



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Design elektroniky BMS pro trakční baterie elektrokol

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Jan Zlámaný**

Vedoucí práce: Ing. Pavel Jandura, Ph.D.





Zadání diplomové práce

Design elektroniky BMS pro trakční baterie elektrokol

Jméno a příjmení: Bc. Jan Zlámaný
Osobní číslo: M18000172
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Mechatronika
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: 2020/2021

Zásady pro vypracování:

1. Pokračujte v testování zvoleného BMS IC na vývojovém kitu s reálnou lithiovou baterií.
2. Dokončete vlastní obvodový návrh elektroniky BMS a navrhnete desku plošného spoje.
3. Návrh oživte a naprogramujte firmware pro řídicí mikrokontrolér BMS.
4. Oživte i vhodnou komunikační sběrnici a naprogramujte možnost vyčítání dat i konfigurace BMS z nadřazeného systému.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
40–50
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] ANDREA, Davide. *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston: Artech House, [2010]. ISBN 978-1608071043.
- [2] PLETT, Gregory L. *Battery management systems. Volume I, Battery modeling*. Boston: Artech House, [2015]. ISBN 978-1-63081-023-8.
- [3] WEICKER, Phillip, [2014]. *A systems approach to lithium-ion battery management*. Boston: Artech House. ISBN 978-1608076598.
- [4] ZÁHLAVA, Vít, 2010. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [5] ZLÁMANÝ, Jan, 2019. *Návrh elektroniky BMS pro trakční baterie elektrokol*. Liberec. Semestrální projekt. Technická univerzita Liberec.

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Jandura, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

9. října 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

17. května 2021

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 9. října 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

23. 5. 2021

Bc. Jan Zlámaný

Abstrakt

Náplní diplomové práce byl návrh bateriového managementu s naprogramováním algoritmu a jeho zprovozněním, jenž probíhalo na základě zpracované rešerše lithium-iontových baterií a jejich parametrů. Koncept byl uskutečněn deskou plošných spojů a vytvořením konfigurační aplikace. V závěru je realizováno měření a porovnání navrženého bateriového managementu s již existujícím řešením. V poslední fázi testování byl systém implementován na sestavené elektrokolo.

Klíčová slova: Lithiové baterie, bateriový management, AFE obvody, balancování.

Abstract

The main aim of this diploma thesis was the design of battery management with programming algorithm and its commissioning, which were based on the processed research of lithium-ion batteries and their parameters. The concept was made by printed circuit boards and the configuration of the application. In conclusion, the measurement and comparison of the proposed battery management with the already existing solution was carried out. In the last phase of testing, the system was implemented on an assembled electric bicycle.

Keywords: Lithium battery, battery management system, AFE circuits, balancing.



Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlovi Jandurovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, za veškerý čas, který mé práci věnoval, a také za odborné vedení při zpracování této diplomové práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým blízkým za podporu při studiu a psaní této diplomové práce.



Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Seznam zkratk	12
Seznam použitých veličin a jednotek	14
Úvod	15
Cíle práce	15
1 Úloha bateriového managementu	16
1.1 Základní vlastnosti	16
2 Základy Lithium-iontových baterií	17
2.1 Konstrukce Lithium-iontového článku	17
2.1.1 Cylindrické články	19
2.2 Používané technologie lithiových článků	20
2.2.1 Katodové materiály	20
2.2.2 Anodové materiály	21
2.3 Obvodové zapojení elektrochemických článků	24
3 Napětí baterie a její parametry	25
3.1 Náhradní obvod lithium-iontového článku	26
3.2 Parametry baterie	27
3.3 Vliv teploty na akumulátor	29
3.4 Metody pro odhad SoC	30
3.5 Metodika snímání proudu	31
3.6 LFP vs NMC	33
4 Nevyváženost článků a její důsledky na akumulátory	34
4.1 Balancování	36
4.1.1 Aktivní	36
4.1.2 Pasivní	37
4.2 Důsledky nevyváženosti článků akumulátoru	38
4.2.1 Životnost a kapacita baterie	38
5 Bezpečnost	40
5.1 Norma UL1642	41
5.1.1 Overcharge	42



5.1.2	Short circuit	42
5.1.3	Impact	42
5.1.4	Crush	42
5.1.5	Hot oven	42
6	Definice zadání, analýza dostupných řešení a jejich testování	43
6.1	Definice zadání	43
6.2	Dostupná řešení BMS	44
6.2.1	BMS 10S 20A LLT ELECTRONIC	44
6.2.2	TinyBMS s516	45
6.2.3	Daly BMS	45
6.3	Požadované funkce BMS	47
6.4	Parametry BMS	48
6.5	Návrh blokového schématu	48
7	Realizace a návrh DPS	50
7.1	Charakteristika klíčových komponent	50
7.1.1	Layout PCB	58
7.2	Návrh DPS	59
7.2.1	ZlamBMS	59
7.2.2	Testování a ladění chyb	60
8	Programování a popis algoritmu	63
8.1	Programování MCU	63
8.2	Uživatelské rozhraní	68
9	Testování a porovnání BMS	72
9.1	Porovnání výsledků	73
9.2	Zhodnocení naměřených dat	75
9.3	Možnosti dalšího vývoje	76
9.4	Dosažené výsledky	77
	Závěr	78
	Seznam použitých zdrojů	82
	Přílohy	82
	A Obsah přiloženého CD	83
	B PCB dokumentace	84



Seznam obrázků

1.1	Bateriový management	16
2.1	Konstrukce cylindrického článku [3]	18
2.2	Konstrukce pouch článku [4]	18
2.3	Konstrukce prizmatického článku [5]	19
2.4	Charakteristiky Li-ion článků	22
2.5	Vybíjecí charakteristiky dle složení katody	23
2.6	a) sériová kombinace b) paralelní kombinace c) první sérioparalelní kombinace d) druhá sérioparalelní kombinace	24
3.1	RC obvod [16]	26
3.2	Grafické zobrazení SoC [20]	27
3.3	Grafické zobrazení DoD	28
3.4	Grafické zobrazení SoH - degradace vlivem C	28
3.5	Bočník a Hallův senzor	32
3.6	Ukázka naměřených charakteristik LFP a NMC	33
4.1	Chtěný a nechtěný stav napětí baterie	34
4.2	Základní obvodové zapojení aktivního balancování [21]	36
4.3	Základní obvodové zapojení pasivního balancování [21]	37
4.4	Nevyvážené články	38
4.5	Riziko přepětí	39
4.6	Riziko podpětí	39
5.1	Bezpečnost celé baterie, převzato z [6]	40
5.2	Výsledky testování článku normou UL1642	41
6.1	20A LLT ELECTRONIC	44
6.2	TinyBMS s516	45
6.3	Daly BMS	45
6.4	Blokové schéma	48
6.5	TI BQ76930EVM	49
7.1	DC/DC stepdown 3V3 a 5V	51
7.2	Bočník a jeho obvodové zapojení	52
7.3	BQ76930 a obvodové zapojení	53
7.4	Balancování 2 článků	54



7.5	Zapojení MCU a jeho periférií	55
7.6	Schéma zapojení FET	56
7.7	Schéma zapojení LED diod	57
7.8	Rozvržené komponenty na PCB	58
7.9	ZlamBMS v1	59
7.10	Zapojení baterie ke ZlamBMS	60
7.11	Úpravy PCB	60
7.12	ZlamBMS v2	61
8.1	Pinout SWD sběrnice JTAG	63
8.2	Hlavní vývojový diagram	64
8.3	Monitorování napětí, proudu a výpočet SoC	65
8.4	Vývojový diagram - 2	66
8.5	Vývojový diagram - logaritmus balancování	67
8.6	Pinout SWD sběrnice UART	68
8.7	Převodník CP2102 USB - UART	68
8.8	GUI - úvodní obrazovka	69
8.9	GUI - nastavení	70
8.10	GUI - graf pro vykreslení vybíjecí/nabíjecí charakteristiky	71
8.11	GUI - konzole	71
9.1	Pracoviště pro měření nabíjecích/vybíjecích charakteristik	72
9.2	Počáteční stav před testem 10 cyklů	73
9.3	Vybíjení 2A do úplného minima - 10.cykly	73
9.4	Nabíjení 2A do úplného maxima - 10. cyklus	74
9.5	Elektrokolo s připojenou ZlamBMS	77
9.6	BMS TOP	84
9.7	BMS Bottom	85
9.8	Umístění součástek PCB	86



Seznam tabulek

2.1	Shrnutí technologií lithium-iontových článků	22
2.2	Parametry a vlastnosti elektrochemických článků	23
3.1	Výhody/nevýhody základních metod určování SoC	31
3.2	Porovnání technik měření proudu	32
4.1	Porovnání technik balancování	38
6.1	Porovnání existujících řešení BMS	46
7.1	Porovnání navrženého bateriového managementu s komerčním řešením	62
9.1	Výsledky měření	74



