.



Obrázek 20 – Návaznost funkčních bloků BMS [18]

3.1. Topologie pokročilých systémů

Pojmem topologií BMS systémů lze klíčovat celou řadu různých konfigurací. U malých či méně vytěžovaných systémů dává smysl držet všechny důležité bloky pohromadě včetně přidružených periférií. U rozsáhlejších (průmyslových/automotive) systémů může být naopak určitá forma decentralizace žádaná až dokonce nutná. Systém správy baterií zajišťuje, aby byly při používání bezpečnější a efektivnější. Toho se dosahuje průběžným odečítáním důležitých zejména snadno zarušitelných analogových hodnot teploty a napětí jednotlivých článků. Modulární bateriové systémy plní povinnosti pro určitý počet bateriových článků samostatně a umisťují se k nim co nejbližže. Galvanicky oddělená komunikace skrze specifické obvody umožňuje řetězení významného počtu bloků a tedy i sestavování vysokonapětových baterií.

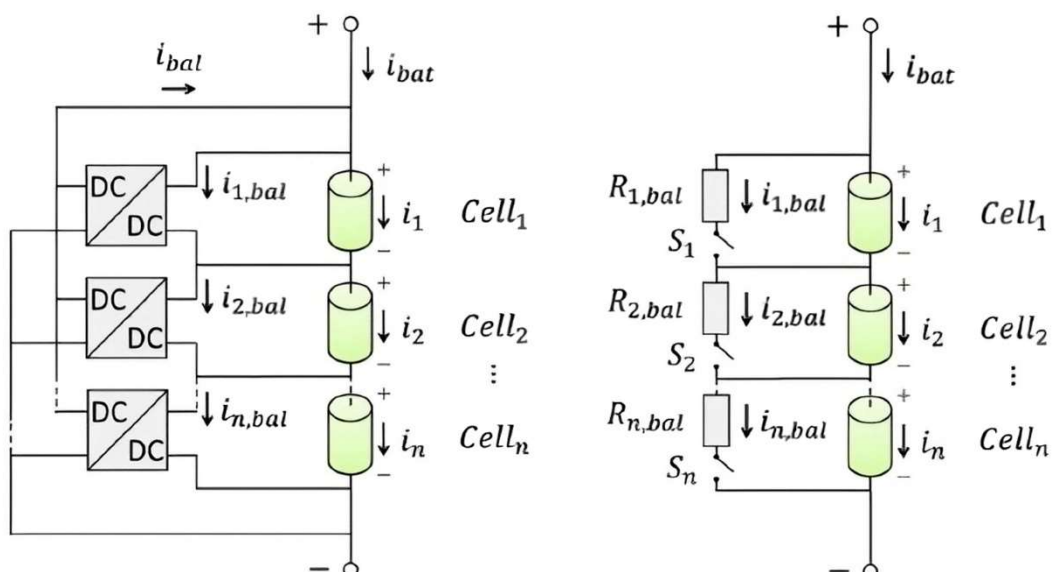


Obrázek 21 – Obvody decentralizované topologie BMS systému [19]

3.2. Technika balancování článků

Kromě monitorování řady parametrů bývá neoddělitelnou rolí BMS napěťové vyrovnávání (balancování) článků. Vzhledem k její kapacitě a využití se volí správná technika balancování a odpovídající hodnoty proudů. Pokud obvody nedokáží některé články baterie s určitou tolerancí v horních úvratích vyrovnat, nemůže pokračovat nabíjení ostatních. Při vybíjení pak navazuje opačná analogie. Napěťová ochrana zajistí ukončení procesu, aby žádný z článků nepřekročil mezní hodnoty.

Techniky balancování se využívají aktivní či pasivní. Aktivní cílí zejména na drahé bateriové bloky vysokých kapacit a jsou sestaveny z multiplexovaných DC/DC step-down měničů. Obecný princip vyvažování spočívá v efektivním přelévání energie ze silnějších článků do slabších. Druhým přístupem se nabízí pasivní balancování, výhodné pro všechny ostatní situace. Laciné řešení podporují dnes již všechny dostupné AFE BMS obvody a je založeno čistě na disipativních ztrátách. Články baterie jsou cyklicky měřeny a následně nejsilnější ohmicky zatěžovány, než dojde k poklesu jejich napětí do vymezených tolerancí. Integrované AFE obvody zvládají balanční proudy do 50 mA. Pro kapacitnější nebo starší baterie s rozdílně narůstajícím vnitřním odporem se obvody rozšiřují externími mosfety a uvolněné teplo se odvádí chladiči. Díky principu pasivních ztrát, tedy maření energie se provádí balancování pouze, je-li k dispozici externí zdroj energie – baterie se nabíjí / udržuje.



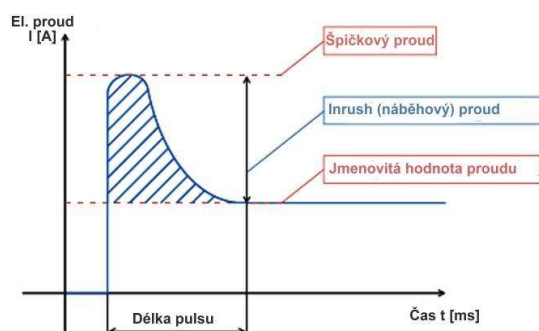
Obrázek 22 – Princip aktivního / pasivního balancování článků [20]

3.3. Obvody „PreCharge“ a „PreDisCharge“

Elektromechanické jevy na površích kontaktů výkonových spínacích prvků se liší v závislosti na charakteru zátěže, proudu, rychlosti sepnutí / odepnutí, dále na mechanických vlastnostech kontaktu jako je styčná plocha a využitý materiál. Stejnosemné zátěže, ve srovnání se střídavými zátěžemi, mívají povolené nižší hodnoty. Střídavý proud periodicky osciluje kolem nuly, zatímco stejnosměrný proud nikoliv, a proto se zapálený oblouk při odpínání hasí mnohem komplikovaněji. Obloukové výboje dosahují pro stejnosměrné obvody mnohem delších intervalů než pro střídavé. Z uvedených důvodů je důležité vnímat rozdíl mezi maximální spínací zátěží uváděnou pro střídavé a stejnosměrné zátěže. Mimo definované jmenovité hodnoty elektrického napětí a proudu zátěže jsou pro životnost mechanicky spínaných prvků důležité i dynamické přechodové jevy doprovázející spínání / odpínání zátěže. Ty bývají zvláště u indukčních nebo kapacitních zátěží mnohonásobně vyšší než pro ustálené jmenovité hodnoty. Při špatném dimenzování nebo chybném elektrickém ošetření v podobě „PreCharge“ obvodů snadno dochází ke zničení kontaktů nebo jejich spečení.

Spínání kapacitní zátěže

Kapacitní charakter zátěže se vyznačuje typickým průběhem volt-ampérové charakteristiky, kdy v okamžiku sepnutí elektrického napětí začne obvod odebírat velmi vysokou hodnotu elektrického proudu, který následně s časem rychle klesá. Okamžikem sepnutí kapacitní zátěže tak vzniká veliký proudový ráz, přesahující mnohonásobně nominální jmenovité hodnoty, typicky 20x až 40x. Při úplném vybití kapacity je v momentě sepnutí obvodu proud omezován pouze součtem parazitních elektrických odporů mezi kontakty a kapacitní zátěží – na vstupní straně je uvažován dostatečně tvrdý zdroj elektrické energie.



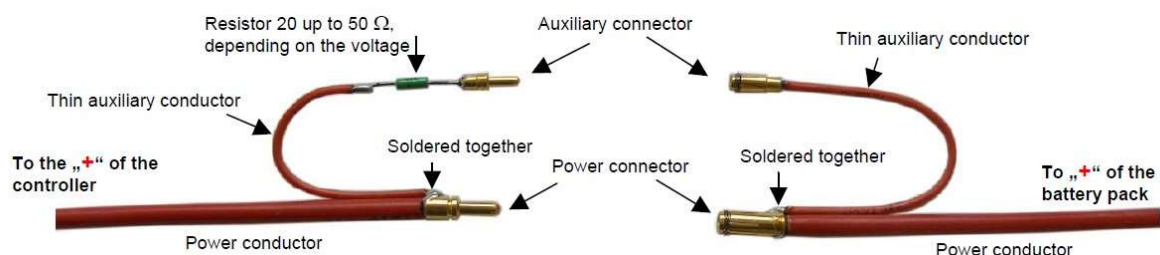
Obrázek 23 – Průběh spínání kapacitní zátěže

Spínání indukivní zátěže

Indukivní charakter zátěže působí oproti kapacitní zcela opačnými průběhy. Spínání napájecího napětí se z fyzikálního hlediska neprojevuje svým postupným náběhem proudu od malých hodnot až ke jmenovitým nijak agresivně. Problém nastává na opačné straně charakteristiky, při odpojování. Indukivní zátěž generuje dočasně na svých svorkách zápornou hodnotu napětí odpovídající zpětnému uvolnění naakumulované magnetické energie. Na vznik přepětí má vliv indukčnost cívky, rychlost a způsob odpojení. Zejména elektronicky rozpínané obvody bez adekvátních ochranných prvků proti přetížení (zpětně polarizovaných diod) vytvářejí špičkové přepětí řádově blížíci se až ke třicetinásobku hladiny napájecího napětí. V důsledku takto „vytažený oblouk“ výrazně opaluje spínací kontakty mechanického přerušovače a tím rostou pro pozdější spojení i přechodové odpory.

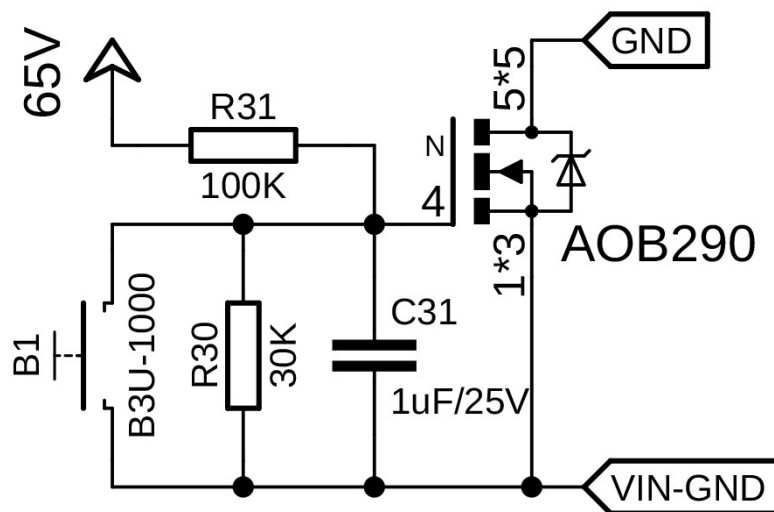
Bezjiskřící připojování

Bezjiskřící propojování anglicky známé pod „Antispark circuit“ je možno zajistit několika způsoby. Prvním z nich může být využití speciálního dvojitého konektoru, kde se slabým vodičem nejprve sepne obvod přes antispark rezistor (Auxiliary connector) a po rázovém nabytí kapacit se propojí silový konektor (Power connector). Uvedený mechanismus má ovšem význam pouze v klidovém stavu aplikace, kdy průměrný spotřebovávaný výkon nepřevyšuje distribuční možnosti „antispark rezistoru“. Pro menší aplikace existují i řešení zabudovaná v konektoru, například pod technickým označením XT90-S Antispark. Navenek se jedná o typické dvoubodové propojení, vycházející z populárního konektoru XT90 (je s ním samozřejmě i zpětně kompatibilní), které ovšem v sobě implementuje plnohodnotné prvky popsané bezjiskřicí ochranou.



Obrázek 24 – Bezjiskřící propojení [21]

Elektronickou alternativou, kdy není možné využití popsaného konektoru (například v situaci jednoduchého dvoupolohového přepínače) se nabízí schéma automatického samo-spouštěcího obvodu. Jeho funkce spočívá v plynulém exponenciálním náběhu napájecího napětí, zajištěného postupným otevíráním výkonového FETu. Přechodové spouštěcí pásmo definuje proud odporového děliče a zvolené kapacity kondenzátoru. Jeho tvar vykresluje průnik nabíjecí logaritmické charakteristiky s časovou konstantou τ a otevírací charakteristiky konkrétního spínacího prvku, tedy mosfetu AOB290L.



Obrázek 25 – Elektronický „antispark circuit“ s exponenciálním náběhem

3.4. Multirozsahové měření proudů

Multirozsahové měření proudu v rámci Battery Management System (BMS) zahrnuje metody a techniky pro kvantitativní analýzu elektrického proudu, který protéká lithium-iontovými nebo jinými typy akumulátorových baterií. Tato analýza je nezbytná pro sledování, řízení a optimalizaci výkonu baterie, což má klíčový význam pro její bezpečnost, životnost a odhady zbývající kapacity a stáří. Multirozsahové měření proudu zahrnuje použití senzorů s různými citlivostmi nebo rozsahy, aby bylo možné měřit proud v různých režimech a přizpůsobit se širokému spektru provozních podmínek se zachováním přesnosti měření. Sestavené obvodové řešení musí být schopno dynamicky reagovat na tři typy níže uvedených událostí. Stěžejní problematiku skrývá průnik výkonové robustnosti se zachováním multirozsahové přesnosti.

Měření nárazového proudu

Tato část analytického procesu se zaměřuje na detekci a kvantifikaci krátkodobých proudových špiček, které vznikají v reakci na rychlé změny zátěže nebo v průběhu specifických operací, případně potenciálních zkratů. Data jsou klíčová pro stanovení maximálního povoleného proudu spínacích prvků, distribuční sítě a ochrany baterie proti nadměrnému vybíjení, přetížení nebo přehřátí. Elektronická implementace funguje nejčastěji samostatně, pro minimalizaci provozních rizik do určité míry odděleně od nadřazených systémů. Tím jsou garantovány stabilní velmi rychlé odezvy v nízkých řádech μs .