Seznam zkratek

ADC	Analog-to-digital converter; převod spojitého signálu na diskrétní
ARM	Advanced RISC Machines; mikroprocesorová architektura
BMS	Battery Management System; bateriový management
BPS	Bytes Per Second; jednotka baudrate
CFET	Charge FET; tranzistor s efektem nábojového pole
CAN	Controller Area Network; komunikační sériová sběrnice
CID	Current Interrupt Device; bezpečnostní prvek chemického článku
CC	Coulomb counter; metoda pro odhad SoC
CHG	Charge; nabíjení
CPU	Central processing unit; centrální procesorová jednotka
DFET	Discharge FET; tranzistor s výbojovým polem
DC	Direct Current; stejnosměrný elektrický proud
DoD	Depth of Discharge; výraz popisující stav vybití akumulátoru
DPS = PCB	Printed Circuit Board; deska plošného spoje
DAC	Digital-to-Analog; převod diskrétního signálu na spojitý.
DSG	Discharge; vybíjení
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory; elektricky mazatelná nevolatilní paměť typu ROM-RAM
ESS	Energy Storage System; energetická úložiště
FET	Field Effect Transistor; tranzistory řízené elektrickým polem
GUI	Graphical User Interface; grafické uživatelské rozhraní
GND	Ground; zkratka uzemnění v elektronice
HW	Hardware; elektronické komponenty
I2C	Inter-Integrated Circuit; komunikační sériová sběrnice
IC	Integrated circuit; integrovaný obvod
I/O	Input/output; vstup/výstup
JTAG	Joint Test Action Group; programovací konektor procesoru
Li-ion	Lithium-Ion technology; lithium-iontová technologie elektrochemického článků
LCO	Lithium Cobalt Oxide; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LMO	Lithium Manganese Oxide; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LFP	Lithium Iron Phosphate; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LTO	Lithium Titanium Oxide; aktivní materiál anody Li-Ion článku
LDO	Low-dropout regulator; regulátor DC napětí
LED	Light Emitting Diode; světelná dioda
MCU	Monitor Control Unit; monitorovací řídicí jednotka
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide; aktivní materiál katody Li-Ion článku
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide; aktivní materiál katody Li-Ion článku
NCV	Nominal Charging Voltage; nominální nabíjecí napětí



NTC	Negative Temperature Coefficient; negistor - termistor s negativním teplotním koeficientem
NRST	JTAG I/O; resetovací pin mikroprocesoru
OCD	Overcurrent in Discharge; nadproud při stavu vybíjení
OCV	Open Circuit Voltage; rozdíl elektrického potenciálu při nezatěžovaném obvodu
OV	Overvoltage; přepětí
PTC	Positive Thermal Coefficient; čidlo teplotního koeficientu chemického článku
PC	Personal Computer; osobní počítač
POUCH	Pouch cell; články s měkkým obalem
RC	Radio Control; rádiem řízený (model)
RTC	Real-time clock; hodiny reálného času
SoC	State Of Charge; výraz popisující stav nabití akumulátoru
SoH	State of Health; výraz popisující celkový stav akumulátoru
SMD	Surface Mounted Device; elektronická součástka pro povrchovou montáž na DPS (PCB)
SCD	Short Circuit in Discharge; zkrat při stavu vybíjení
SCL	Synchronous Clock; hodinový signál I2C
SDA	Synchronous Data; datový signál I2C
SWD	Serial Wire Debug; rozhraní JTAG využívající SWDIO a SWCLK
SMBUS	System Management Bus; dvou vodičová sběrnice odvozená od I2C
TI	Texas Instrument; společnost zabývající se návrhem a výrobou polovodičů
TDI	JTAG I/O; programovací výstup JTAG
TDO	JTAG I/O; programovací výstup JTAG
TCK	JTAG I/O; programovací výstup JTAG
TMS	JTAG I/O; programovací výstup JTAG
UV	Undervoltage; podpětí
UPS	Uninterruptible Power Supply; záložní zdroj
USB	Universal Serial Bus; univerzální sériová sběrnice
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter; sběrnice sloužící k asynchronnímu sériovému přenosu dat
VBAT, VDD(A)	Voltage Supply; zdroj napětí
VSS(A)	Ground Supply; GND - uzemnění



Seznam použitých veličin a jednotek

symbol	popis veličiny	jednotka
I	elektrický proud	[A]
C_{batt}	kapacita článku	[Ah]
U	elektrické napětí	[V]
R	elektrický odpor	[Ω]
W	energie uložená v akumulátoru	[Wh]
m	hmotnost	[kg]
C_{cap}	elektrická kapacita	[F]
Q	elektrický náboj	[C]
T_0	teplota	[$^{\circ}$ C]
F	síla	[N]
V	objem	[m^3]
f	frekvence	[Hz]
E	energie	[J]
T	absolutní teplota	[K]
V_{OC}	zdroj napětí	[V]
L	délka	[m]
P	tlak	[Pa]
P	výkon	[W]
L	indukčnost	[H]
V_{diff}	hodnota tolerance rozbalancování	[mV]
U_{min}	napětí článku s nejnižším napětím	[V]
$V_{balancing}$	počáteční napětí pro balancování	[V]
U_{max}	maximální napětí článků (OV)	[V]
T_s	vzorkovací perioda	[s]
τ_0	časová konstanta	[s]
R_{ja}	tepelný odpor přechod - okolní prostředí	[$^{\circ}$ C/W]
$R_{ds(on)}$	odpor MOSFET mezi D a S při sepnutí	[Ω]
C	poměr zatížení baterie proudem, vztažený k její nominální kapacitě	[$I \cdot t$]
R_p	plynová konstanta	
A	exponenciální faktor týkající se četností kolizí částic	



Úvod

Cíle práce

Práce si klade za cíl přehledně a uceleně představit problematiku bateriového managementu a následně vytvořit plně funkční prototyp fungující s reálnou lithium-iontovou baterií. V obecné části práce tak bude podrobně popsána úloha bateriového managementu, její současný stav a vliv balancování na akumulátor.

Jedním z hlavních úkolů bude návrh bateriového managementu a jeho následná realizace vytvořením DPS osazeným vhodně zvolenými komponentami. Po připojení k baterii nesmí v žádném případě dojít k opuštění výrobcem povolených napěťových, proudových i tepelných rozmezí akumulátoru, neboť by mohlo dojít k poškození. Proto je nutné nabíjecí a vybíjecí cykly co nejpřesněji monitorovat.

V její další fázi je nutné naprogramovat vhodný software pro řízení komponent na BMS PCB za pomoci mikrokontroléru a následně zprovoznit BMS pro reálné využití.

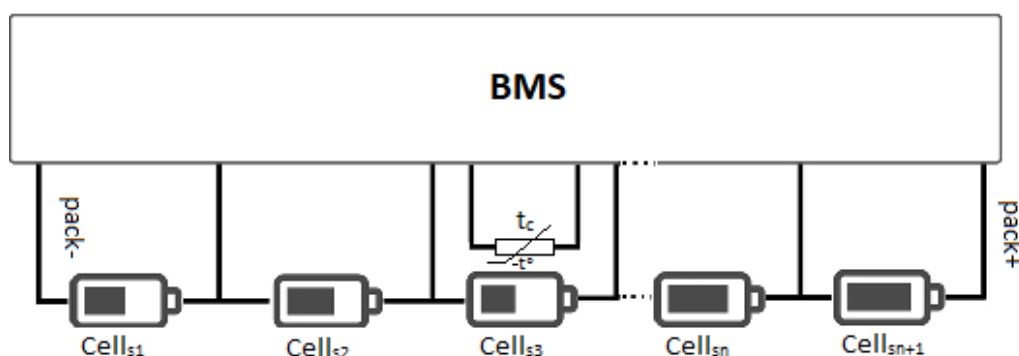


1 Úloha bateriového managementu

Základním úkolem BMS je zajistit optimální využití energie baterie a minimalizovat rizika, která mohou poškodit baterii. Bateriový management se tak stará o baterii, hlídá její napětí, proudy, teploty a pracovní oblast, ve které se musí baterie pohybovat. V případě nebezpečí je jejím úkolem odpojit baterii od připojené zátěže nebo nabíječky. Její další funkcí je vyrovnávat napětí na jednotlivých článcích a tím zaručit dlouhou životnost baterie.

1.1 Základní vlastnosti

- Ochrana proti přepětí, podpětí,
- nadproudová ochrana,
- balancování jednotlivých článků baterie pasivní či aktivní metodou,
- hlídání teplot pomocí teplotních čidel,
- komunikace s ostatními jednotkami/spotřebiči,
- přizpůsobení provozu spotřebiče stavu baterie,
- monitoring okamžitého stavu/vlastností baterie.



Obrázek 1.1: Bateriový management

2 Základy Lithium-iontových baterií

Lithium-iontové baterie pracují se stejnými elektrochemickými základy jako všechny ostatní baterie, je ale nutné vzít v úvahu několik důležitých rozdílů. Lithium-iontový bateriový článek neobsahuje žádné kovové lithium, jak by mohlo z názvu vyplynout. Tento fakt významně zvyšuje bezpečnost článku a mnohonásobně zlepšuje možnost článku cyklovat. Články mají ve srovnání s jinými typy baterií velmi nízkou míru samovybíjení [1][2]. Nemají žádný paměťový efekt, což znamená, že uživatelé je mohou nabíjet a vybíjet mnohem flexibilněji. Dokáží obecně nabídnout velmi vysokou Coulombickou účinnost v celém pracovním rozsahu. Lithium-iontový článek má elektrolyt složený z organických rozpouštědel, která jsou hořlavá a v případě nehody dokáží vyvinout vysoký tlak plynováním do uzavřeného prostoru pouzdra článku [2]. Hořlavost a vysoká reaktivita těchto elektrolytů představují vážnější nebezpečí než se vyskytuje u jiných typů baterií.

2.1 Konstrukce Lithium-iontového článku

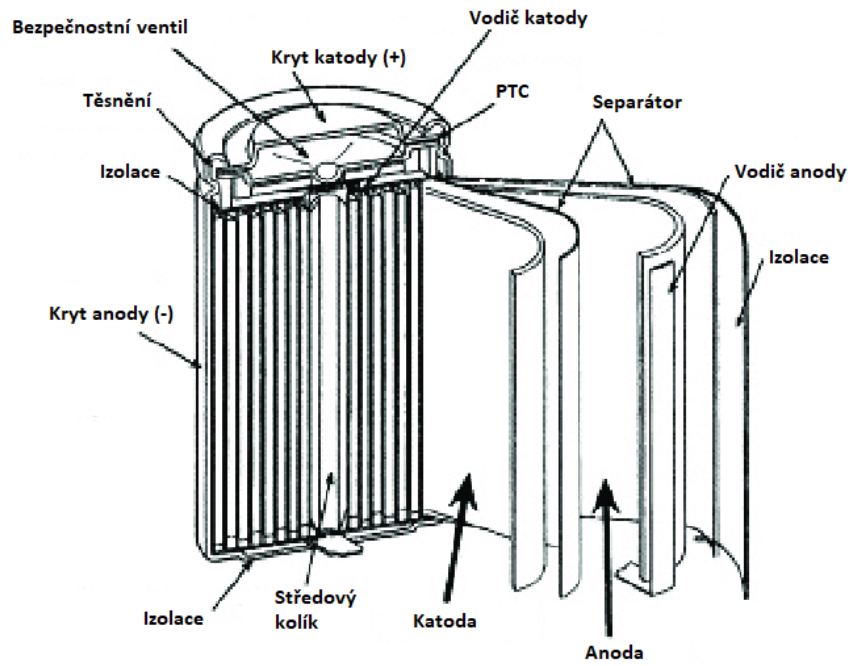
Lithium-iontové články se vyrábí v různých velikostech a tvarech, kde lze rozdělit tyto mechanické konstrukce do tří skupin:

- cylindrické články,
- pouch články,
- prizmatické články.

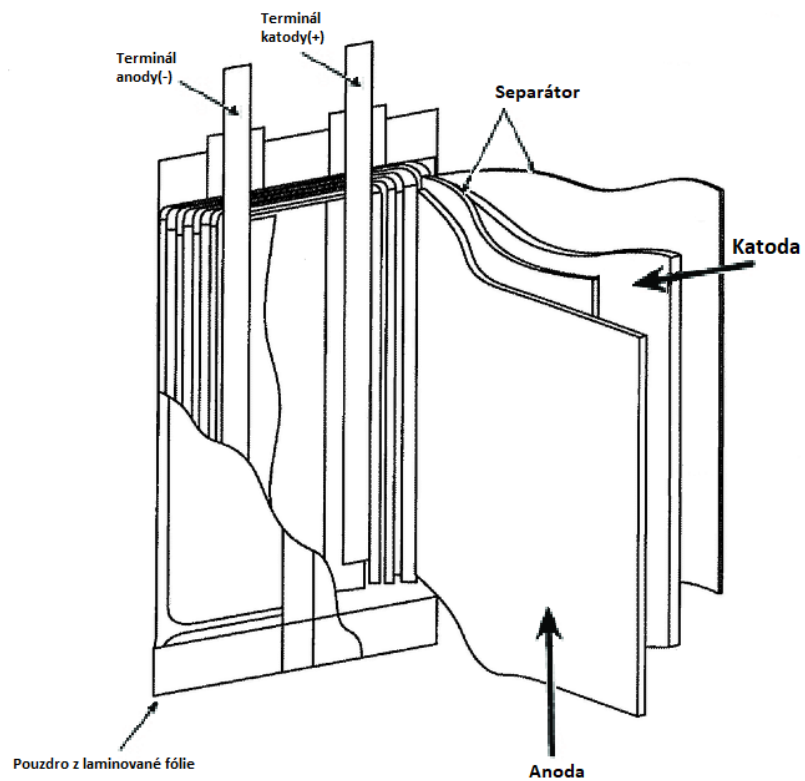
Tyto mechanické konstrukce se uvnitř skládají z identických částí:

- kladná elektroda,
- záporná elektroda,
- elektrolyt,
- separátor,
- proudové kolektory - výstupní terminály,
- pouzdro, ve kterém jsou jednotlivé komponenty uschovány.

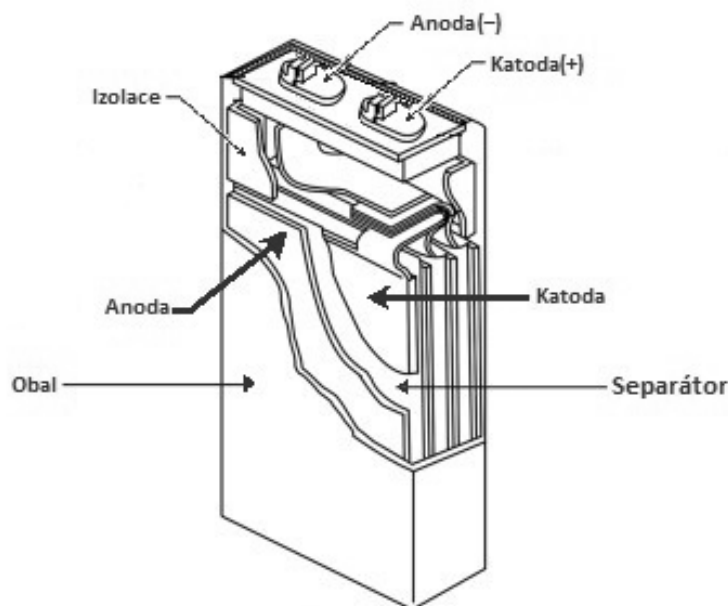




Obrázek 2.1: Konstrukce cylindrického článku [3]



Obrázek 2.2: Konstrukce pouč článku [4]



Obrázek 2.3: Konstrukce prizmatického článku [5]

Podrobněji zde budou popsány cylindrické články, které jsou použity v této práci.

2.1.1 Cylindrické články

Vnější pouzdro baterie je vyrobené z kovu, tím se rozumí ocel s povrchovou úpravou niklováním, které tvoří jednak ochranu proti vnějším vlivům a zároveň umožňuje snadné sváření článků odporovou metodou, respektive pájením. Dalším používaným kovovým materiálem je hliník, který se ale obtížněji vodivě spojuje (je k tomu zapotřebí náročnějších a dražších metod, jako je například laser). Toto kovové pouzdro pojme dlouhou spirálu skládající se ze tří tenkých fólií stlačených k sobě. Jedná se o kladnou elektrodu, zápornou elektrodu a separátor [2][1]. Uvnitř pouzdra je tato spirála nasycena v organickém rozpouštědle, která působí jako elektrolyt. Obecně se jako elektrolyt používá lithná sůl. Separátor je velmi tenký plát mikroperforovaného plastu, který odděluje kladnou a zápornou elektrodu a umožňuje průchod iontů. K ochraně proti přetlakům slouží bezpečnostní ventil, který v případě velkého zahřátí baterie uvolní přetlak a zabráni tak případné explozi baterie [2][1]. V případě otevření ventilu je tu ale možné riziko vzplanutí, za což mohou uvolněné látky, které bývají hořlavé, hlavně pak elektrolyt [6]. V případě, že baterie již tento proces podstoupila, je nutné jí vyřadit z provozu, neboť je tento ventil pouze jednorázovým bezpečnostním opatřením [1].

Jiná bezpečnostní zařízení se aktivují zvýšeným vnitřním tlakem, jako je například zařízení pro přerušení proudu (CID). Zařízení CID elektricky izoluje jednu z elektrod, tím zabrání protékání proudu v článku [7][8].

Další možnou ochranou může být PTC, které brání přehřátí baterie. Při dosažení zvýšených proudů nad limit dojde k zahřátí PTC, zvýšení jeho odporu, tím se navenek zvýší vnitřní odpor článku, a omezí se procházející proud. Tato ochrana je

vratná, tzn. po odeznění nadproudu dojde ke zchladnutí PTC a snížení jeho odporu na velmi nízkou hodnotu. Problémem u PTC je odpor v klidovém stavu, který se připočítává k vnitřnímu odporu článku, tím zhoršuje její vlastnosti a k tomu navíc hřeje v těsné blízkosti teplotně citlivých materiálů, proto se již do článků často nepřidávají [7][9].