Měření vysokého trvalého proudu

Celkový proud, který baterie spotřebovává nebo dodává v běžných provozních podmínkách pomáhá při stanovení energetického stavu baterie a jejím správném řízení. V případě vysokého zatížení k hranici měřitelného rozsahu se řeší tepelné dimenzování soustavy včetně přidružených senzorů. Navrhovaná BMS jednotka s AFE BQ79616 předpokládá provozní zatížitelnost 100 A, která se může efektivně zaznamenávat skrze Hall senzory a nebo odporovými bočníky s napěťovými převodníky. Při volbě Hall senzoru pro konkrétní aplikaci bývá důležité zvážit požadovanou citlivost, rozsah detekce a vliv prostředí, ve kterém bude senzor použit. U odporových bočnic dominuje proudová zatížitelnost, teplotní přesnost a možnosti chlazení.

Měření nízkého trvalého proudu

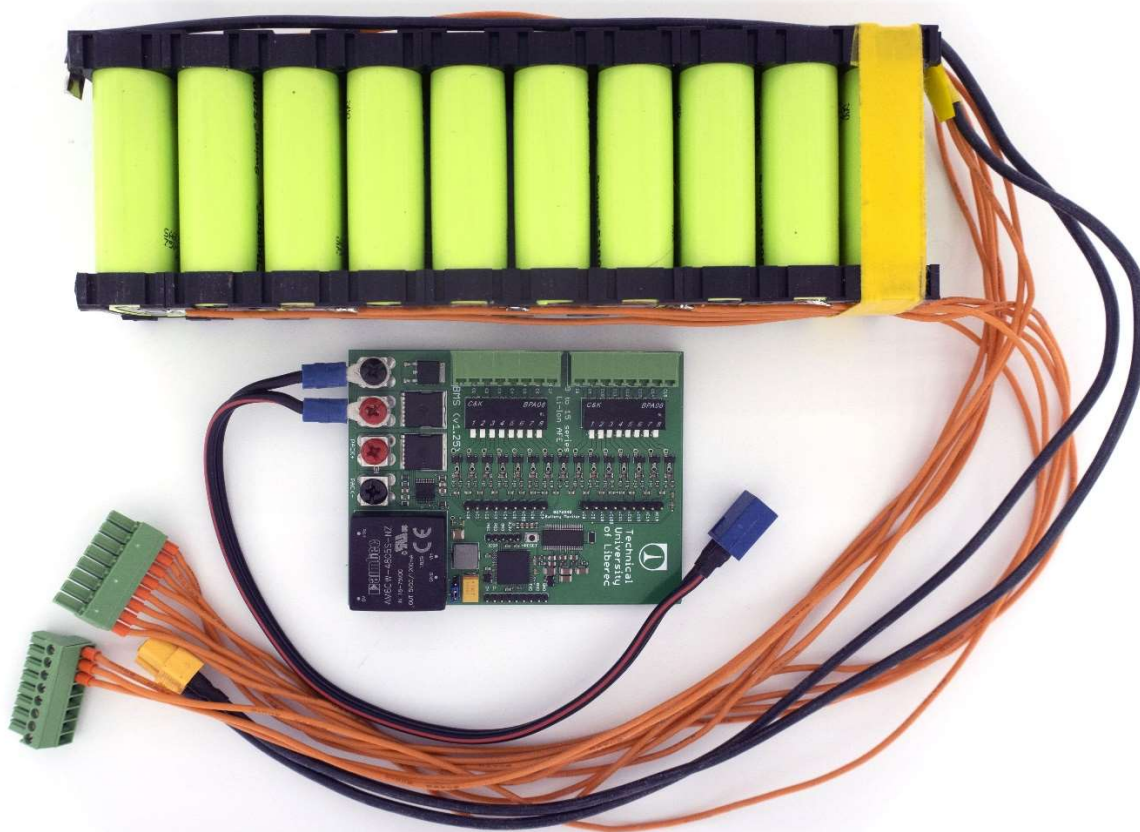
Opačná neméně důležitá problematika doprovází snímání nízkých trvalých proudů, které v dostatečném časovém horizontu mají také svůj vliv na změnu kapacity baterie. SoC algoritmy vycházející z časových integrací proudů potřebují ke správné identifikaci senzorickou citlivost dosahující řádově v mA. Předchozí uvedené nastavení nemůže mít dostatečnou rozlišovací schopnost. Pokrytí spektra pěti řádů nelze technicky zajistit Hall senzory ani s přepínatelnými rozsahy. Jedinou cestou tak zůstává nákladnější paralelní kaskáda výkonových, mosfety přepínatelných bočnic s elektronickými ochranami saturovaných kanálů. Analogový signál se přenáší skrze integrovaný obvod LTC2992.

3.5. Komunikační rozhraní

Výsledky měření provozních parametrů jsou často sdíleny s jinými subsystemy nebo zařízeními, jako jsou řídicí jednotky vozidla nebo systémy řízení energie. To umožňuje provádět okamžité interakce na základě aktuálního stavu baterie, což přispívá k její bezpečné a efektivní správě.

4. Vývoj elektroniky centralizované HW jednotky BMS

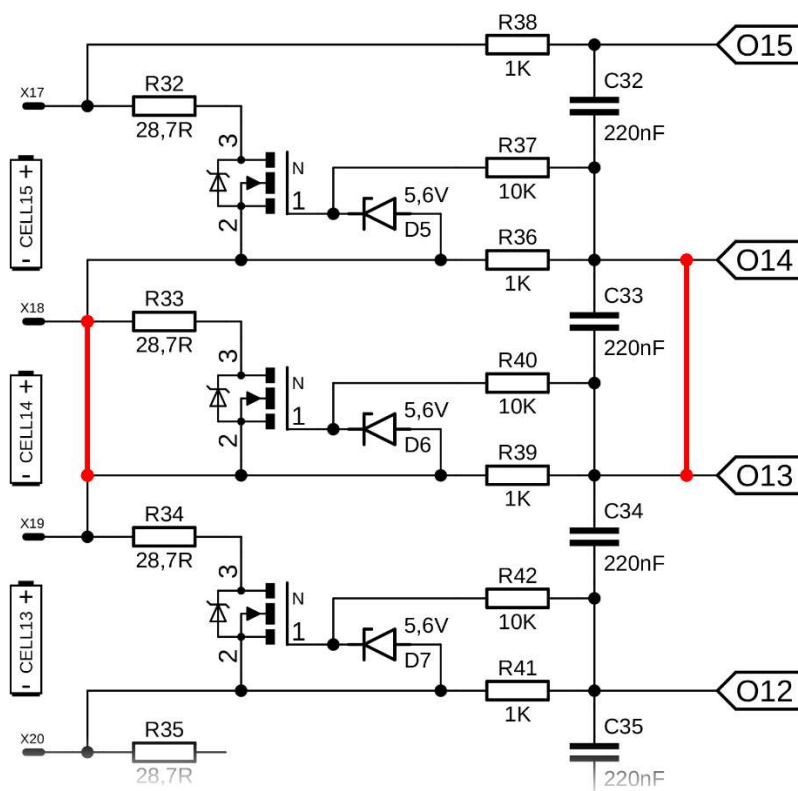
Existuje mnoho různých přístupů k návrhům elektroniky BMS v závislosti na specifických požadavcích koncových aplikací, nicméně většina z nich se zaměřuje právě pouze na funkce balancování článků a zmíněné odhady SoC. Nepatrné množství z nich pak prezentuje výzkum týkající se BMS z globálnějšího pohledu, který zobrazuje celý návrh distribuované struktury pro dosažení lepší modularity a přenositelnosti. V elektronických vozidlech postupně sílí trend směřovat BMS k návrhu inteligentních systémů, které zahrnují oblasti výzkumu umělé inteligence používané pro odhad zbývající kapacity baterie. Adaptivní a prediktivní BMS založené na heuristických modelech jsou zvláště důležité pro velké akumulátory v aplikacích elektrických vozidel a do budoucna v inteligentních sítích. V odborných textech se lze setkat s návrhy BMS na základě sedmého řádu pro model s jednoduchou baterií s difúzním elektrolytem a teplotně závislými parametry, které využívají interakci odezvy lithium-iontového článku s teplotou, přičemž úsilí zaměřují na přesný odhad SoC.



Obrázek 26 – Centralizovaná BMS jednotka, AFE BQ76940

4.1. Bateriové rozhraní BQ76940

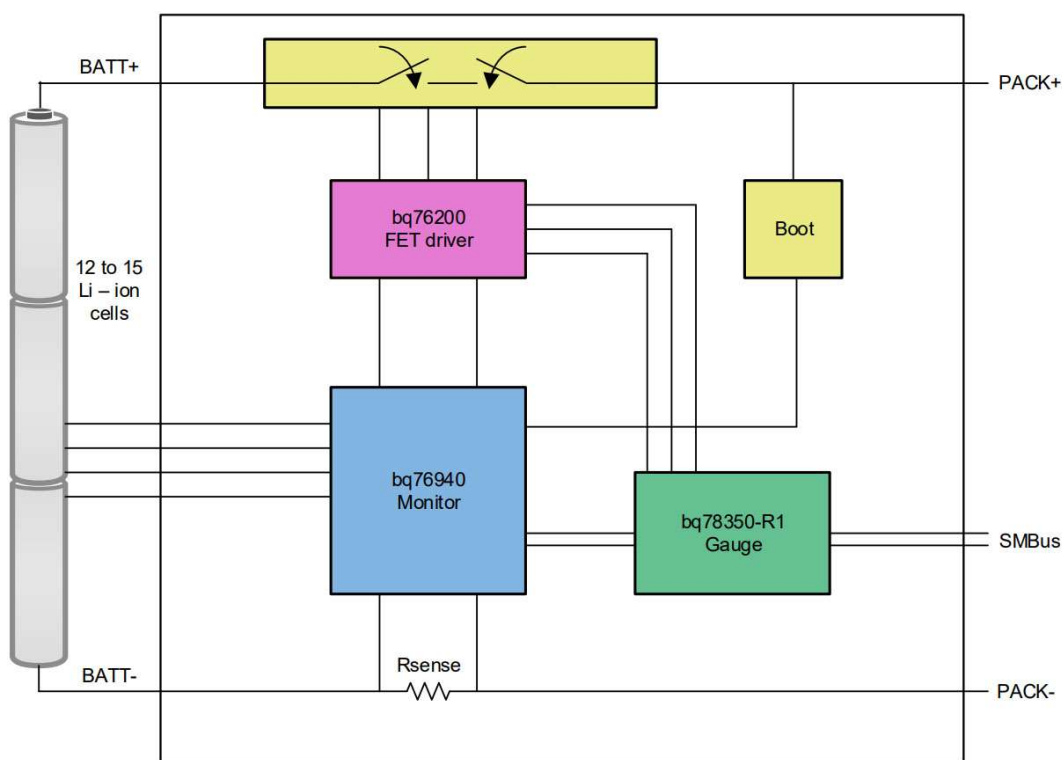
Integrovaný AFE obvod BQ76940 první verze vlastní vyvíjené BMS poskytuje podporu pro separátní obsluhu devíti až patnácti sériově řazených Li-Ion článků a zahrnuje měření proudu a další přidružené ochrany. Pro větší systémy baterií se nabízí určitý omezený způsob modulárního řetězení, které ale pro experimentální aplikaci ověřující teoretické funkcionality není nutné. Naopak nižší bateriové konfigurace lze dosáhnout propojením vstupů příslušných pinů rozhraní, jak je uvedeno na *Obrázek 27*. Obrázek vystihuje konfiguraci elektroniky s plným rozsahem patnácti článků a naznačeným aktivním filtrem pro čtrnáctý (například vadný) článek. Výstup filtru je zkratován pomocí propojky, která zajistí, že článek nebude dále využíván. Poškodí-li se způsobem, který vede k nadměrnému nárůstu vnitřního odporu, je nutné takový článek externě přemostit aby nezhoršoval vlastnosti celé baterie. Technika snižování počtu článků baterie může být analogicky využita i na ostatní chybějící či s průběhem času nefunkční články. Při osazování BMS elektronickými součástkami bývá často už i předem definována funkční aplikace s bateriovou konfigurací pro kterou je určena. Omezení počtu článků se v těchto případech typicky provádí elementárně na hardwarové úrovni.



Obrázek 27 – Konfigurace předřazených balančních obvodů

4.2. Obvod dohledu BQ78350

Obvod dohledu BQ78350 implementuje ochranu na základě přijatých dat a parametrů nastavených ve své datové paměti Flash. Integrovaný obvod vypočítává na základě kalibrovaných hodnot limity pro přepětí článků (Cell Overvoltage – COV), podpětí článků (Cell Undervoltage – CUV), nabíjecí nadproud (Overcurrent Charge – OCC), vybíjecí nadproud (Overcurrent Discharge – OCD), přehřátí (Overtemperature – OT) a podchlazení (Undertemperature – UT). Hardwarové limity pro BQ76940 mají tovární kalibraci a jsou konfigurovány parametricky. Ochrana proti zkratu (Short-Circuit Discharge protection – SCD) využívá rychlé proudové komparátory, které jsou zároveň i ochranou proti přetížení (OCD). Obvod BQ78350 komunikuje s nadřazenou procesorovou jednotkou skrze sběrnici SMBus s definovanou datovou strukturou.

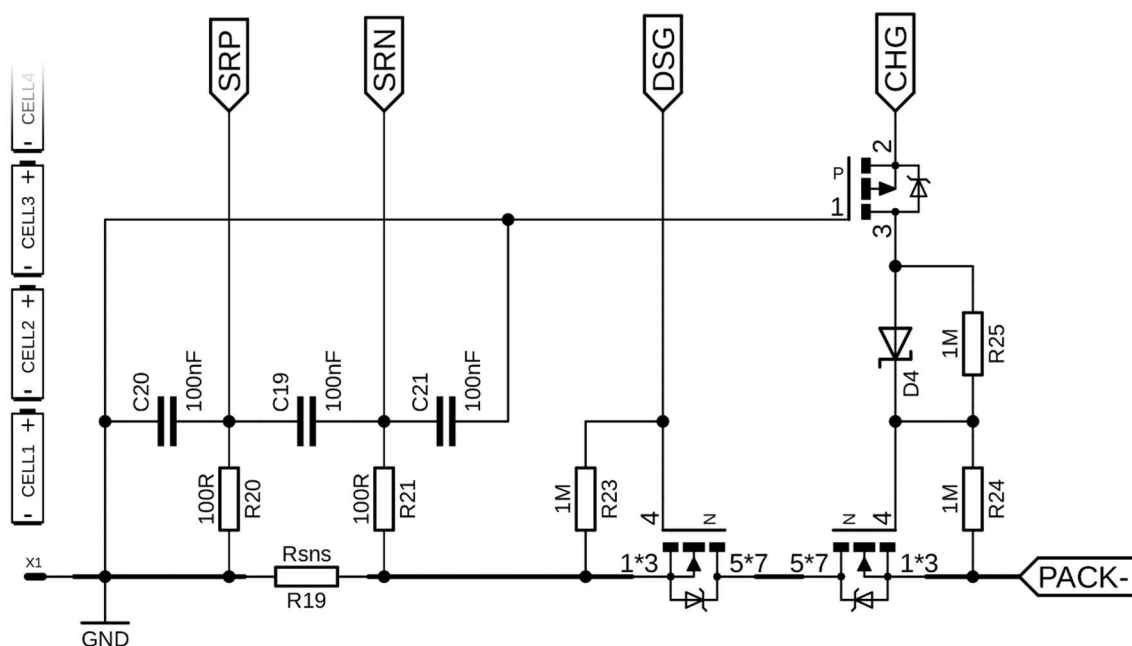


Obrázek 29 – Bloková návaznost obvodů řady BQ // Zdroj: <http://www.ti.com>

4.3. Zapojení obvodu „PreCharge“

Napájecí napětí 14s Li-Ion článků (lithium-cobalt-oxide s uhlíkovou anodou) kolísá v rozmezí od 42 až do 58,8 V (mínus ztráty na konektorech při maximálním zatížení, antispark obvodu, vedení, zvlnění) což výběr mosfetů do jisté míry omezuje. Při řízení

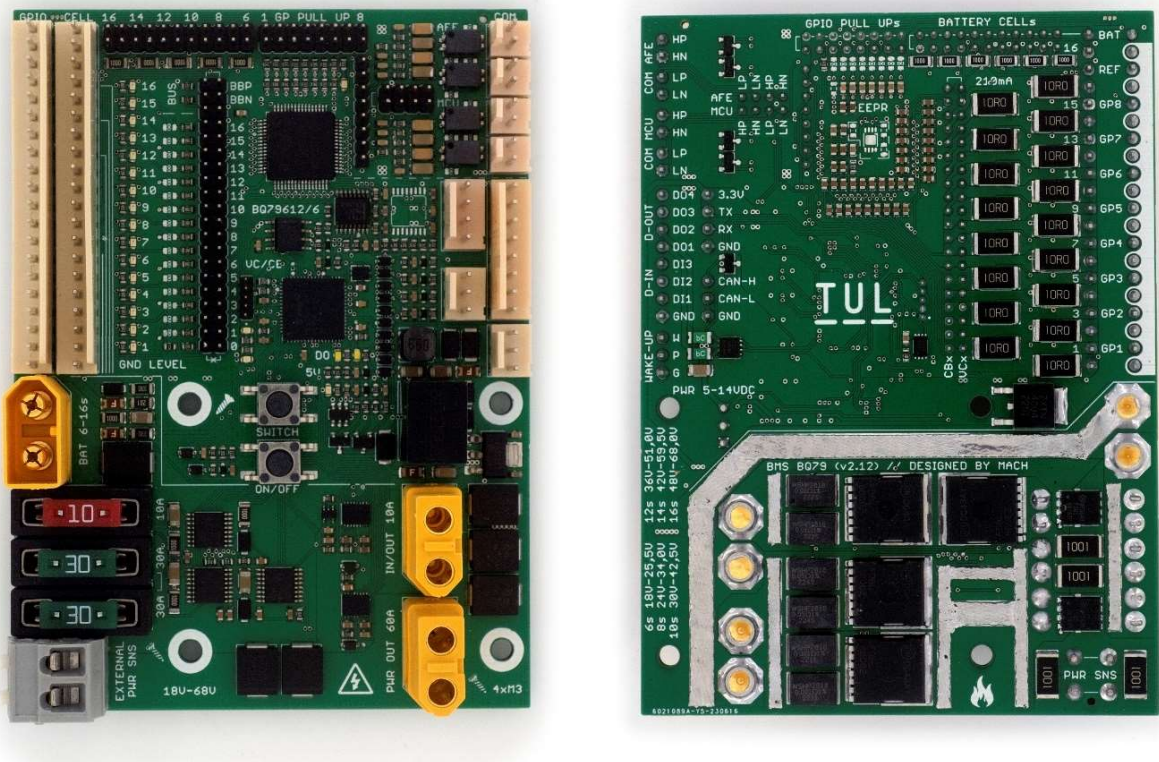
proudově silových obvodů je velmi nutné, aby se otvíraly strmě s maximálním potlačením dynamických dějů a tím se minimalizoval jejich vnitřní odpor $R_{DS(ON)}$. Parametricky nejlépe vycházejí AOB290. Tyto unipolární tranzistory s indukovaným N kanálem snesou při $U_{GS} = 10\text{ V}$, $T_C < 100^\circ\text{C}$ trvalý spínací proud $I_D = 140\text{ A}$, který s vnitřním odporem $R_{DS(ON)} < 3,2\text{ m}\Omega$ generuje tepelné ztráty $P_D = 62\text{ W}$. Maximální pulzní proud je pak limitován, při dokonalém chlazení, na $I_{DM} = 500\text{ A}$ pro každý spínací prvek. Svorkové napětí U_{DS} (Drain-Source Voltage) výrobce uvádí 100 V . Pracovní rozsah polovodičových prvků se pohybuje v rozmezí $T_j = -55^\circ\text{C}$ až 175°C . Vnější pouzdro TO-263 (D2PAK) s vnitřním tepelným odporem $R_{\theta JA} = 12\text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ je nezbytné při maximálním zatížení aktivně chladit. V praxi bývá výhodnější v tepelně namáhaných aplikacích snížit tepelný spád řetězce rozložením na větší aktivní plochu, respektive typicky na více totožných aktivních prvků pracujících vzájemně paralelně.



Obrázek 30 – Výkonové spínání proudu se snímáním hodnot pomocí bočníku R_{SNS}

5. Vývoj elektroniky decentralizované HW jednotky BMS

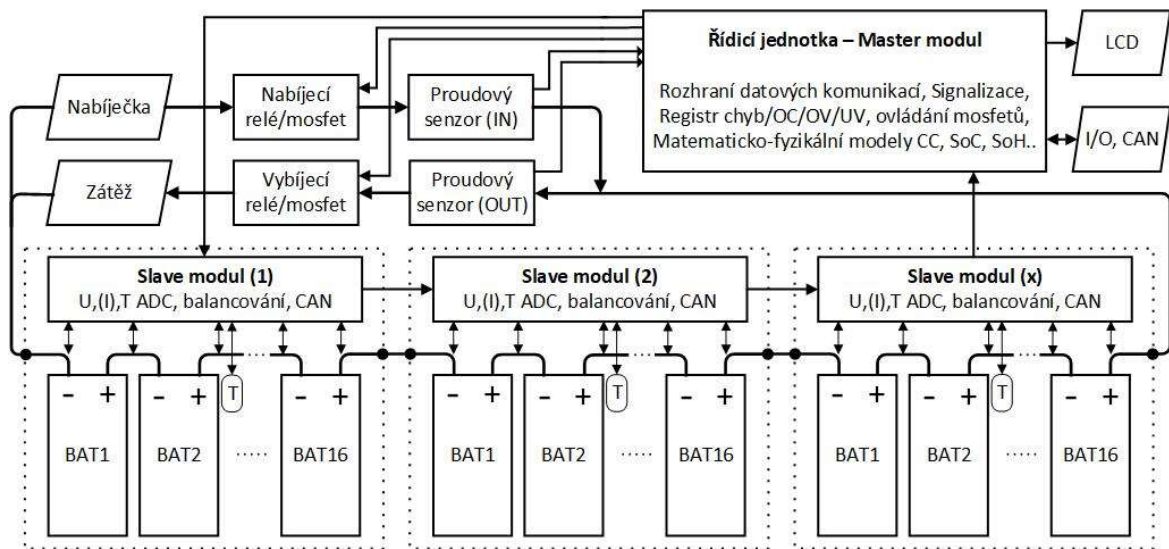
Přesměrování k vývoji vlastních decentralizovaných jednotek BMS s předchozími zkušenostmi motivuje zejména získání projektu víceletého operačního programu pro výzkum, vývoj a vzdělání MŠMT. V rámci AnteTUL – Elektromobilita se začal rozvíjet pod výzkumným ústavem CxI Technické univerzity v Liberci obsáhlý projekt Modulární platforma pro autonomní podvozky specializovaných elektrovozidel pro dopravu nákladu a zařízení.



Obrázek 31 – Decentralizovatelná BMS jednotka, AFE BQ79616

Pro elektrické platformy jsou trakční baterie hlavním zdrojem energie a jejich možnosti ovlivňují výkon a výdrž vozidla. Při výběru konkrétních článků baterie je třeba vzít v úvahu mnoho faktorů, mezi které patří z popsanych technologií schopnost rychlého dobíjení, vysoká hustota energie, vysoká úroveň bezpečnosti a spolehlivosti při cyklickém používání, dlouhá životnost s nízkou pořizovací / udržovací cenou. BMS vypočítává, kolik energie zbývá v baterii, na základě napětí, proudu, teplotních driftů ale také v závislosti na korelaci parametrů se zvolenou chemií. Stav nabití, poměr okamžité kapacity baterie k celkově dosažitelné kapacitě, se nazývá SoC a zobrazuje se v procentech. Průběh napětí v oblasti

jmenovitého napětí Li-Ion článku je podle *Obrázek 38* téměř konstantní a jeho hodnota (~3,6 V) vychází ze zvoleného chemického složení. Udržení žádané přesnosti odhadu SoC dále ztěžuje nerovnoměrné stárnutí baterie vlivem namáhání. Řešením větších systémů proto může být decentralizované oddělení senzorů a vytvoření lokálních „slave“ jednotek, udržujících trvalou vazbu s přidělenými články.

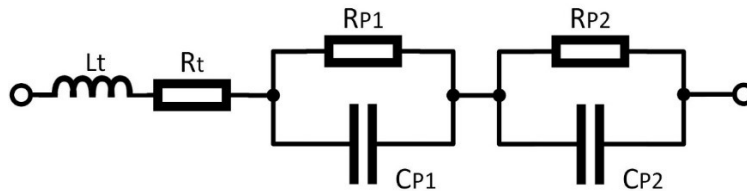


Obrázek 32 – Bloková decentralizace na Master a Slave moduly

Rozsah řešení vlastní vyvinuté podstatně univerzálnější HW jednotky shrnuje všechny dosud získané zkušenosti a respektuje budoucí požadavky. Pro účely disertační práce se jedná především o velmi robustní samostatně plnohodnotný systém, zprostředkovávající rozhraní mezi jednotlivými články baterie a implementací obsáhlejších matematicko-fyzikálních simulačních modelů. Přímou na úrovni vybraného AFE obvodu BQ79616 se již nacházejí integrované hardwarové akcelerátory post-ADC převodníků s dolní propustí umožňující filtrovaného měření napětí. Tím se zajišťuje přesnější kvantifikace hodnot pro pozdější zpracování a výpočet stavu nabití (SoC). Data mohou být využity lokálně ve 32-bit MCU PIC32MZ2048EFH064 s optimalizovaným výpočetním výkonem až 415 DMIPS a nebo přeneseny v decentralizovaných strukturách skrze galvanicky oddělené komunikace do dalších jednotek, případně do vyčleněného Master modulu.

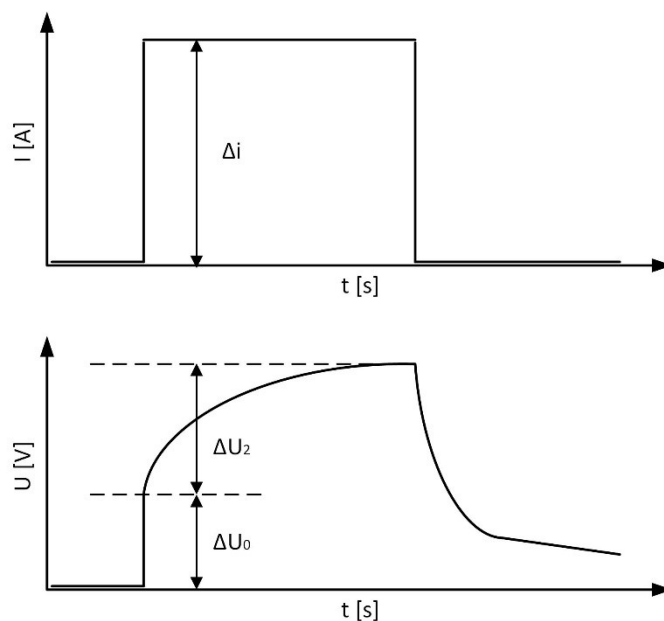
6. Matematické modelování dynamických vlastností Li-Ion

Popis reálného elektrochemického systému během matematického modelování nahrazují zjednodušené elektrické obvody se známými parametry. Přesnost výstupních dat a průběžné chování simulací stupňuje složitost modelu. V praxi se nejčastěji ekvivalentní elektrický obvod interpretuje následujícím schématem:



Obrázek 33 – Náhradní elektrický obvod

Základní schéma obsahuje tři členy vystihující klíčové elektrochemické parametry baterie. První odpovídá klasickému ohmickému odporu (R_t). Druhý člen znázorňuje rychlé průběhy přechodového děje způsobeného změnami koncentrací elektrolytu na rozhraní elektrod. Proud je v elektrickém obvodu moderován koncentračně polarizačním odporem R_{P1} a koncentračně polarizačním kondenzátorem C_{P1} . Třetí člen zastupuje naopak trvalejší a zároveň pomalejší přechodové děje týkající se difuze iontů mezi elektrodami a elektrolytem. Společnou simulační odezvu na jednotkový skok doplňuje v náhradním schématu polarizační paralelní kombinace R_{P2} / C_{P2} .