2.2 Používané technologie lithiových článků

U kladné elektrody jsou nejpoužívanější principy založeny na prvcích kobaltu, niklu, manganu, hliníku, fosforu. V případě záporné elektrody patří mezi nejpoužívanější vybraná forma uhlíku, dnes se stále vyšší příměsí křemíku [2][1][10][3].

Je však důležité si uvědomit, že výběr jak anodových, tak katodových materiálů, jakožto i u dalších prvků v obou elektrodách, mají významný dopad na parametry baterie. Kolektory záporných elektrod bývají nejčastěji měděné folie, na které se nanášejí elektrodové materiály. Je tedy nutné vždy rozhodnout, jaká chemie či technologie bude vhodná pro dané využití. V následujícím textu je kladen důraz především na použití u malé městské mobility. Jedná se tedy o baterii s maximální energií 1 kWh a napětím do 60 V. Je potřeba zdůraznit, že se technologie neustále vyvíjejí kupředu, a za pár let lze očekávat jiné možnosti.

2.2.1 Katodové materiály

LCO Lithium-cobalt-oxid nabízí velmi vysokou hustotu energie. LCO je méně stabilní než jiné materiály a je velmi citlivý na vysoké teploty a přebíjení. Jedny z prvních lithiových článků byly založeny právě na této technologii. Jako surovina má LCO vyšší cenu na kilogram jednotky běžných katodových materiálů, pokud je ale zohledněna její vysoká hustota energie, poté může vést k nižším nákladům na Wh než u jiných chemických materiálů. Články tohoto typu jsou postupně zaměňovány za technologii NMC a NCA [1][21].

NMC Kombinací oxidů niklu, manganu a kobaltu pro materiál katody vznikl chemický typ baterie NMC. Tato varianta je díky svému velkému celkovému výkonu, vynikající měrné energii a nejnižší možné míře zahřívání preferovanou volbou pro využití v hybridních a elektrických vozidlech. Spolu s NCA patří mezi nejvíce využívanou chemii na trhu vozidel, jelikož se řadí mezi nejvýhodnější akumulátory s nejlepším poměrem ceny a výkonu. Poměr NMC lze v různých formulacích měnit, ale základní variantou všech tří složek je množství v poměru 1-1-1 označovanou jako NMC-333. Dnes se již více využívají poměry NMC-532, NMC-622 a NMC-811, důvodem je snaha maximálně omezit množství drahého kobaltu [10].

NCA Lithium-nikl-kobalt-oxid hlinitý je využíván hlavně pro speciální aplikace. Jak NMC tak i NCA nabízí vysokou hustotu energie, poměrně dobrý výkon



a dlouhou životnost. Nevýhodou tohoto chemického typu je vyšší cena a bezpečnost. Jedná se o konkurenci NMC, která se u elektrovozidel používá [1]. NCA články proslavila hlavně společnost TESLA, která tuto technologii využila do svých elektrických vozidel (Tesla model S a model X). Jedná se tedy o variantu využívanou v elektromobilitě, a tedy i nejvhodnějšího kandidáta pro stavbu bateriového packu pro elektrokolo spolu s NMC.

LMO/LNMO Lithium-mangan-oxid nebo Lithium-nikl-manganový spinel má nejvyšší katodové jmenovité napětí z nejčastěji dostupných katodových materiálů, díky čemuž je napětí na článku pro manganové katody velmi vysoké, a v plně nabitém stavu mohou dosahovat až 5 V [10]. Díky nízké impedanci mohou elektrody složené z manganu poskytovat vysoký výkon, ale naopak v závislosti na dnešní dostupné výrobní technologii trpí nižší životností, tedy projdou menším počtem cyklů zejména při zvýšených teplotách z důvodu ztráty kapacity – ke ztrátě kapacity dochází v důsledku rozpuštění manganu na elektrolyt [1].

LFP Fosforečnan-železitý-lithný obsahuje fosfát jako katodový materiál. LFP nabízí dobrý elektrochemický výkon s nízkým odporem. Klíčovým přínosem tohoto chemického typu je vysoký proudový výkon, dlouhá životnost, dobrá tepelná stabilita a zvýšená bezpečnost v případě dosažení hodnot mimo tolerance napěťového rozsahu [11][10]. Jedna z nevýhod těchto článků je signifikantně nižší energetická hustota. Co se týče pouzdra 18650 u LFP je k roku 2021 maximální jmenovitá kapacita 1800 mAh [12]. Pokud se vezme v úvahu energie 4,8 Wh v porovnání s konkurenčními akumulátory jako například s článkem LG M36 (NCA technologie) s nominální kapacitou 3350 mAh a energií 12,5 Wh [13], jedná se tak o články se stejným rozměrem a váhou. Dnes se tyto neduhy pomalu zlepšují a dávají článku LFP nový význam v oblasti elektromobility.

2.2.2 Anodové materiály

Grafit Grafit je jednou z krystalických forem uhlíku, kde uhlík tvoří jak krystalickou, tak i amorfni formu. Jedná se dnes o nejpoužívanější materiál pro aktivní elektrodovou hmotu záporné elektrody lithium-iontových akumulátorů, a to díky dobré vodivosti proudu, nízké změně objemu při vybíjení či nabíjení a nízké ceně. Bohužel má z fyzikálních důvodů velmi omezenou kapacitu, jelikož na uložení jednoho lithiového iontu je zapotřebí „klece“ tvořené šesti atomy uhlíku [14]. Proto jsou v dnešní době zkoumány další možnosti, čím lze uhlík nahradit, například křemíkem.

Křemík Čistý křemík je vhodná varianta náhrady za uhlík, jelikož dokáže pojmout teoreticky až 10krát více lithia, tedy dokáže zvýšit kapacitu baterie téměř 10krát [1][14]. Jen jediný atom křemíku dokáže navázat až čtyři atomy uhlíku. Problém křemíku však spočívá v tom, že křemíkové elektrody mají nepříjemné tendence při cyklování se rozpínat, a tím mohou potřhat strukturu anody. Většina dnešních moderních článků používá pouze jeho příměs, který způsobí

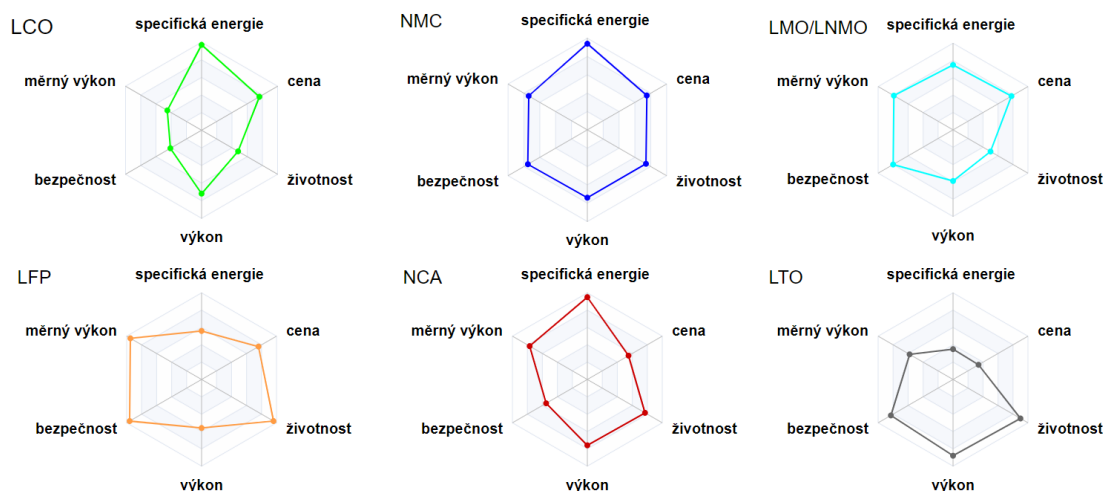


v minimálním množství nepatrnou změnu objemu, a tím se dokáže článku zvýšit kapacita o několik procent bez potrhání anody. Používá se u článků NMC či NCA. Obecně platí čím více křemíku, tím lépe z hlediska energetické hustoty a ceny.

LTO Lithium-titaničitan lze nabíjet a vybíjet vysokými proudy začínajícími na 10násobku kapacity článku (10 C), z čehož plyne i vysoká rychlost nabíjení. Další silnou stránkou této technologie je dlouhá životnost udávající minimálně 5000 cyklů, bezpečnost a provozní teploty od -30 °C až do +60 °C [11][15]. Mezi nevýhody se zde řadí malá energetická hustota a velmi nízké napětí článku při jejím plném vybití (1,8 V).