Obrázek 34 – Závislost napětí a proudu při nabíjení

$$\Delta U_0 = R_0 * \Delta I \quad (6.1)$$

$$\Delta U_2 = \Delta I * R_{P2} * \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{P2}C_{P2}}}\right) \quad (6.2)$$

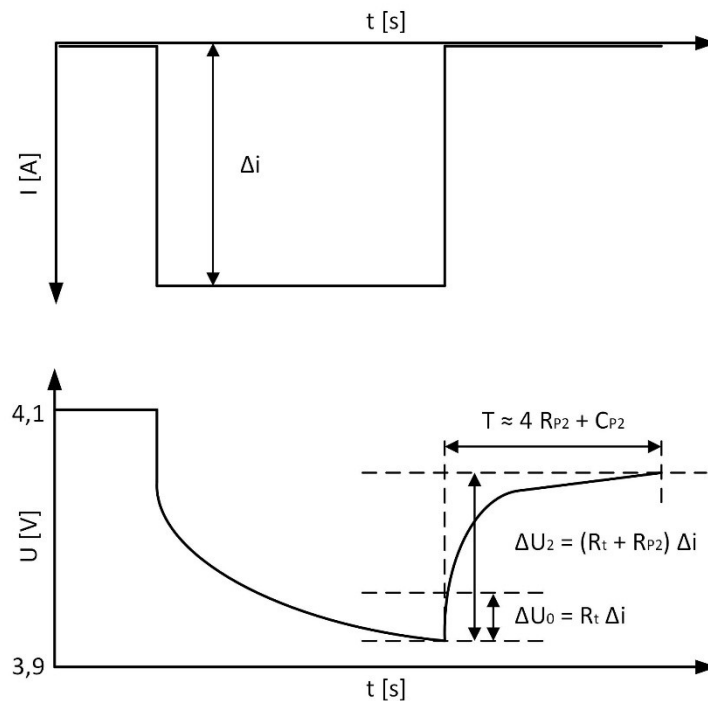
Vynecháme-li krátké časové konstanty zjednodušením modelu o přechodové koncentračně polarizační členy R_{P1} / C_{P1} , můžeme na základě změřeného průběhu napětí sestavit následující rovnice a dopočítat potřebné parametry.

$$R_t = \frac{\Delta U_0}{\Delta I} \quad (6.3)$$

$$\tau = \frac{T}{4} \quad (6.4)$$

$$R_t + R_{P2} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I} \quad (6.5)$$

$$C_{P2} = \frac{\tau}{R_{P2}} \quad (6.6)$$



Obrázek 35 – Závislost napětí a proudu při vybíjení

6.1. Obecné matematické modelování

Obecný matematický model baterie promítá vztahy mezi vnějšími charakteristikami a vnitřními stavy baterie. Aby bylo možné použít metody pro odhad SoC, je nejprve zapotřebí získat model článku ve formě diskrétního stavového prostoru:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (6.7)$$

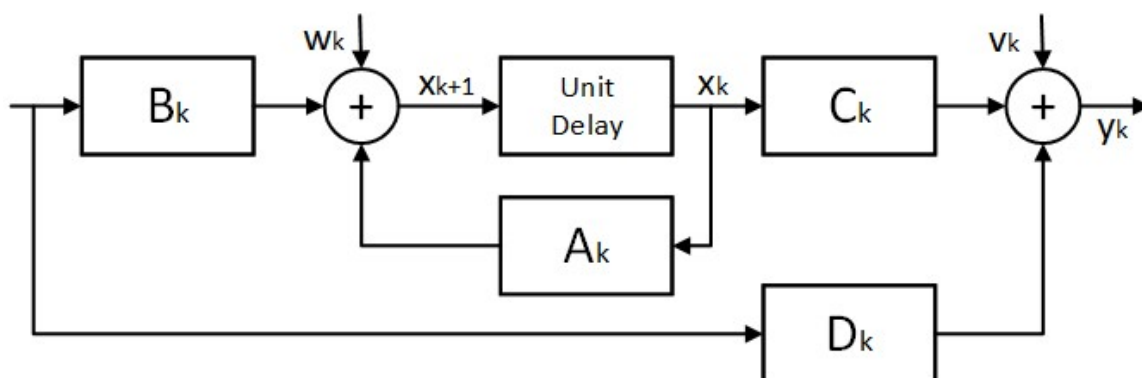
$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \quad (6.8)$$

kde $x_k \in R^n$ je vektor stavu systému s indexem diskrétního času k . Vektor $u_k \in R^p$ je měřený vstup exogenního systému a známý deterministický vstup v čase k . $w_k \in R^n$ definuje neměnný stochastický „procesní šum“, který ovlivňuje stav systému. Výstup systému $y_k \in R^m$ se získává lineární kombinací vztahů a vstupů plus $v_k \in R^m$, který modeluje šum a ovlivňuje měření výstupu systému bez paměti, ale neovlivňuje systémový stav. Pokud je potřeba v modelu zohlednit nelineární komponenty systému, lze model vyjádřit následujícím způsobem:

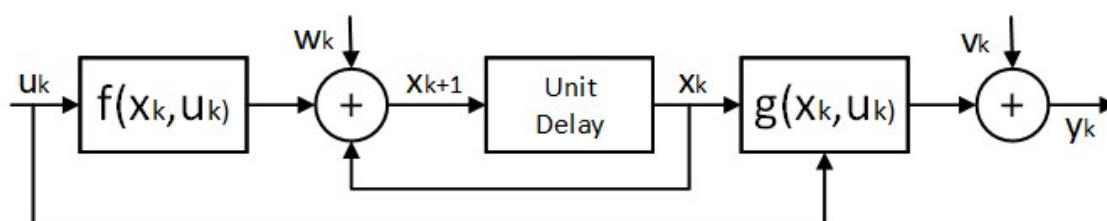
$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (6.9)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k \quad (6.10)$$

Uvedené modelové rovnice (6.7) a (6.10) aktualizují svůj vlastní stav a výstupní hodnoty na základě svého vstupu. Rovnice (6.7) a (6.9) se nazývají „systémové rovnice“ a zachycují vyvíjející se systémovou dynamiku, tedy stabilitu systému, dynamickou ovladatelnost a citlivost na rušení. Rovnice (6.8) a (6.10) se nazývají „měřicí rovnice“, zatímco matice $A_k \in R^{n \times n}$, $B_k \in R^{n \times p}$, $C_k \in R^{m \times n}$, $D_k \in R^{m \times p}$ popisují dynamiku systému a mohou se časově měnit v závislosti na konkrétní použité technice modelu baterie. Funkce $f(x_k, u_k)$ a $g(x_k, u_k)$ také popisují dynamiku systému a jsou nelineárními funkcemi specifikovanými konkrétní použitou technikou modelu baterie. Každá konkrétní technika modelu baterie předepisuje odhady parametrů, které nemusí být přímo měřeny. Rovnice (6.7) a (6.8) jsou znázorněny v blokovém schématu na *Obrázek 36* a pro nelineární případ jsou rovnice (6.9) a (6.10) zobrazeny v blokovém schématu na *Obrázek 37*.



Obrázek 36 – Lineární systém diskretního času z rovnic (6.7) a (6.8)



Obrázek 37 – Nelineární systém diskretního času z rovnic (6.9) a (6.10)

Běžně používané techniky modelu bateriových článků, které vyhovují rovnicím (6.7) a (6.10), jsou převážně modely elektrochemického a elektrického obvodu. Elektrochemické modely jsou vhodné pro předpovídání veličin na makroskopické i mikroskopické úrovni, ale tyto modely mají vysokou výpočetní složitost, což představuje potíže při získávání parametrů, a rovnice lze vyřešit pouze pomocí speciálního softwaru. Ekvivalentní model elektrického obvodu (ECM) založený na vnějších dynamických charakteristikách může simulovat pracovní vlastnosti různých druhů baterií, čímž se zabrání podrobným výpočtům vnitřních elektrochemických procesů. Tento přehled ukazuje, že ECM se běžně používá jako základ pro odhad SoC, zejména ECM založené na odporu a kapacitě (RC), který se skládá ze zdrojů napětí, rezistorů a kondenzátorů pro vytvoření obvodové sítě.

Aby bylo možné sestavit baterii a poskytnout energii, která splní požadavky aplikace jako je inteligentní síť nebo EV, bývají stovky samostatných článků spojovány sérioparalelně, což zahrnuje celý model baterie. Princip podobnosti nelze jednoduše

implementovat z jednoho článku do akumulátoru kvůli nekonzistenci článků a vlivům mechanické integrity. Pokud vezmeme v úvahu nekonzistence článků, je žádoucí popisovat každý jednotlivý článek s jeho jedinečným ECM a parametry. Experimentování s každým jednotlivým článkem však vyžaduje čas, aby vzešel přesný ECM a kompletní model pro velký počet článků by se stal významně složitým. Jiným přístupem lze využít Theveninův elektronický obvodový model pro každý jednotlivý článek v poli více než 90 sériově propojených článků a tento model se používá k identifikaci vnitřního odporu každého článku. Podobně je řešením Theveninův model se dvěma různými větvemi pro nabíjení a vybití v zapojení do série nkrát, aby představoval n článků v sérii připojených baterií.

6.2. Metody pro odhad SoC

Odhad stavu nabití baterie (State-of-charge) je nejdůležitějším aspektem v systému správy baterií, který je jednou z klíčových vlastností vyšších tříd BMS systémů využívaných zejména v bateriově poháněných elektrických vozidlech. Parametr SoC představuje dostupnou kapacitu baterie, se kterou lze aktivně pracovat, aniž by došlo k podvybití nebo naopak přebití článků a tím zároveň optimalizuje její životnost. Pro návrh odhadu SoC existuje mnoho různých metod, nicméně jejich klasifikace není snadná, neboť většina přístupů vychází z kombinací dvou nebo více metod a zahrnuje řadu heuristických nebo deterministických matematických nástrojů. V praxi lze celkem úspěšně vycházet i z kombinací metod měření napětí nezátíženého obvodu (Open Circuit Voltage – OCV) a počítání Coulombova náboje (Coulomb Counting – CC). Pro tyto metody je běžné, že svůj počáteční odhad korigují kontinuálně během přenosu energie, protože mohou trpět určitými nepřesnostmi. Existují kombinace metod OCV algoritmů a detektorů dynamického zatížení s klíčovou funkcí metody CC rozšířenou algoritmem Kalmanova filtru. Tyto kombinace vybočují z klasického spektra třídění metod a proto jsou odborně navrhovány dvě nové reprezentativní kategorie přímého a nepřímého odhadu SoC s podkategoriemi shrnujícími aktuální vývojové trendy.

6.3. Přímé metody – počítání Coulombova náboje (CC)

Počítání Coulombova náboje (Coulomb Counting – CC) se v průmyslu standardizuje jako vypovídající metoda pro odhad SoC. V současné době se jedná o nejpoužívanější

metodu, která je obecněji ze značení galvanických článků známa pod jednotkou ampérhodin (Ah). Metoda CC definuje parametr SoC integrálně:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^{t_0+t} I_{cell}(d\tau) \times 100\% \quad (6.11)$$

kde $SoC(t_0)$ je počáteční hodnota SoC, C_n nominální kapacita a I_{cell} hodnota průchodu proudu vybíjecího či nabíjecího. Počítání Coulombova náboje probíhá pomocí časového integrálu vybíjecího a nabíjecího proudu, kde je nutná znalost SoC. Metoda CC je implementačně a výpočetně jednoduchá, nicméně nese si sebou problémy vycházející z nepřesné počáteční hodnoty a trvalé kumulace chyb. Chyby senzorů, šum, široké rozlišení se zaokrouhlováním a další ať už snímací či výpočetní faktory vedou k postupné ztrátě přesnosti, takže podpůrné algoritmy jsou nezbytné. Počáteční hodnota SoC nemusí být v praxi většinou ani známa a korektně ji definovat můžeme pouze tehdy, pokud se nachází systém baterií v termodynamické rovnováze. Pokud je počáteční hodnota SoC nepřesná, ovlivňují se postupně všechny navazující odhady a výpočet přestává odpovídat skutečným hodnotám. Přestože metoda CC zůstává v návrhových systémech velice populární, bývá pro přesnější odhad SoC v kombinaci doplňována jinými technikami.

6.4. Přímé metody – Otevřený napěťový obvod (OCV)

Metody odhadu SoC založené na měření napětí na otevřeném obvodu ukládají charakteristické hodnoty OCV křivky, typicky v podobě look-up tabulek. Inverzní přístupy interpolují hodnoty pro získání hladkých průběhů nebo využívají modely článků.

$$SoC = f^{-1}(OCV) \quad (6.12)$$

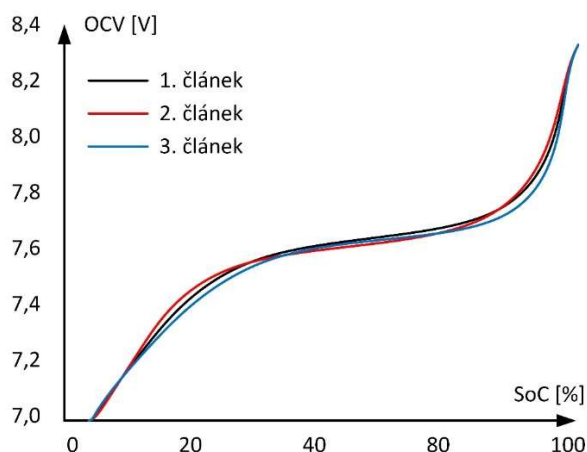
Metoda OCV průběžně měří dílčí napětí článků, která se následně komparují s definovanou tabulkou. Konkrétním hodnotám OCV odpovídají předpočítané hodnoty SoC. Tato metoda má v praktických aplikacích nároky na zvýšenou přesnost rozlišení senzorů a je zapotřebí dostatečného času pro ustálení. Metoda OCV dokáže vracet velmi přesné hodnoty stavu nabití akumulátoru, nicméně vzhledem ke zmíněnému

časovému požadavku pro ustálení chemických reakcí nelze využívat v reálném čase. Vztah OCV – SoC se liší i mezi jednotlivými články, a proto metoda nesmí vnímat baterii jako jeden celek a hodnota se musí přepočítávat pro každý článek individuálně. Metoda OCV se spolu s dalšími adaptivními metodami používá při filtrování šumu k počáteční kalibraci metody CC.

Abychom pochopili, proč křivku OCV – SoC nelze použít přímo k odhadu SoC, musíme analyzovat *Obrázek 38*, který byl získán z experimentálních dat. Tento obrázek zobrazuje několik křivek získaných při různých procesech nabíjení pro 2s Li–Ion baterii. Na obrázku je vidět, že s rostoucím množstvím nabíjecího proudu v každém cyklu se křivka posune nahoru. Toto chování poskytuje procesu nabíjení následující funkce:

- Když baterie přijímá velké množství proudu, proces nabíjení dosáhne horního limitu napětí rychleji, než když přijme rázově méně proudu
- Při stejném otevřeném OCV má baterie různé hodnoty SoC v závislosti na množství přijímaného proudu, přičemž hodnoty SoC jsou větší, když je proces nabíjení vyvíjen pod malými hodnotami proudu.

Pokud by bylo prezentováno chování procesu vybíjení, byly by vidět protiklady procesu nabíjení. Tato křivka OCV je v provozním rozsahu SoC poměrně plochá. I ta nejmenší chyba v OCV získaná z modelu baterie tedy může vést k odchylce SoC od skutečné hodnoty. Pro kompenzaci zmíněných nedostatků je nutné kombinovat metodu OCV s jinými přístupy. SoC může být odhadnut odvozením zbývajícího napětí článku z OCV pomocí OCV – SoC křivky a rovnice (6).



Obrázek 38 – OCV vs. SoC během nabíjení pro různé články stejné série

Změny křivky OCV každého článku v důsledku stárnutí baterie a snížení výkonu zkreslují techniku odhadu. Proto je nutná korekce OCV – SoC křivky porovnáním kapacitní chyby s metodami CC a vyhledávací tabulky nebo polynomiální parametrizací pro OCV křivku. Metoda OCV kompenzuje odchylky parametrů i teplot v metodě odhadu SoC. OCV je běžný nástroj pro podporu dalších metod. Typicky se pro výpočet vnitřního odporu modelové baterie používá metoda diskontinuálního vybíjení pro stanovení charakterizace OCV – SoC a v kombinaci s ECM a rozšířeným Kalmanovým filtrem odhaduje SoC. Křivka se používá jako součást modelu obvodu k posouzení hysterezního jevu, který ukazuje rozdíl v rovnovážném OCV mezi procesy nabíjení a vybíjení baterií.

6.5. Odhad založený na měření impedance

Systém měření impedance se získá ze sinusových excitací při různých budících frekvencích, ve kterých se zaznamenává napětí i proud, a jejich komplexní kvocient se vypočítá jako impedance článku. Impedanční spektroskopii bateriového článku lze aproximovat dvěma kruhy na Nyquistově rovině. V posledních letech našly metody založené na elektrochemické impedanční spektroskopii (EIS) uplatnění pro přesnou analýzu probíhajících elektrochemických procesů a diagnostiku LiB, protože chemie článků má silný vliv na křivku impedančního spektra. Byl již vyvinut a parametrizován experimentální celoživotní model, který dokáže předpovědět zvýšení vnitřního odporu při různých teplotách a úrovních SoC. Model baterie je stanoven pomocí jednoduchého ECM, jehož parametry jsou určeny naměřenými daty impedance, prezentovanými jako Nyquistův graf. Měřená impedance (při frekvencích mezi 100 mHz a 100 kHz) se rozloží pomocí

fázového úhlu ve skutečné části (osa x) a imaginární části (osa y), které jsou vyneseny proti sobě. Jakmile jsou známy parametry modelu, lze SoC odhadnout. Podobný proces je vyvinut i pro nalezení modelu růstu vnitřního odporu článku LiB. Protože tato metoda vyžaduje sinusový zdroj, není vhodná pro online aplikace. Výzkum využívá přístup EIS pro online odhad LiB rozložením impulzního signálu použitého pro získání impulzní odezvy modelu obvodu na odpovídající faktory Fourierovy řady. S tímto sinusovým signálem různých frekvencí se provádí online spektrální analýza pro získání impedance. Prezentované práce zavádějí přístup EIS, kde je Nyquistovo spektrum impedančního grafu rozděleno na vysokofrekvenční, střední a nízkofrekvenční sekce. Toto rozdělení nám umožňuje zjednodušit odhad parametrů ECM a poté pomocí OCV korekce a zlomkového Kalmanova filtru odhadnout SoC.

6.6. Nepřímé metody

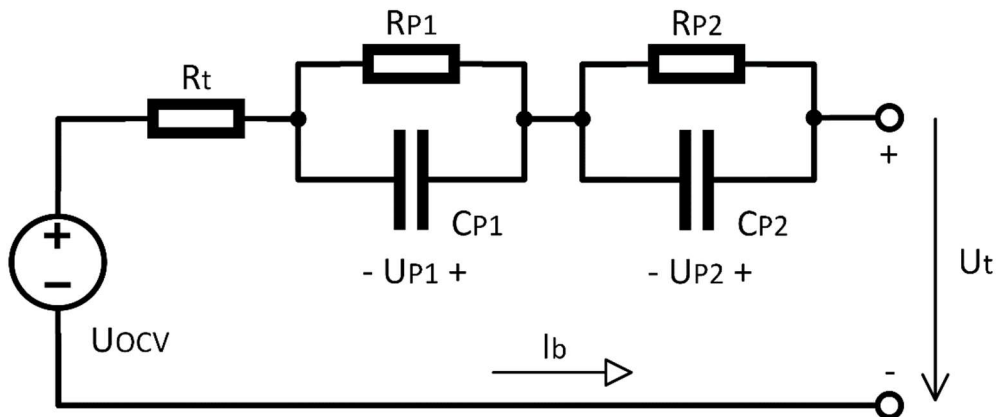
Tyto metody předpokládají propojení měřených signálů baterie (napětí, proud a teplota) s bateriovým SoC využívajícím model baterie. Vysoce věrný model baterie je vyžadován k zachycení charakteristik baterie v reálném stavu a předpovědi jejího chování za nejrůznějších podmínek. V algoritmu BMS lze pomocí signálů jako vstupů modelu, model použít k výpočtu SoC a dalších stavů baterie.

6.7. Metody odhadu založené na modelu

Techniky odhadu založené na modelu se staly běžnějšími, protože překonávají nevýhody metod přímého odhadu. Metody založené na modelu nasazují model baterie s pokročilými algoritmy pro odhad stavu baterie z jejích měřených parametrů, jako je napětí, proud a teplota. Ačkoli v literatuře jsou prezentovány různé přístupy pro odhad SoC přímo pomocí modelu baterie, tato část pouze reviduje elektrické a elektrochemické modely, protože jsou základem pro většinu ostatních metod modelování baterií. Například modelová technika [22] představuje takzvaný impedanční model zlomkového řádu, který lze odvodit propojením techniky EIS a ekvivalentního modelu obvodu prvního řádu, který bude popsán dále. K odhadu SoC [22] se odvodí Kalmanův filtr zlomkového řádu a stanoví se model baterie, který nelze zařadit do následujících dvou kategorií, ale je založen na dvou zde prezentovaných technikách.

6.8. Odhad založený na modelu elektrického obvodu (ECM)

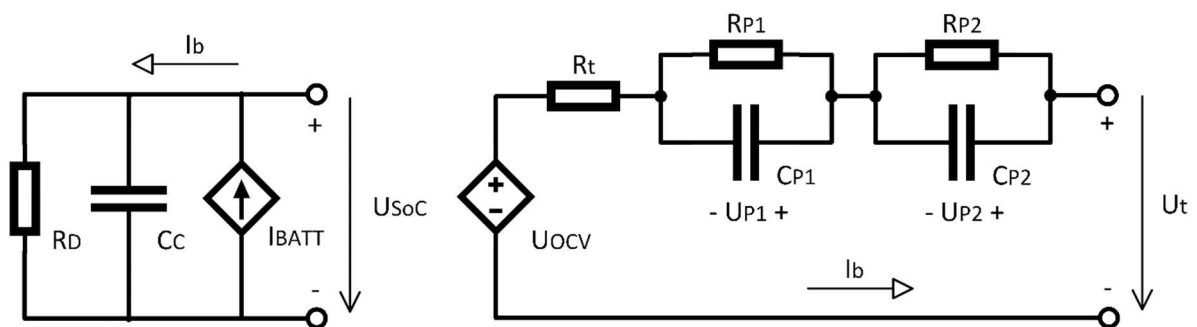
Existují tři různé ECM LiB široce přijímané kvůli jejich vynikajícímu dynamickému výkonu. První je známý jako Theveninův model a je RC modelem prvního řádu, který se skládá z nelineárního zdroje napětí U_{OCV} jako funkce SoC, kondenzátoru pro modelování polarizačních kapacitních a difúzních efektů v baterii – C_{P1} , difúzní odpor R_{P1} , vnitřní odpor R_t , nabíjecí / vybíjecí proud I_b a napětí na svorce baterie V_t . Druhý model přidává kondenzátor v sérii se zdrojem napětí U_{OCV} , aby charakterizoval kapacitu nabíjení akumulátoru a popsal změny v OCV v průběhu času. Druhý model ECM je prvního řádu. Podobně se třetí získá sériovým přidáním RC sítě (paralelní R_{P2} / C_{P2}) pro simulaci koncentrace a elektrochemické polarizace. Obrázek 39 ukazuje ECM druhého řádu.



Obrázek 39 – ECM druhého řádu

Zvýšení počtu paralelních RC sítí může zvýšit přesnost predikce dynamické odezvy baterie. Spojení SoC a časových konstant s počtem cyklů a teplotou však vede k vysokým chybám predikce pro odhad SoC. V [23] jsou prezentovány diskretizační rovnice každého ze tří zmíněných modelů a použity v kombinaci s rozšířeným Kalmanovým filtrem (EKF) a metodou odhadu CC pro odhad SoC. V literatuře [23] se popisuje ECM druhého řádu, kdy je nejpřesnější a má nejlepší dynamický výkon, ale je také nejsložitější z těchto tří modelů. Práce provádí srovnání mezi rovnicemi kontinuálního a diskrétního času ECM druhého řádu a dochází k závěru, že metody identifikace v diskrétním čase jsou méně robustní kvůli nežádoucím problémům s citlivostí při transformaci parametrů diskrétní domény. Parametry ECM druhého řádu lze vypočítat s různými datovými sadami v závislosti na scénáři, kde se model použije. Použitím jednoduchého ECM, jako je Thevenin ECM, lze SoC přímo vypočítat transformací modelových rovnic. Výhodou tohoto přístupu

je jeho jednoduchost, která umožňuje snadnou implementaci na nízkonákladovém mikrokontroléru. V [24] byl pro odhad SoC použit model Thevenin a ECM druhého řádu a porovnány se třemi dalšími vylepšenými ECM. Rozdíl mezi těmito modely spočívá ve způsobu výpočtu rovnic SoC. Následující ECM model je docela přesný a mohl by výrazně zvýšit nelineární identifikaci dynamického chování baterie. Model je znázorněn na *Obrázek 40*. Chování baterie OCV – SoC je modelováno odporem samovybíjení R_d , akumulátorovým kondenzátorem C_C a zdrojem proudu závislým na proudu. Podobně jsou napěťové a proudové charakteristiky modelovány jako ECM druhého řádu, ale nahrazením zdroje napětí zdrojem napětí závislým na napětí, aby se SoC vztahovalo k OCV. V ECM a dynamických matematických rovnicích napětí jsou V_{P1} a V_{P2} stavové proměnné, I_b vstup a V_t výstup. Pomocí tohoto ECM je vyvinut postup, který provádí srovnání naměřených a vypočítaných hodnot napětí baterie v reálném čase, zatímco k poskytnutí skutečných hodnot SoC je použit ukazatel založený na P_1 . Model druhého řádu byl také použit pro predikci SoC během celého cyklu pohonu v EV aplikacích, ale pro modelování přechodného chování koncového napětí se používá model se třemi časovými konstantami. Z tohoto důvodu se používá třetí R_C síť v sérii se stávajícíma dvěma.