Tabulka 2.1: Shrnutí technologií lithium-iontových článků

Technologie	Gravimetrická hustota energie [Wh/kg]	Využití
LCO	150-240	osobní elektronická zařízení (mobilní telefony, notebooky, fotoaparáty), drony
NMC	150-300	emobilita, ESS
NCA	200-300	emobilita, elektrické nářadí
LMO/LNMO	100-150	emobilita, hybridy, speciální přístroje
LFP	90-120	emobilita, ESS, přímá náhrada Pb baterií
LTO	50-80	speciální aplikace s vysokým výkonem a širokým rozsahem provozních teplot



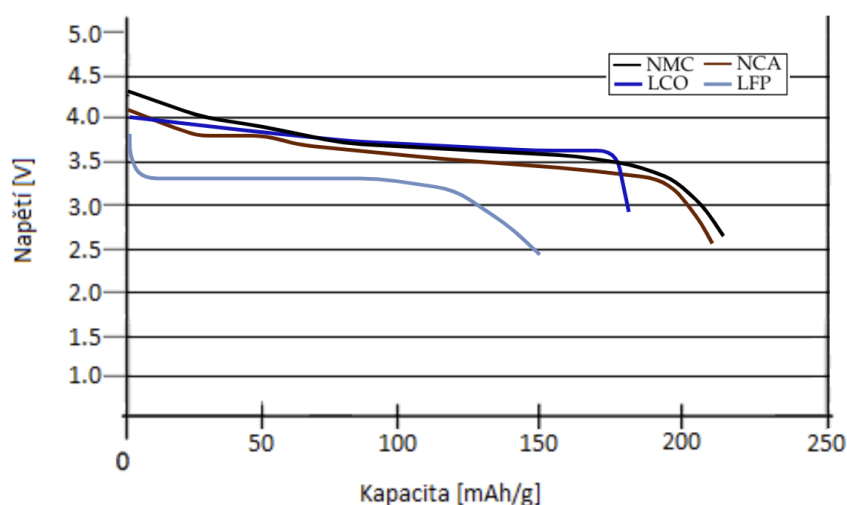
Obrázek 2.4: Charakteristiky Li-ion článků

Obecně nelze mít článek, který má všechno najednou, ale pokud se spojí jednotlivé chemie, tak lze docílit výhod - větší energetická hustota a velký výkon. Vždy se však stále jedná o tu samou technologii, jen s přidaným materiálem či chemií. U článků se sledují z jejich praktického využití i mnohé další parametry:

Tabulka 2.2: Parametry a vlastnosti elektrochemických článků

Veličina	Popis
gravimetrická hustota energie	množství energetického výkonu na jednotku hmotnosti. Je udávána v Wh/kg
objemová hustota energie	představuje množství energie baterie ve Wh na jednotku objemu. Uvádí se ve Wh/l
nabíjecí proud	hodnota proudu a doba nabíjení
elektrický výkon	množství energie, které je článek schopen dodat za jednotku času
vnitřní odpor	velikost odporu článku při průchodu elektrického proudu
účinnost	podíl vydané a dodané energie
cyklus	počet cyklů nabití/vybití do konce životnosti

V případě elektrokola je vhodné volit technologii podle objemové hustoty energie již z důvodu maximálně využitelného prostoru, kde je vhodné mít co největší možnou uloženou energii.

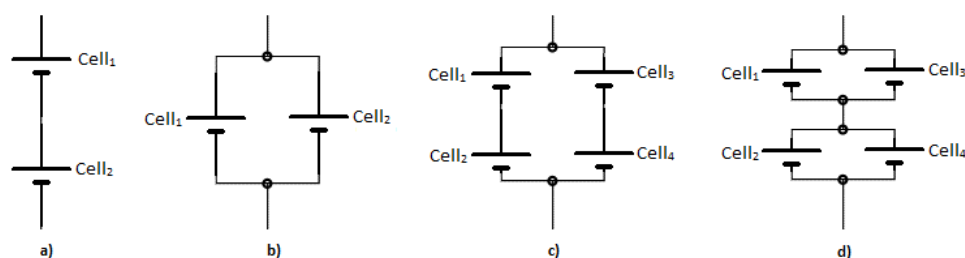


Obrázek 2.5: Vybití charakteristiky dle složení katody

Je důležité zmínit, že metody na bázi měření OCV a znalosti tabulky (průběhu) jsou LFP z hlediska určování SoC velmi problematické, naopak u NCA a NMC funguje tato metoda velmi dobře. Této problematice je věnována samostatná kapitola 3.1 a 3.4. Chemií je v dnešní době velký počet, a každá se dá upravit pro konkrétní aplikaci, proto vybrat tu správnou technologii pro konkrétní zadání může být náročné.

2.3 Obvodové zapojení elektrochemických článků

V případě použití jednoho článku pro většinu aplikací není napětí a kapacita samotného článku dostačující, a proto je nutné zapojení do sérioparalelní kombinace. Zapojením článků sériově docílíme vyššího napětí, pokud je ale článek zapojen v paralelním zapojení, dojde v tomto případě ke zvýšení kapacity, nabíjecího a vybíjecího proudu. Nejčastěji se proto tato zapojení kombinují pro dosažení maximální kapacity, napětí, energie a nabíjecího i vybíjecího proudu. V případě sérioparalelní kombinace je zvykem baterii označit $ySzP$, kde y je počet sériově a z počet paralelně zapojených článků (příkladem může být 10S2P).



Obrázek 2.6: a) sériová kombinace b) paralelní kombinace c) první sérioparalelní kombinace d) druhá sérioparalelní kombinace

Na obrázku 2.6 jsou zobrazené kombinace jednotlivých článků. U obrázku a) a b) lze vidět sériovou a paralelní kombinaci. V případě obrázků c) a d) se jedná o 2 typy sérioparalelního zapojení článků, které mají totožné napětí i celkovou energii, ale liší se typem zapojení. Problém nastává, jakmile je nutné články balancovat. V případě zapojení d), stačí zapojit jeden balancovací obvod pro oba články, protože 2 paralelní články se chovají jako jeden. To pro zapojení c) neplatí, a je nutné pro každý článek zapojit vlastní balancovací obvod. Každé zapojení má své výhody i nevýhody. V případě levé strany je nutné implementovat více obvodů, ale v případě selhání jednoho z článků je možné jednu celou větev odpojit, a baterie kromě ztráty jmenovité kapacity zůstane nadále funkční. Oproti tomu obvod d) v případě selhání jednoho z článků ovlivňuje sousední článek, proto je velice pravděpodobné, že baterie nebude provozuschopná již z důvodů ztráty napětí a kapacity.

Při sestavování akumulátoru je vhodné použít články s totožnými či podobnými parametry, nejlépe ze stejné výrobní série, vyrobené nejbližší za sebou. Nicméně dva pečlivě vybrané články nejsou bezprostředně identické. V případě nových článků existují malé rozdíly způsobené výrobními tolerancemi a nepatrnými rozdíly v chemickém složení, které mohou ovlivnit stav nabití SoC, vnitřní impedanci, kapacitu, rozdílnou teplotní závislost a degradaci (stárnutí). V případě dlouhodobého použití se tyto problémy mohou prohlubovat až do úplného poklesu využitelné kapacity baterie.

3 Napětí baterie a její parametry

Jelikož je baterie složena ze sérioparalelní kombinace článků, pro ideální baterii v ideálních podmínkách platí

$$U_{Celkem} = n \cdot U_b \quad (3.1)$$

kde napětí U_{Celkem} je celkové napětí baterie, n se rovná počtu sériově zapojených článků a U_b je napětí jednoho článku. Jinými slovy je celkové napětí baterie dáno napětím článku vynásobeného počtem článků.

Tento vztah by platil ale pouze tehdy, když by byla všechna napětí článků stejná. Ve skutečnosti jsou i nové články odlišné, jak bylo charakterizováno výše. Každý článek má odlišné napětí, tzn. mezi každým článkem jsou napětové rozdíly. Pro přesnější charakteristiku je vhodný vzorec

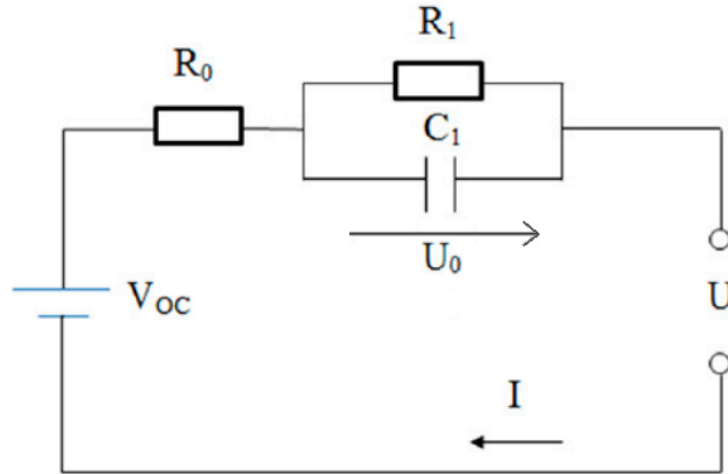
$$U_{Celkem} = \sum_{i=1}^n U_b[i] \quad (3.2)$$

kde n je počet sériově zapojených článků a i je index jednotlivých článků. Jelikož celkové napětí neovlivňují paralelně zapojené články, nejsou ve vzorci uvedené.



3.1 Náhradní obvod lithium-iontového článku

Na článek lze z pohledu elektrotechniky přihlížet jako na ekvivalentní model skládající se z RC prvků. Modely ekvivalentních obvodů používají obvod skládající se ze zdrojů napětí, rezistorů a kondenzátorů, které mají simulovat dynamické charakteristiky baterií. Tímto obvodem lze popsat vztah mezi napětím a proudem při provozu na samotnou baterii.