Obrázek 40 – ECM závislý na zdroji

V praxi všechny hodnoty parametrizace odporů a kondenzátorů závisí na konkrétním provozním bodě baterie, takže se liší podle času, teploty, potřeby energie, SoC a SoH. Ve čtyřech zmíněných modelech je SoC baterie přímo začleněna do modelu pomocí jejího vztahu s OCV baterie. Pokud je cílem modelu simulovat dynamiku pomaleji než 1 s, je možné použít ECM, jako je popsáný model Thevenin. Možnou variantou není zahrnout SoC baterie do rovnic, ale odhadnout OCV baterie pomocí modelu a poté použít jinou techniku k odhadu SoC z OCV. Pro získání napětí buňky používá vylepšený Theveninův

model do svých rovnic jev zahrnující hysterezi, a poté pomocí rovnice (5) a Kalmanova filtru (KF) s více modely v jednom případě a techniku nejmenších čtverců ve druhém odhadující SoC. Pro získání OCV lze využít Thevenin ECM a poté se pro získání SoC používá lineární přizpůsobení části křivky OCV–SoC. Podobný proces je formulován k získání SoC, ale tento přístup používá jednoduchý ECM, který bere v úvahu pouze zdroj napětí a vnitřní odpor.

Metody odhadu SoC kombinují ECM druhého řádu LiB s jinými technikami, jako je vylepšený KF, nebo s kinetickým modelem schopným přesně předpovědět charakteristiky obvodu a nelineární efekty při dynamickém zatížení (v těchto případech je odhad SoC nahrazen stavem energie, SoE, výpočet). ECM druhého řádu je spojena s tepelným modelem pomocí rovnic pro generování tepla, proto nelze při odhadu SoC využít přímo. Jelikož tento model poskytuje přesné předpovědi distribuce teploty povrchem článku a chování napětí za různých provozních podmínek, mohl by být použit ve vylepšených postupech odhadu SoC.

Použitím ECM druhého řádu plus EKF a rovnice (5) může přístup odhadnout SoC a ukazuje, že se nespolehá na počáteční SoC a je imunní vůči chybám parametrů. Přístup zobrazený v [25] využívá ECM druhého řádu prezentovaný v [26] k získání napěťového obvodu pomocí SoC a proudu jako vstupů. Poté se pro odhad stejného napětí obvodu použije další model baterie založený na baterii s částečnými nejmenšími čtverci. Oba výpočty jsou porovnány s koncovým referenčním napětím a algoritmus vybere model, jehož výstup má minimální rozdíl ve srovnání s měřeným koncovým napětím. Tento algoritmus používá k výpočtu ΔI adaptivní řízení bez modelu a využívá chyby koncového napětí. S touto vylepšenou hodnotou algoritmus vypočítá korekci SoC. Navzdory smíšenému algoritmu, který činí proces odhadu jednoduchým a efektivním, zvyšuje výpočetní zátěž a navrhované metody s omezenými vzorky za různých podmínek stále vyžadují další výzkum [25]. V literatuře [27] se pro odhad SoC využívá rovnice ECM druhého řádu, jejíž parametry jsou závislé na SoC nebo hloubce vybití (DoD), rychlosti nabíjení nebo vybíjení a teplotě, a pro odhad hodnoty SoC se používají tři různé optimalizační techniky. Parametry ECM a proveditelnost těchto technik jsou hodnoceny přesností predikovaného modelu a rychlostí konvergence v predikci.

Další ECM odlišný od zmíněných konvenčních čtyř je uveden v [28]. V tomto přístupu architektura a komponenty navrhovaného modelu obvodu zachycují difúzní charakteristiky a výsledný nadměrný potenciál prostřednictvím segmentového difúzního modelování a na základě mechanismu přenosu chemické hmoty. Přístup, který považuje ECM druhého řádu za základ pro přidání rovnic pro generování a přenos tepla, je uveden v [29] pro odhad SoC v reálném čase. V [29] jsou elektrické a tepelné rovnice spojeny do jednoho modelu a poté je pro odhad SoC použit EKF.

Odhad založený na elektrochemickém modelu (EChM). Elektrochemické modely používají rovnice, které popisují fyzikálně-chemické jevy, jako je difúze a elektrochemická kinetika vyskytující se v baterii. Definice těchto rovnic zahrnuje speciální znalosti elektrochemie, a proto jejich využití v oblasti elektrotechniky a elektroniky není běžné. Tyto modely jsou obvykle výpočetně náročné kvůli systému spojených časově proměnných parciálních diferenciálních rovnic. Jednoduchý EChM, který je uveden v [30], zahrnuje šest nelineárních parciálních diferenciálních rovnic, které vyžadují numerické řešení. Tato složitost nejenže brání implementaci monitorovacích algoritmů na nízkonákladových cílových mikrokontrolérech, ale také snižuje počet parametrů modelu, které lze on-line přizpůsobit současným stavům baterie [31]. Z tohoto důvodu jsou takové modely nejvhodnější pro optimalizaci aspektů fyzikálního a materiálového designu vnitřních elektrod a elektrolytů [32]. Recenze uvedená v [33] je krátkou aktualizovanou literární revizí přístupů využívajících elektrochemické modely k odhadu různých stavů v bateriích.

Několik publikací navrhuje EChM, které by mohly být použity pro odhad SoC a dalších stavů baterií, ale nepředstavují proces odhadu SoC. Například [34] představuje úplné popisy rovnic a modelový algoritmus EChM založený na přístupu formulace absolutních uzlových souřadnic a také stručný přehled technik redukce pořadí objednávek pro EChMs. Většina metod, které používají EChM, vyvíjí modely se sníženým řádem a používá odhad. Práce vyvinutá v [35] plně popisuje EChM sníženého řádu. Proces redukce modelu a návrh pozorovatele jsou úzce propojeny. Jednodušší modely usnadňují návrh odhadu na úkor konečné věrnosti. Pan Moura a kolektiv v literatuře [33] představuje schéma odhadu stavu pro sníženou EChM odvozením modelu s jednou částicí (SPM)

s elektrolytem. Pan Tran se svým týmem v [36] předkládají rovnice tříparametrového SPM a jejich simulace v Matlabu.

Konferenční článek [37] navrhuje model složený ze čtyř submodelů, které zachycují elektrochemickou, tepelnou, elektrickou a tzv. stárnoucí dynamiku v souboru parciálních diferenciálních rovnic. Protože jedním z výstupů celého modelu je SoC, lze jej přímo odhadnout řešením systémových rovnic. Barlett se svým kolektivem [38] představuje elektrochemický model se sníženým řádem pro různé Lithium iontové chemie, které se používají v duálních nelineárních kritériích (Kalmanův hladší interval s pevným intervalem a filtr částic), k odhadu SoC článku a ztrátě cyklovatelného lithia v průběhu času. Výzkum prezentovaný v [39] popsal EChM, kde se pro přímý odhad SoC používá soubor diskretizovaných rovnic, a poté se SoC porovnává s přístupem, kde je EChM psán jako lineárně prostorově propojený systém. Technika uvedená v [35] zavádí odhad parametrů EChM pomocí neinvazivní optimalizační strategie při jakémkoli stavu životnosti baterie. Tato technika se používá i v literárním zdroji [40] pro odhad SoC.

Výhodou EChM je, že neodmyslitelně zahrnují závislost chování baterie na SoC a teplotě, zatímco elektrické modely musí ukládat své parametry jako vyhledávací tabulky pro různé kombinace SoC a teploty. Nevýhodou EChM je jejich vysoká složitost. Jak již bylo uvedeno, hodnoty parametrů modelu baterie se mění s teplotou, takže odhadované hodnoty SoC přímo závisí na tepelném chování baterie. Nadměrná teplota může výrazně urychlit proces stárnutí baterie a v závažných případech dokonce způsobit požár nebo výbuch baterie. Na druhou stranu, elektrické vlastnosti baterie, jako je využitelná kapacita, vnitřní odpor a schopnost dodávat energii, vše závisí na vnitřní teplotě baterie [29]. Interní teplota baterie může dosáhnout kritické hodnoty mnohem rychleji než teplota povrchu. Samotné měření povrchové teploty tedy nemusí být dostatečné k zajištění bezpečného provozu baterie. To je důvod, proč by pro lepší zabezpečení a přesnější odhad SoC měly být hodnoty parametrů ECM průběžně aktualizovány. Toho lze dosáhnout pomocí níže popsaných adaptivních metod. V EChM to nemusí být nutné, protože obsahují teplotu jako jednu ze svých proměnných.

Většinu literatury o degradaci baterií tvoří empirické studie s výsledky získanými z experimentálních testů v laboratořích [41]. Ahmadian a kol. v [41] představují

nejvýznamnější modely degradace a účinky degradačních faktorů na výkon LiB. Bashash a kol. v [42] uvádí, že existuje exponenciální vztah mezi stárnutím a SoC. Tento vztah ukazuje, že vnitřní odpor baterie se zvyšuje se zvyšujícím se SoC. Degradace baterie se tedy zvyšuje, pokud je udržována na vysokých SoC. Také průměrný SoC udržovaný během cyklování baterie má vliv na rychlost degradace a vyšší průměrný SoC vede k rychlejší degradaci [41]. Protože se stárnutí baterií odráží přímo v parametrech modelu, měly by se hodnoty parametrů modelů neustále aktualizovat a k dosažení této podmínky lze použít adaptivní metody SoC popsané níže.

6.9. Adaptivní metody odhadu založené na filtru

Adaptivní techniky kombinují přímé a modelové metody, které se mohou automaticky přizpůsobovat měnícím se parametrům. Adaptivní systémy obvykle používají zpětnou vazbu ke změně proudového výstupu podle měnícího se vstupu [43].

Teorie KF může být aplikována při pohledu na každý článek v baterii jako na dynamický systém, jehož vstupy zahrnují proud a teplotu článku a jehož výstupem je koncové napětí. Způsob, jakým se KF používá pro odhad SoC, je založen na vysvětlení techniky v [44]. Protože parametry rovnic (1) a (2) závisí na použitém modelu buňky, vzniká myšlenka zahrnující požadované neznámé veličiny do stavového vektoru x_k a KF automaticky vypočítá nejlepší odhad jeho současných hodnot. V tomto případě musí být SoC zahrnut jako stav do vektoru x_k . Pro odvození filtračních rovnic se předpokládá, že w_k a v_k jsou vzájemně nekorelující bílé gaussovské náhodné procesy s nulovou střední a kovarianční maticí $\sum_w \sum_v$ se známými hodnotami:

$$E[w_n w_n^T] = \begin{cases} \sum_w & n = k \\ 0 & n \neq k \end{cases}; \text{ a } E[v_n v_n^T] = \begin{cases} \sum_v & n = k \\ 0 & n \neq k \end{cases} \quad (6.13)$$

$E[\cdot]$ je operátor statistického očekávání a T je maticová transpozice. Úloha KF definuje následující: Pomocí pozorovaných dat $\{u_0, u_1, \dots, u_k\}$ a $\{y_0, y_1, \dots, y_k\}$ najděte minimální střední kvadratickou chybu a současně odhadněte \hat{x}_k stavu x_k . Takže s w_k a v_k a modelovaným pozorovatelným systémem vyřešte:

$$\hat{x}_k = \arg \min E[(x_k - \hat{x})^T (x_k - \hat{x}) \mid u_0, u_1, \dots, u_k, y_0, y_1, \dots, y_k] \text{ s } \hat{x} \in R^n \quad (6.14)$$

KF poskytuje množinu výpočtově efektivních rekurzivních vztahů, které zahrnují jak odhad stavu samotného, tak také kovarianční matici $\Sigma \hat{x}, k = E[\tilde{x}_k \tilde{x}_k^T]$ chyby odhadu stavu $\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_k$. Kovarianční matice chyby $\in \Sigma \tilde{x}, k$ s velkými singulárními hodnotami naznačuje vysokou úroveň nejistoty v odhadu stavu a jedna s malými singulárními hodnotami naznačuje důvěru v odhad. Algoritmus KF je znázorněn na Obrázek 41. Algoritmus je inicializován nejlepšími dostupnými informacemi o kovarianci stavu a chyby:

$$\hat{x}_0^+ = E[x_0]; \quad \Sigma \tilde{x}, 0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T] \quad (6.15)$$

Obvykle tyto veličiny nejsou známy, takže inicializaci lze provést ad hoc způsobem a KF se při běhu rychle sblíží ke skutečným hodnotám. Později KF opakovaně provede dva kroky v každém intervalu měření: (1) Předpovídá hodnotu současného stavu, výstup systému a chybovou kovarianci: $\hat{x}_k, \hat{y}_k, \Sigma \tilde{x}, k^-$. Tyto hodnoty se predikují šířením vstupu systému dynamikou modelu systému (rovnice 2) za předpokladu očekávaného šumu procesu w_k nula:

$$\hat{x}_k^- = A_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1} u_{k-1}; \quad \Sigma \tilde{x}, k^- = A_{k-1} \Sigma \tilde{x}, k-1^- A_{k-1}^T + \Sigma w \quad (6.16)$$

$$\hat{y}_k = C_k \hat{x}_k^- + D_k u_k; \quad (6.17)$$

Pomocí měření výstupu fyzického systému opraví odhad stavu a kovarianci chyby na \hat{x}_k^+ a

$$\Sigma \tilde{x}, k^+ : \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [y_k - \hat{y}_k] \quad (6.18)$$