Obrázek 3.1: RC obvod [16]

Náhradní obvod Li-ion článku RC modelu prvního řádu je zobrazen na obrázku 3.1, kde V_{OC} označuje napětí lithium-iontového článku na prázdko, které se obvykle nelineárně mění s SoC. R_0 zastupuje odpor celého článku a odpor elektrolytu, R_1 označuje polarizační odpor, C_1 polarizační kapacitu, I značí proud protékající zátěží a U označuje koncové napětí baterie. Paralelní RC síť popisuje nelineární polarizační odezvu lithium-iontové baterie, tzn. $I > 0$ značí vybíjení, $I < 0$ nabíjení.

Chování modelu 2.4 může být vyjádřeno rovnicemi 2.1 a 2.2 v nepřetržitém čase [17]:

$$\dot{U}_0 = \frac{-1}{R_1 \cdot C_1} U_0 + \frac{1}{C_1} I, \quad (3.3)$$

$$U = V_{OC} - U_0 - R_0 I. \quad (3.4)$$

Popis v diskrétním čase je zobrazen rovnicemi 2.3 a 2.4.

$$U_{0,k+1} = U_{0,k} e^{-\frac{T_s}{\tau_0}} + R_1 \left(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_0}}\right) I_{k} \quad (3.5)$$

$$U = V_{OC}(SOC_k) - U_{0,k} - R_0 I_{k} \quad (3.6)$$

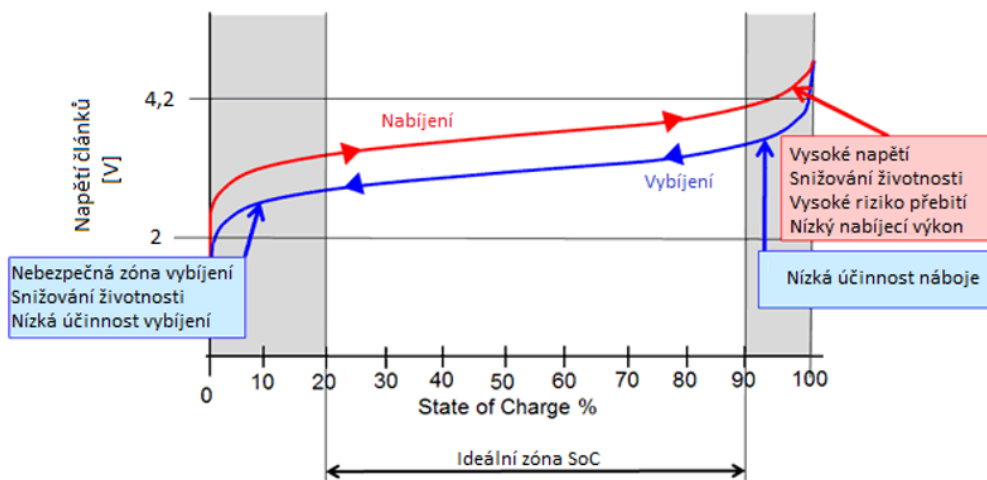
kde T_s je vzorkovací perioda a τ_0 je časová konstanta.

3.2 Parametry baterie

Jedním z nejdůležitějších parametrů baterie je SoC (State of Charge), který slouží k popisu zbývající kapacity. Obecně je SoC baterie definována jako poměr její aktuální kapacity k nominální kapacitě v procentech. Jmenovitá kapacita je dána výrobcem a představuje maximální úroveň nabití, které lze v baterii uložit.

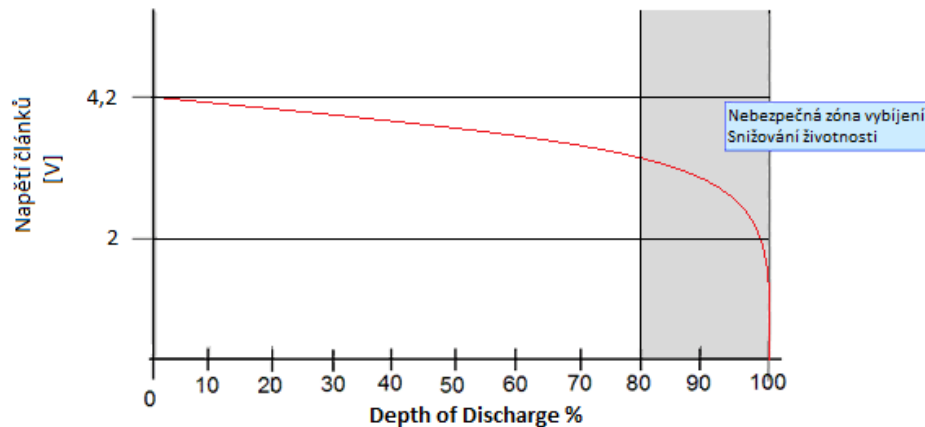
$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (3.7)$$

Kde $Q(t)$ je aktuální kapacita a Q_n je kapacita nominální. Pro zjištění stavu SoC existuje hned několik metod podle odborné literatury [18][1][19]. Nejčastěji používaná metoda je však metoda přímého měření, více v kapitole 3.1.



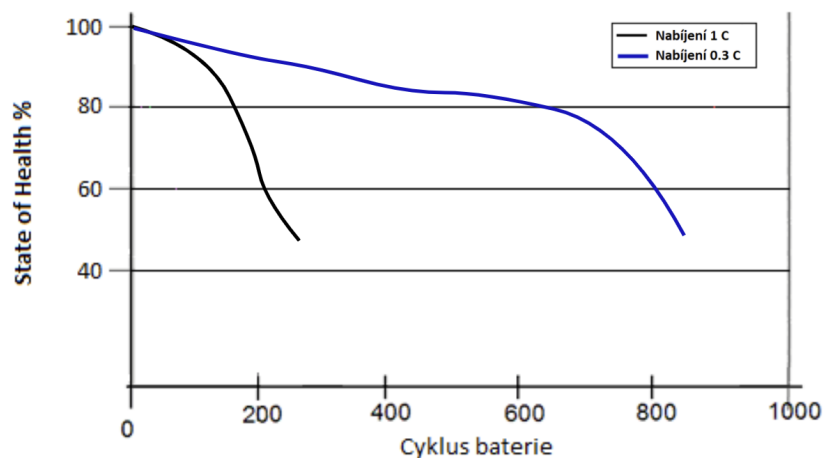
Obrázek 3.2: Grafické zobrazení SoC [20]

Provoz mimo tyto limity může mít z dlouhodobého hlediska nepříznivý vliv na životnost baterie. Dalším parametrem je DoD (Depth of Discharge), jedná se o inverzní hodnotu SoC, a znamená kolik kapacity je momentálně využito. Pokud by baterie tedy vybila svou plnou energetickou kapacitu, je hloubka vybití 100 % DoD.



Obrázek 3.3: Grafické zobrazení DoD

Stav baterie určuje z dlouhodobého hlediska SoH. Jedná se o měřítko dlouhodobé kapacity baterie a poskytuje „indikaci“, nikoli absolutní měření, kolik z dostupné celoživotní energetické propustnosti bylo spotřebováno a kolik zbývá. Typicky bude SoH baterie v době výroby 100 % a vlivem používání se bude postupně snižovat. Bere v úvahu takové faktory, jako je přijetí náboje, vnitřní odpor, napětí a samovybití [20]. Jedná se tedy o proces, který nespecifikuje výrobce, ale vztahuje se na baterii poté, co se zahájil proces vybití či nabíjení.



Obrázek 3.4: Grafické zobrazení SoH - degradace vlivem C

Existují monitorovací systémy, které umí přijímat baterie s hodnotou 50 % a vyšší, zatímco přísnější BMS mohou pracovat pouze s 90 % a výše. Obvykle jsou to systémy, které pracují s výkonovou elektronikou, kde okamžité poklesy dodávaného napětí mohou ovlivnit funkčnost obvodu. U charakteristiky obrázku 3.4 je vhodné uvést na pravou míru, že důležitým faktorem této křivky je správné využívání článku a jeho vybití vhodně nastaveným proudem. Zkrácení doby nabíjení zvyšuje nabíjecí proud, což zvyšuje teplotu baterie. Je známo, že tato dynamika je klíčovým

faktorem pro urychlení stárnutí baterie [21]. Obr. 3.4 ukazuje rychlost změny stavu SoH baterie vzhledem k rychlosti C nabití.

Provozní teploty vymezují rozsah teplot, ve kterých lze bateriový pack provozovat s parametry poskytnutými výrobcem. Příčinou změny teploty baterie mohou být vnější vlivy (tzn. zimní námrazy či vysoké letní teploty), ale také samotný provoz baterie, kdy zdrojem bývá elektrochemická reakce uvnitř baterie či nárůst proudového využití jednotlivých článků.