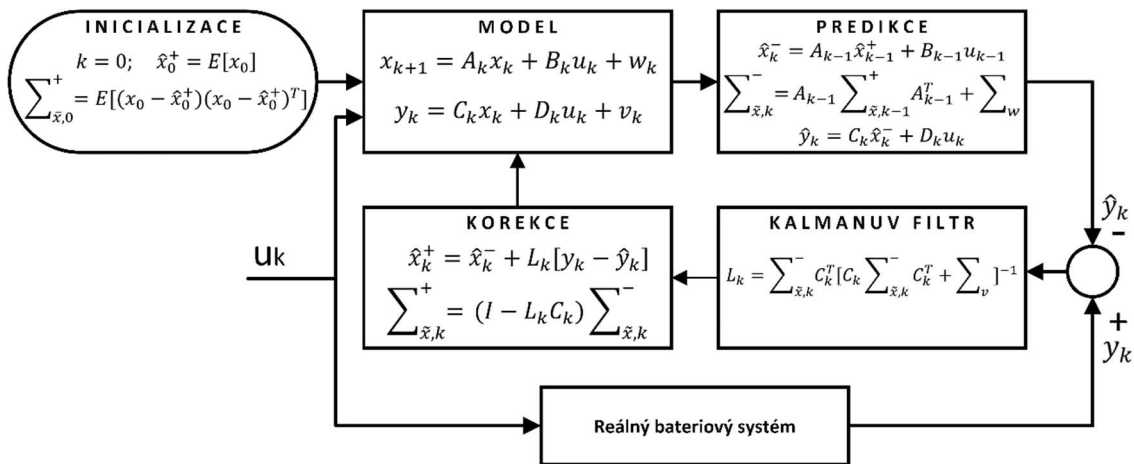
Na těchto rovnicích je vidět, že chyba mezi výstupním měřením y_k a výstupním odhadem \hat{y}_k je vážena Kalmanovým vektorem zisku L_k , který je definován jako:

$$L_k = \Sigma \tilde{x}, k^- C_k^T [C_k \Sigma \tilde{x}, k^- C_k^T + \Sigma v]^{-1} \quad (6.19)$$

Krok kovarianční korekce je:

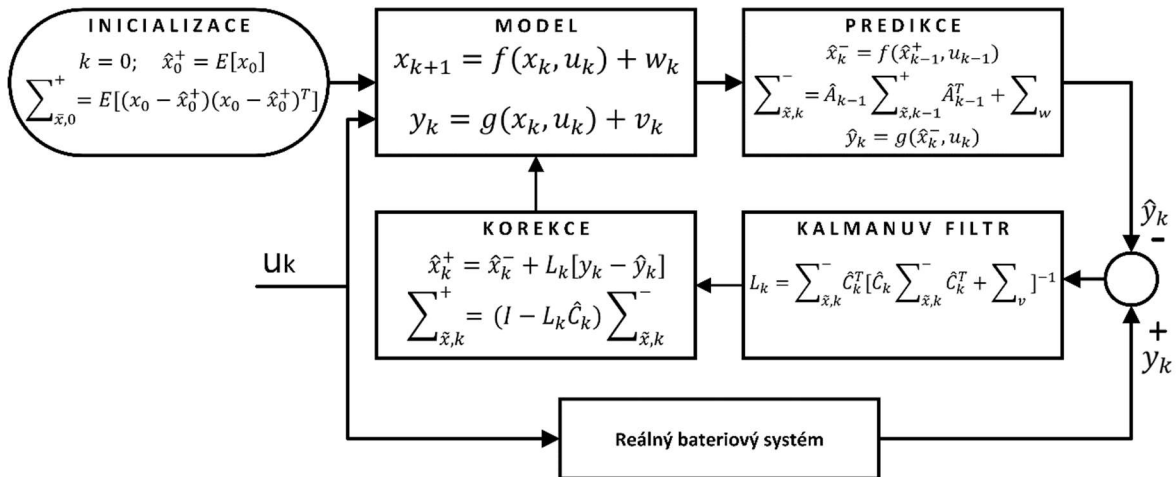
$$\sum_{\tilde{x}, k^+} = (I - L_k C_k) \sum_{\tilde{x}, k^-} \quad (6.20)$$

Kovarianční matice indikuje nejistotu odhadu stavu a vždy se snižuje kvůli novým informacím poskytovaným měřením. Hodnotu nejistoty SoC snižuje algoritmus KF, protože rekurzivní rovnice jsou opakovaně vyhodnocovány během provozu systému [45].



Obrázek 41 – Kalmanuv iterační filtr

V současnosti EKF získává stále větší pozornost a stává se jednou z nejčastěji používaných metod pro odhad SoC baterie i v případě, že počáteční SoC není známa [25]. KF je optimální estimátor stavu pro lineární systémy. Pokud je systém nelineární, lze v každém časovém kroku použít proces linearizace k aproximaci nelineárního systému lineárním systémem s proměnlivou hodnotou v čase (LTV). Tento LTV systém se pak využije v KF, čímž vznikne EKF na skutečném nelineárním systému. Při použití nelineárního modelu, jako je model uvedený v rovnicích (6.9 a 6.10), a s přihlédnutím ke stejným úvahám pro w_k a v_k se v každém časovém kroku linearizují $f(x_k, u_k)$ a $g(x_k, u_k)$ pomocí expanze Taylorovy řady prvního řádu. Za předpokladu, že $f(x_k, u_k)$ a $g(x_k, u_k)$ jsou diferencovatelné při všech operacích.



Obrázek 42 – Rozšířený iterační diagram Kalmanova filtru

Proces linearizace provedený v EKF používá členy prvního nebo druhého řádu Taylorovy řady k aproximaci nelineárního modelu, což snižuje přesnost odhadu SoC. K překonání tohoto problému se místo lokální linearizace používá necentrováný Kalmanův filtr (UKF), který zachycuje statistické charakteristiky rozdělení nelineárního systému podle řady sigma bodů [46]. UKF založený na necentrované transformaci nejenže nevyžaduje výpočet Jacobianovy matice, ale má vyšší řádovou přesnost v odhadu šumových statistik než EKF, jako je střední hodnota a kovariance chyby stavového vektoru bateriového systému [47].

Závěr

Cesta ke splnění vytyčených cílů disertační práce zahrnuje několik samostatných směrů, které se v závěru opět scházejí v konečné řešení funkčního prototypového hardwaru BMS jednotky s odpovídajícím softwarovým vybavením. Hlavní těžiště přínosu k dané problematice vychází z plnohodnotného vlastního komplexního řešení, otevřeného pro vývoj. Žádná známá komerční platforma neumožňuje vstup do výpočetního jádra a pozdější implementaci vlastních experimentálních algoritmů různých chemií a nezávislých přístupů k Li-Ion článkům. Vývoj vlastních univerzitních BMS jednotek je postaven na současně nejmodernějších dostupných AFE čípech, které primárně už na hardwarové úrovni zajišťují svými akcelerátory předzpracování analogových signálů pro následující možnosti využití. Hloubka významu / přínosu disertační práce se automaticky přelévá i k vedlejším víceletým projektovým záměrům – OP VVV MŠMT, AnteTUL – Elektromobilita.

Úvod práce se týká obecného seznámení s elektro-chemickými vlastnostmi nejčastěji využívaných lithium-iontových článků. Pro správné využívání a později i nastavení elektroniky a matematických simulačních modelů je potřeba pochopení jejich rozdílů, dostupných parametrů a základních principů. Nesprávné využití může vést k výraznému zkrácení životnosti nebo v krajních případech dokonce k popálení či výbuchu. Navazující část první kapitoly seznamuje s běžnými pouzdry, značením, povinnými a rozšířenými ochranami a vyčleňuje články nehodící se pro hlubší diagnostické mapování pokročilého BMS systému. Cílené bateriové moduly zaujímají většinou obsáhlejší soubor sério-paralelních kombinací článků, které se propojují s určitými pravidly a charakteristickým značením. Zatěžováním či nabíjením vysokými násobky C dochází k vytváření nerovnoměrných teplotních zón. Simulace ukazují teplotní průniky, vliv pasivního chlazení a zajímavá místa pro senzory. Podrobné lokální mapování se znalostí chemií článků se opět vrací k modelům, které se musejí dynamicky během celého procesu přizpůsobovat. Zacházení s články včetně externích vlivů nesmí způsobit jejich lokální přehřátí!

Zadání práce žádá nastudování problematiky současných moderních BMS. Seznámení s komerčními systémy zahrnuje průnik širší teoretické rešerše katalogových listů jednotlivých výrobců a praktických laboratorních testů vybraných vzorků. Ve zprávě se dostaly vedle sebe kompaktnější jednotky TinyBMS s516, EMUS BMS mini, LLT POWER BMS, ale i robustní automobil Orion BMS a novější verze Orion BMS2. Objektivním přístupem se dají

porovnávat technická zpracování HW/SW/FW dostupné možnosti a potenciálně rozšiřující periferie. Je nutné zmínit, že každá jednotka je určena pro jiné specifické aplikace. Porovnání, hodnocení a závěry podrobněji shrnuje druhá kapitola této práce.

Třetí kapitola pojednává o smyslu BMS jednotek v přímé návaznosti k lithium iontovým článkům. Úvodní schéma nejprve představuje jeden z mnoha konceptů pokročilého systému, který určuje návaznosti mezi samostatnými funkčními bloky až postupně k nadřazenému systému či zobrazovacím prvkům. Kapitola Battery Management System dále seznamuje se specifickými vlastnostmi elektroniky, které se zajišťují primárně na hardwarové úrovni. Jedná se zejména o elementární bezpečnostní ochrany jednotlivých článků. Navazující rozhraní analogových Front-End obvodů poté většinu dat kontinuálně zprostředkovává k matematickým výpočtům a diagnostickým účelům. Základní diagnostické indikátory baterie mohou být (originální anglickou terminologií) State of Health (SoH – stav snížení kapacity oproti původní), Remaining Useful Life (RUL – odhadovaná zbývající životnost), End of Life (EoL – technologický konec životnosti). Principy kvantifikovaného odhadu stavu nabití baterie SoC (State-of-charge) patří mezi nejdůležitější a zároveň také velice sofistikovaně dosažitelné ukazatele. Vycházejí z kombinace heuristických měření Open Circuit Voltage (OCV – napětí nezatíženého obvodu) a Coulomb Counting (CC – počítání Coulombova náboje) na které pro lepší výsledky z principu navazují celé řady matematických aparátů.

Vlastní vývoj první cíleně jednodušší otevřené platformy elektroniky BMS jednotky vedl skrze centralizovaný AFE obvod BQ76940. Z hardwarového hlediska zvládá popsany návrh samostatně plnit kompletní správu baterií 9 až 15 článků. Pro nižší rozsahy existují ve stejném pouzdře záměnné alternativy. Balanční proudy posilují externí tranzistory. Snímání celkového energetického toku odečítá multiplexovaný integrovaný ADC převodník přímo z externího odporového bočnicku. Proces nabíjení / vybíjení baterie chrání výkonové mosfety s N-kanálem, které na kladném pólu řídí budič BQ76200. Jednotka se umí v různých režimech sama napájet skrze galvanicky oddělený DC/DC step-down měnič AM6CW. Přidanou hodnotu zajišťuje MCU PIC32MZ2048EFH064 s možností externí CAN komunikace. Omezené schopnosti rozhraní postačovaly k ověření funkcionality základních teoreticky popsanych principů, nicméně hloubka registrů, forma režie dat a soubor dalších požadavků si žádal přechod k vyšším řadám AFE obvodů.

Navazující verze podpůrného hardwaru s AFE BQ79616, sloužící jako nezbytný základ zprostředkovávající rozhraní mezi jednotlivými články baterie a popsány matematickými modely. Následující vývoj podstatně univerzálnější HW jednotky shrnuje všechny dosud získané zkušenosti a respektuje budoucí požadavky. Podle konfigurace může disajn fungovat plnohodnotně zcela samostatně centralizovaně pro 6 až 16 článků, včetně integrovaného výpočetního jádra, řady nastavitelných GPIO vstupů / výstupů, komunikací, provozních signalizací, multirozsahového měření (1 mA až 100 A vybíjení / 10 mA až 10 A nabíjení). V jiném režimu lze jednotky decentralizovaně vyčlenit daným bateriovým blokům a skrze jejich galvanicky oddělené diferenciální daisy-chain rozhraní komunikovat až se 64 dalšími. Zahrnutí izolovaných, obousměrných portů v sériovém zapojení podporuje oddělení na bázi kondenzátoru i transformátoru, což umožňuje použití nejúčinnějších komponent pro centralizované nebo distribuční architektury, které se běžně vyskytují v systému hnacího ústrojí elektrických vozidel. Integrované kanály post-ADC s dolní propustí umožňují filtrovaná měření napětí podobná stejnosměrnému proudu pro lepší výpočet stavu nabití (SoC). Podrobnější náhled se připravuje v navazujících publikacích.

Kapitola matematického modelování dynamických vlastností Li-Ion zpracovává elektrochemické jevy článků do podoby náhradních elektrických obvodů, které lze se známými parametry přenést do simulací. Obecné matematické modelování definuje vztahy mezi vnějšími charakteristikami a vnitřními stavy baterie pomocí diskrétního stavového prostoru. Elektrochemické modely jsou vhodné pro předpovídání veličin na makroskopické i mikroskopické úrovni, nicméně jsou velmi složité. Pracovní vlastnosti různých druhů baterií lze lépe dosáhnout ekvivalentním modelem elektrického obvodu (ECM) založeného na vnějších dynamických charakteristikách. Skrze simulační prostředí Matlabu byly z uvedených modelů ověřeny metody pro odhad stavu nabití baterie SoC vycházející z CC a OCV, techniky filtrace signálu Kalmanovými integračními filtry a adaptivní prediktivní metody. Potenciál vlastní vyvinuté elektroniky umožňuje libovolnou implementaci jakýchkoli experimentálních a klidně i úplně nových matematických modelů. V budoucnosti se možná dočkáme i lithiových článků bez kapalného/gelového elektrolytu, článků na bázi lithium-síra, nebo lithium-vzduch. Takové systémy budou dosahovat vyšších měrných kapacit a časem mohou nahradit současné Li-ion, tak jak je známe.

Pokračování práce mimo disertační rozsah se bude ubírat k prohloubení tématu impedanční spektroskopie s HW podporou, rozšíření algoritmů k mapování a verifikaci provozních schopností (stáří) neznámých článků. V uvedených textech se nedostalo na zmínku vizualizační prostředí k pokročilé BMS jednotce, které funguje vizualizačně i částečně konfiguračně. Prostředí je v tuto chvíli vývojářsky uzavřené v rozpracované verzi skrze Microsoft Visual Studio pro Windows 10, případně novější.

Citovaná literatura

- [1] S. s. t. dohody, „Ministerstvo životního prostředí,“ 4 11 2017. [Online]. Available: https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda.
- [2] S. s. ú. UNFCCC, „Pařížská dohoda o změně klimatu,“ 18 11 2022. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/climate-change/paris-agreement/>.
- [3] z. ú. Otevřená data o klimatu, „Fakta o klimatu,“ CC BY 4.0, 2023. [Online]. Available: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/koncentrace-co2>.
- [4] J. R. W.B. a Y. G. Zhang, „Atmospheric CO₂ over the Past 66 Million Years from Marine Archives,“ *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, pp. 609-641, 2021.
- [5] L. Vokáč, „idnes.cz/magaziny,“ 3 9 2010. [Online]. Available: https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/lithia-mame-dost-pro-baterky-10-miliard-elektromobilu-je-ale-v-nejistych-zemich.A100826_190836_automoto_vok. [Přístup získán 2022 2 21].
- [6] „Wikipedie: Otevřená encyklopedie,“ 01 07 2023. [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontov%C3%BD_akumul%C3%A1tor. [Přístup získán 10 07 2023].
- [7] „Levné baterky,“ 20 5 2021. [Online]. Available: <https://www.levne-baterky.cz/Lithium-iontova-baterie-vse-co-o-ni-potrebujete-vedet-b81853.htm>. [Přístup získán 15 1 2023].
- [8] C. a. N. Z. a. C. G. Liu, „Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries,“ *Materials Today*, sv. 19, pp. 109-123, 2016.
- [9] K. Zhao, „The Register,“ 5 6 2019. [Online]. Available: https://www.theregister.com/2019/06/05/liion_battery_scan_charging/. [Přístup získán 13 9 2021].
- [10] „Eleart Lithium Battery,“ 2020. [Online]. Available: <http://www.eleart-battery.com/TECHNOLOGY/What-is-Lifepo4e.html>.
- [11] P. Rydlo, „Matematické modelování dynamických vlastností lithiových akumulátorů,“ Liberec, 2023.
- [12] M. J. G. , C. D. C. Brian J. Landi *, „Carbon nanotubes for lithium ion batteries,“ *Energy Environ. Sci.*, pp. 638-654, 27 2 2009.
- [13] „Himax Electronics Co,“ 2019. [Online]. Available: <https://himaxelectronics.com/the-difference-between-steel-shell-aluminum-shell-and-pouch-cell-batteries/>. [Přístup získán 1 7 2023].
- [14] (. specified), „Раздольная энергия, Всё об источниках энергии,“ [Online]. Available: <https://razdolny-ru.translate.google.com/battery/test-akkumulatorov-lgdbhe41865.html>. [Přístup získán 3 2 2022].
- [15] T. Nagourney, J. Jordan, L. Marsh a D. Scardino, „The Implications of Post-Fire Physical Features of Cylindrical 18650 Lithium-Ion Battery Cells,“ *Fire Technology*, p. 1707–1722, 20 1 2021.
- [16] D. Katsoulis, „RC Kavala Acro Team,“ 2 2 2017. [Online]. Available: <http://rckavalaacroteam.com/li-po-batteries-famous-rc-world/>. [Přístup získán 23 5 2019].

- [17] M. A. Qubeissi, A. Mahmoud, M. Al-Damook, A. Almshahy, Z. Khatir, H. S. Soyhan a R. Mazuir, „Comparative Analysis of Battery Thermal Management System Using Biodiesel Fuels,“ *Thermal Management*, 3 6 2023.
- [18] J. Yan, C. Li, G. Xu a Y. Xu, „A Novel On-line Self-learning State-of-charge Estimation of Battery Management System for Hybrid Electric Vehicle,“ v *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, Jul 2009.
- [19] V. Olmr a J. Řehák, „www.hw.cz,“ HW group s.r.o, 1 1 2022. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz/integrované-obvody-pro-spravu-baterii.html>. [Přístup získán 1 5 2023].
- [20] J. V. Barreras, C. Pinto, R. Castro a E. Schaltz, „Multi-Objective Control of Balancing Systems for Li-Ion Battery Packs: A Paradigm Shift?,“ v *Proceedings of the 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Coimbra, Portugal, 2014.
- [21] „AvdWeb,“ 15 7 2011. [Online]. Available: <https://avdweb.nl/solar-bike/electronics/motor-controller>. [Přístup získán 18 3 2019].
- [22] Z. L. Zhang, X. Cheng, Z. Y. Lu a D. J. Gu, „SOC Estimation of Lithium-Ion Batteries With AEKF and Wavelet Transform Matrix,“ v *IEEE Transactions on Power Electronics*, 06 December 2016.
- [23] M. Cacciato, G. Nobile, G. Scarcella a G. Scelba, „Real-Time Model-Based Estimation of SOC and SOH for Energy Storage Systems,“ v *IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 32, Issue: 1, Jan. 2017)*, 26 February 2016.
- [24] G. Liu, L. Lu, H. Fu, J. Hua, J. Li, M. Ouyang, Y. Wang, S. Xue a P. Chen, „A comparative study of equivalent circuit models and enhanced equivalent circuit models of lithium-ion batteries with different model structures,“ v *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, China, 31 Aug.-3 Sept. 2014.
- [25] L. Guangzhao, M. Jinhao, J. Xingchang, C. Xiao a G. Fei, „A data driven model for accurate SOC estimation in EVs,“ v *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 04 May 2017.
- [26] Z. Chen, Y. Fu a C. C. Mi, „State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles Using Extended Kalman Filtering,“ v *IEEE Transactions on Vehicular Technology (Volume: 62, Issue: 3, March 2013)*, 20 December 2012.
- [27] V. Sangwan, A. Sharma, K. Rajesh a R. K. Akshay, „Equivalent circuit model parameters estimation of Li-ion battery: C-rate, SOC and temperature effects,“ v *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 14-17 Dec. 2016.
- [28] B. Payyappilly a V. John, „A generic in-circuit modeling approach for electrochemical batteries,“ v *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 14-17 Dec. 2016.
- [29] Z. Cheng, L. Kang, D. Jing a S. Shiji, „Improved Realtime State-of-Charge Estimation of LiFePO₄ Battery Based on a Novel Thermoelectric Model,“ v *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 15 September 2016.
- [30] R. S. Venkat, T. Deepak a E. W. Ralph, „A Boundary Condition for Porous Electrodes,“ v *Electrochemical and Solid-State Letters*, 23 July 2004.
- [31] L. Nima, G. L. Robert, L. Jie a P. Jonghyun, „Reduced-Order Electrochemical Model-Based SOC Observer With Output Model Uncertainty Estimation,“ v *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 01 September 2016.

- [32] Y. Cao, C. K. Ryan a T. K. Philip, „Multi-timescale Parametric Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations,“ v *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 13 May 2016.
- [33] J. M. Scott, B. A. Federico, K. Reinhardt, M. Anahita a K. Miroslav, „Battery State Estimation for a Single Particle Model With Electrolyte Dynamics,“ v *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10 June 2016.
- [34] W. L. Damas, Y. B. Pierre, M. A. Anuradha a K. Ashish, „A Reduced-Order Model of a Lithium-Ion Cell Using the Absolute Nodal Coordinate Formulation Approach,“ v *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 27 April 2017.
- [35] R. Ahmed, M. E. Sayed, I. Arasaratnam, J. Tjong a S. Habibi, „Reduced-Order Electrochemical Model Parameters Identification and SOC Estimation for Healthy and Aged Li-Ion Batteries Part I: Parameterization Model Development for Healthy Batteries,“ v *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 18 June 2014.
- [36] T. T. Ngoc, V. Mahinda, F. Troy a S. C. San, „Matlab simulation of lithium ion cell using electrochemical single particle model,“ v *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, 5-8 Dec. 2016.
- [37] C. Zou, C. Manzie a D. Nešić, „A Framework for Simplification of PDE-Based Lithium-Ion Battery Models,“ v *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11 December 2015.
- [38] A. Bartlett, J. Marcicki, S. Onori, G. Rizzoni, X. G. Yang a T. Miller, „Electrochemical Model-Based State of Charge and Capacity Estimation for a Composite Electrode Lithium-Ion Battery,“ v *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29 July 2015.
- [39] M. Corno, N. Bhatt, S. M. Savaresi a M. Verhaegen, „Electrochemical Model-Based State of Charge Estimation for Li-Ion Cells,“ v *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11 April 2014.
- [40] R. Ahmed, M. E. Sayed, I. Arasaratnam, J. Tjong a S. Habibi, „Reduced-Order Electrochemical Model Parameters Identification and State of Charge Estimation for Healthy and Aged Li-Ion Batteries—Part II: Aged Battery Model and State of Charge Estimation,“ v *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.
- [41] A. Ahmadian, M. Sedghi, A. Elkamel, M. Fowler a M. A. Golkar, „Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies: Review, assessment and conceptual framework,“ v *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, January 2018.
- [42] S. Bashash, S. J. Moura, J. C. Forman a H. K. Fathy, „Plug-in hybrid electric vehicle charge pattern optimization for energy cost and battery longevity,“ v *Journal of Power Sources*, 1 January 2011.
- [43] C. Hicham a G. Hamid, „Adaptive State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries With Parameter and Thermal Uncertainties,“ v *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14 June 2016.
- [44] G. L. Plett, „Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery,“ v *Journal of Power Sources*, 12 August 2004.
- [45] P. A. Topan, M. N. Ramadan, G. Fathoni, A. I. Cahyadi a O. Wahyunggoro, „State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) estimation on lithium polymer battery via Kalman filter,“ v *2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST)*, Yogyakarta, Indonesia, 27-28 Oct. 2016.

- [46] Y. Tiana, B. Xiaa, W. Sunb, Z. Xub a W. Zheng, „A modified model based state of charge estimation of power lithium-ion batteries using unscented Kalman filter,“ v *Journal of Power Sources*, 15 December 2014.
- [47] S. Peng, C. Chen, H. Shi a Z. Yao, „State of Charge Estimation of Battery Energy Storage Systems Based on Adaptive Unscented Kalman Filter With a Noise Statistics Estimator,“ v *IEEE Access*, 11 July 2017.
- [48] „https://uacj-automobile.com/sheets_and_plates07.html,“ UACJ Corporation, 1 9 2023. [Online].

Seznam publikací, funkčních vzorků a užitého vzoru

RYDLO, P., SIERATOVSKY, J., MACH, O., MYSLIVEC, T., JANDURA, P. Sportovní zátěžový trenažér pro vytváření řízené zátěže sportovců při tréninku. Česká republika. Užité vzor CZ 37163 U1. 28.6.2023

KLÍČOVÁ, B. aj. *Ověření vlastností UV robotického systému pro aplikace ve zdravotnických zařízeních* [funkční vzorek]

KUKAČKA, L. aj. Brightness Matching Experiments With Pulsed Light: Experiment Design *IEEE Transactions on Industry Applications* 1. vyd. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021, roč. 57, č. 1. S. 1105 – 1112. ISSN: 0093-9994.

BÍLEK, P., HORÁK, M., JANDURA, P., MACH, O., RICHTER, A. aj. Design of an ice detector for electric tramways *2021 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM)* Liberec: IEEE, 2021 S. neuvedeny (6 stran). ISBN: 978-153861757-1.

BÍLEK, P., MACH, O., KRČMÁŘ, L. a JANDURA, P. *Řídicí jednotka vozidla do autonomní elektrické platformy* [funkční vzorek]

ČECH, J., VÁCLAVÍK, J., MACH, O., DOLEČEK, R., PLESTIL, J. aj. Robust System for Hyperspectral Imaging in the LWIR Spectral Region with Uncooled Thermal Detector *Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing, Evolution in Remote Sensing* IEEE, 2021 S. neuvedeny (4 stranky). ISBN: 978-1-6654-3601-4, ISSN: 2158-6276.

MACH, O., EICHLER, J. a KRČMÁŘ, L. Electronics and software structure of BMS with circuits of BQ769x0 series *Proceedings of the 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika* IEEE, 2020 S. 262 – 265. ISBN: 978-1-7281-5602-6.

KUKAČKA, L., MACH, O., SCHREIBER, R., MAZAČ, M., DUPUIS, P. aj. Brightness Matching Experiments with Pulsed Light: Experiment Design *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2019* 1. vyd. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019 S. neuvedeny (5 stran). ISBN: 978-153864539-0.

MACH, O., KRČMÁŘ, L. a ČERNOHORSKÝ, J. Laser Guidance System for Automated Material Distribution in the Industrial Environment *Proceedings of the 2019 20th International Carpathian Control Conference, ICC 2019* 1. vyd. Kraków - Wieliczka: IEEE, 2019 S. neuvedeny (6 stran). ISBN: 978-172810701-1.

ČERNOHORSKÝ, J., MACH, O. a KRČMÁŘ, L. Design and Efficiency Mapping of an Electric Drive for Mobile Robotic Container Platform for Use in Industrial Halls *SPEEDAM 2018 - Proceedings: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion* 1. vyd., 2018 S. 963 – 967. ISBN: 9781538649411.

ČERNOHORSKÝ, J., JANDURA, P. a MACH, O. Mobile Robot Localization and Object Description *Proceedings of the 2017 18th International Carpathian Control Conference (ICC)* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017 S. 503 – 506. ISBN: 978-150904862-5.