3.3 Vliv teploty na akumulátor

Informace na internetu a v knižních publikacích bývají často protichůdné nebo zastaralé. Informace rychle zastarávají, a nová generace článků může mít lepší teplotní parametry. Z jednotlivých publikací se lze dočíst [2][1][22][23], že univerzální dlouhodobá skladovací teplota akumulátorů je od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při vyšších teplotách do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ je maximální doba uložení 3 měsíce, a skladování do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ je povoleno pouze měsíc. Je málo informací o tom, jestli je reálné udržet tuto trvalou teplotu po dobu jednoho měsíce u elektrokola či elektromobilu. Existuje mnoho faktorů, které teplotu baterie ovlivňují. Příkladem může být například ohřev baterie provozem - zde je důležitý také teplotní management akumulátoru (aktivní či pasivní chlazení - převážně využívané pasivní chlazení či proudění vzduchu) a kvalita jednotlivých článků, které dlouhodobě zvládají i tyto vysoké teploty.

Vztah mezi velikostí samovybíjení a teplotou je dán Arrheniovou rovnicí, která charakterizuje rychlost chemické reakce na teplotě [24]:

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{R_p T}} \quad (3.8)$$

kde k je rychlostní konstanta, A je exponenciální faktor, který je konstantní pro danou chemickou reakci týkající se četností kolizí částic, E je aktivační energie reakce, R_p je univerzální plynová konstanta a T je absolutní teplota.

V průběhu nabíjení a vybíjení se vysoké množství lithiových iontů podílí velkou měrou na reakcích s elektrolytem, a tak dále zintenzivňuje tento efekt. Tento vztah tedy udává, že reakční rychlost se pro mnoho chemických reakcí zdvojnásobí při každém zvýšení teploty o $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Je potřeba také zmínit, že k samovybíjení, ač malému, dochází po celou dobu života článku, a tento fakt není závislý jen na okolní teplotě, ale i na SoC článku.

Proto je z výše uvedeného zřejmé, že je nutné pro baterii zajistit rovnoměrné rozložení tepla po celém jejím povrchu a využít všech možných dostupných prostředků chlazení všech teplo vyzařujících komponent umístěných v přímé blízkosti článků (napájecí zdroj, výkonové tranzistory, odpory, kontakty) k získání ideální možné teploty, aby byly rozdíly v samovybíjení jednotlivých článků co nejmenší, což se týká i vhodného pozicování komponent na DPS.

3.4 Metody pro odhad SoC

Odhad stavu nabití baterie SoC je důležitým hlediskem v systému administrativy baterií, který je jednou z pokročilých vlastností BMS systémů. Pro návrh odhadu SoC se vyskytuje velké množství metod, avšak jeho vyhodnocení není vůbec snadné, neboť většina těchto metod vychází z kombinací dvou nebo více algoritmů. Zde si uvedeme pouze 2 přímé metody pro zjištění stavu SoC.

Výpočet pomocí Coulombova náboje (Coulomb Counting)

V současné době se jedná o jednu z nejrozšířenějších metod. Pro určení SoC pomocí tohoto postupu se používá nabíjecí/vybíjecí proud. Integrací naměřeného proudu podle času lze získat přenesený náboj, a pokud je známa hodnota přeneseného náboje v čase začátku nabíjení/vybíjení, lze pak vyvodit stav nabití baterie. Definice SoC je následující [19]:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^{t_0+t} I_{cell} + rmd\tau \cdot 100 \% \quad (3.9)$$

kde $SoC(t_0)$ je počáteční hodnota SoC, C_n nominální kapacita a I_{cell} je hodnota průchodu proudu vybíjecího či nabíjecího.

Měření napětí naprázdno (Open Circuit Voltage)

Metody odhadu SoC založené na měření napětí na otevřeném obvodu ukládají charakteristické hodnoty OCV křivky, kde je nutná pouze znalost aktuálního napětí. Inverzní přístupy interpolují hodnoty pro dosažení hladkých průběhů nebo využívají modely článků [19][1].

$$SoC(t) = f^{-1}(OCV) \quad (3.10)$$

Tato metoda průběžně měří dílčí napětí článků, které se následně porovnávají s definovanou tabulkou. Konkrétním hodnotám OCV tedy odpovídají přepočítané hodnoty SoC. Problémem této metody je vnitřní odpor baterie, který při nabíjení či vybíjení ovlivňuje naměřené hodnoty, jsou proto kladeny vysoké nároky na zvýšenou přesnost rozlišení senzorů, a je zapotřebí dostatečného času při ustálení. Navíc ploché vybíjecí charakteristiky nejsou pro tuto metodu vhodné viz charakteristika **LFP vs NMC**. Není jednoduché tuto metodu aplikovat do reálného systému, jelikož jsou zde faktory, které se nesmí opomenout. Jeden z nejdůležitějších faktorů je doba relaxace, kdy je zátěž odepnuta od baterie. V tomto konkrétním případě je nutné vyčkat na správný okamžik, kdy je možné naměřit potřebné napětí.



Tabulka 3.1: Výhody/nevýhody základních metod určování SoC

	Výhody	Nevýhody
metoda CC	přesné měření při přesných počátečních podmínkách	náchylná na teplotu
	nenáročná metoda	náchylná na parazitní jevy věk baterie
		citlivá na přesnost proudových senzorů
		nejistota u počáteční SoC
metoda OCV	nemění se se stárnutím	vnitřní impedance baterie
	nutná znalost pouze aktuálního napětí	nutné odpojení baterie a relaxace napětí
		přesná pouze při malé zátěži
		náročnější metoda nevhodné pro články s plochými křivkami OCV-SOC *

*LFP je názorným příkladem, ukázka v kapitole 3.4 .

3.5 Metodika snímání proudu

Snímání proudu je důležitá úloha pro BMS. U lithium-iontových baterií se zajišťuje ochrana proti nadproudu pomocí nouzového odpojení od zdroje nebo zátěže. Spolehlivost obvodu závisí na přesnosti pro měření proudu v celém výkyvu naměřených hodnot s přesným zaznamenáním bodu nulového proudu. Proudů bývají často udávány k násobkům jmenovité kapacity článku a označovány písmenem C, nikoliv absolutními jednotkami A nebo mA. Příkladem je baterie o kapacitě 2500 mAh, která se vybíjí maximálním vybíjecím proudem 5 A, tudíž lze říci, že vybíjecí proud takového článku je 2C [25].

Pro měření proudu se používají hlavně 2 metody [1]:

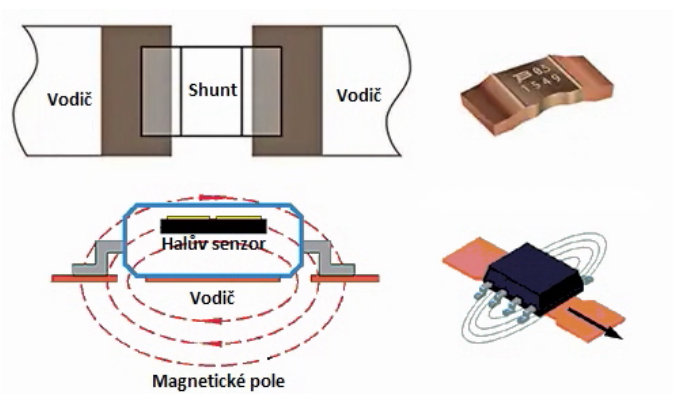
Měření pomocí shunt rezistoru - bočník

Toto měření využívá shunt rezistor, odpor s velmi nízkým, ale přesně zvoleným odporem připojený sériově se zátěží. Prochází-li rezistorem proud, vzniká na něm úbytek napětí, který je úměrný procházejícímu proudu dle Ohmova zákona. Hodnota odporu je vybrána tak, aby výsledný pokles napětí byl měřitelný, ale dostatečně malý, aby nenarušil obvod. V tomto bodu se rozumí teplo.



Měření pomocí Hallových senzorů

Měření proudu pomocí Hallových senzorů využívá Hallova jevu, kde hlavní princip spočívá v měření elektrického napětí příčně ve vodiči, jímž podélně protéká elektrický proud, který je odchylován magnetickým polem kolmým ke směru proudu [26]. Toto „Hallovo napětí“ je při stálém proudu přímo úměrné velikosti (magnetické indukce) magnetického pole. Proudové senzory poskytují analogový signál, který např. mikrokontrolér s integrovaným AD převodníkem mění na signál digitální, a tím je aplikovatelný pro nadřazené systémy [27]. Jednou z hlavních výhod Hallových snímačů je jejich galvanické oddělení od obvodu, tzn. neovlivňují měřený obvod.

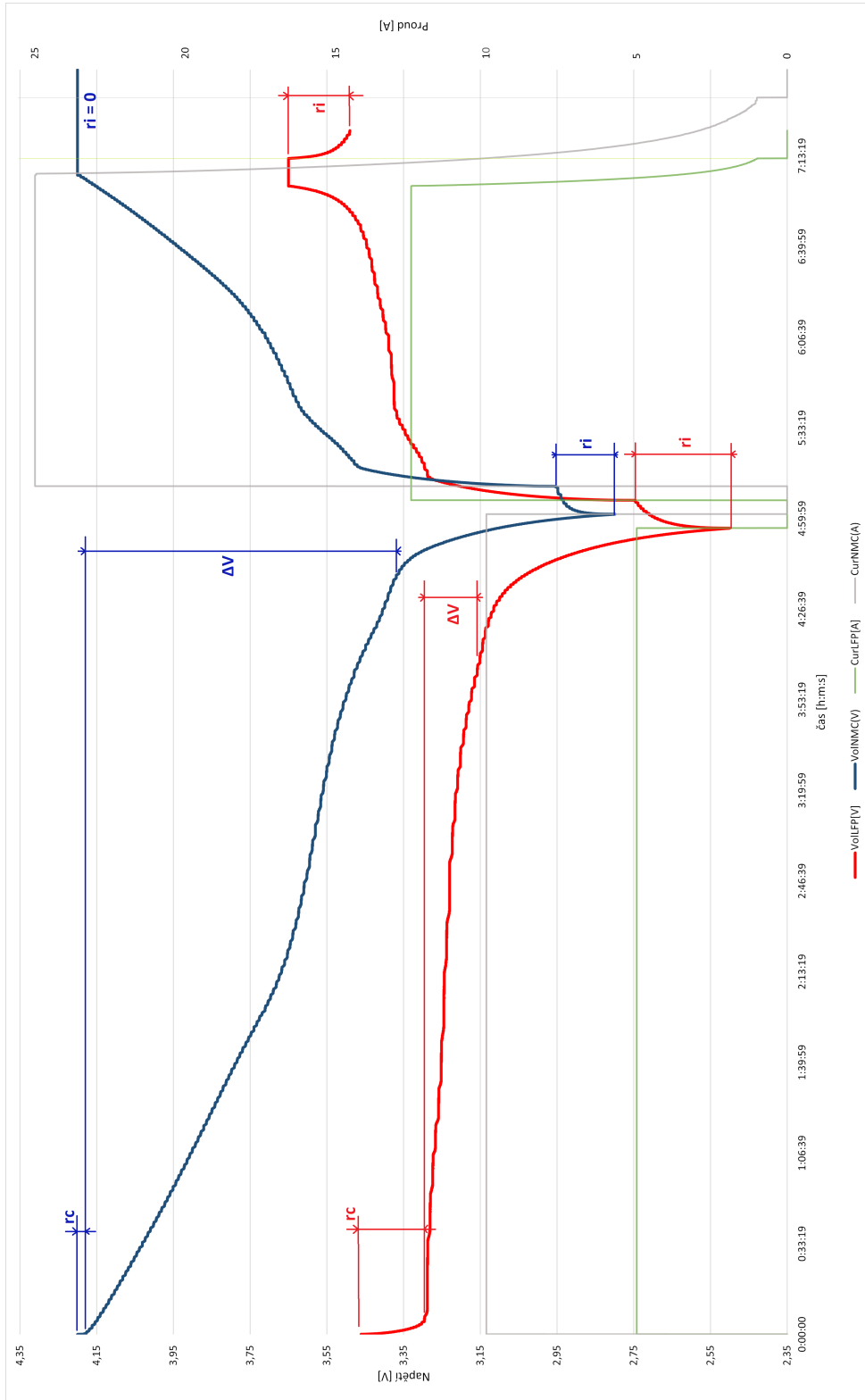


Obrázek 3.5: Bočník a Hallův senzor

Tabulka 3.2: Porovnání technik měření proudu

	Výhody	Nevýhody
Bočník	vyšší přesnost snímání (precizní shunt) nižší cena	působí ztráty topí
Hallův senzor	galvanické oddělení netopí možnost více senzorů v obvodu beze ztrát	při menších hodnotách proudu horší přesnost vyšší cena

3.6 LFP vs NMC



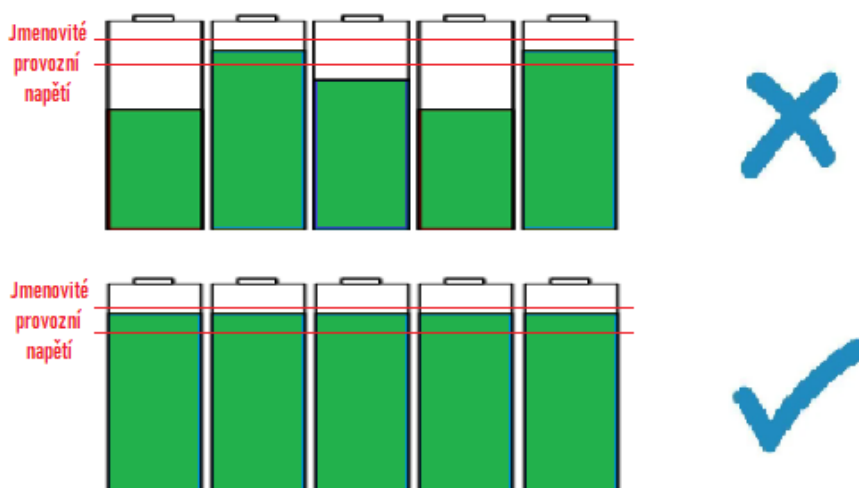
V grafu lze vidět naměřené charakteristiky technologie LFP a NMC. V porovnání NMC má vyšší hustotu energie, naopak LFP vydrží používání vyššího napětí po delší dobu. U vybíjecí charakteristiky je patrný rozdíl u NMC $\Delta V = 800$ mV a LFP $\Delta V = 200$ mV. Lze si povšimnout náhlého poklesu napětí při připojení zátěže r_c a při odpojení zátěže r_i . V případě r_i se jedná o vzrůst vnitřního odporu, který po několika málo minutách značně klesne, a při 50 % kapacitě baterie lze považovat vnitřní odpor baterie za nejmenší. Zhruba při 10 % kapacity baterie začne vnitřní odpor znatelně stoupat, kdy následuje prudký spád. V případě r_i se jedná o dobu relaxace a obnovení napětí.

Obrázek 3.6: Ukázka naměřených charakteristik LFP a NMC



4 Nevyváženost článků a její důsledky na akumulátory

Jev zvaný nevyváženost článků je častým tématem u řešení baterií pro reálné aplikace. Aby baterie dlouho sloužila, je potřeba baterii udržovat v provozní napětové oblasti dané výrobcem a jejím typem. Jelikož je baterie složena ze sérioparalelní kombinace článků viz 2.6, je nutné udržovat každý článek se stejným či podobným napětím. Tím se zaručí, že baterie si po celou dobu své životnosti udrží svoji kapacitu. V případě, že by baterie neměla správně rozložené napětí na jednotlivých člancích, ztrácela by poté rychleji svou kapacitu a vlivem delšího provozu by degradovala až do jejího úplného konce [28]. Důvodem toho, proč existují články s vyšším a nižším napětím, je jejich rozdíl ve jmenovité kapacitě nebo vnitřním odporu. Nejedná se ale tak přímo o napětové rozdíly, jak může být zřejmé z předchozích odstavců, které balancujeme na jednotlivých člancích, ale v rozdílech stavu nabití SOC jednotlivých článků.



Obrázek 4.1: Chtěný a nechtěný stav napětí baterie

Příkladem lze vzít v úvahu dvě baterie - jedna nabitá na zhruba 50 % SoC podle předepsaných pravidel výrobce, a druhá nabitá na plnou kapacitu.

Obě baterie jsou uskladněny při konstantní teplotě za stejných podmínek. Po delším časovém úseku jsou baterie analyzovány, a zde záleží na kvalitě BMS připojeného k uskladněným bateriím. Prvním důležitým aspektem pro uchování těchto baterií bez delšího použití je odběr proudu v klidovém stavu BMS.

V případě že obě baterie mají tyto parametry:

- Jmenovité napětí: 36 V
- Kapacita: 23 Ah (baterie č. 1) / 11,5 Ah (baterie č. 2)

Pokud vezmeme v úvahu, že jsou baterie uskladněny po dobu 4 měsíců, lze počítat 120 dní, tedy 2880 hodin.

Je nutné podotknout, že v baterii vždy musí zůstat alespoň 20 % kapacity. Uvažujeme-li stejnou baterii, v obou případech je nutné, aby po skladovacím období měla minimálně 4,6 Ah.

Spočítáme proud, který je potřeba k vybití použitelné kapacity obou baterií za 120 dní:

$$t_{celkem} = Q_{baterie} / I_{baterie} \quad (4.1)$$

z (4.1) dostáváme ...

$$I_{baterie} = Q_{baterie} / t_{celkem} \quad (4.2)$$

tedy...

$$I_{bat1} \doteq 0,006A = 6 mA$$

$$I_{bat2} \doteq 0,002A = 2 mA$$

Výpočty ukázaly maximální možné konstantní proudové zatížení pro obě baterie v případě uskladnění po dobu 120 dní. Pokud by tedy BMS odebírala z baterie větší proud než je ukázáno, je vysoce pravděpodobné, že baterie vlivem hlubokého vybití degraduje, v horším případě se zcela zničí. Baterií s BMS, které mají konstantní proudové zatížení v řádu mA, je naprostá většina.

Výrobce vždy udává ve specifikacích výrobku jasné pokyny pro delší uskladnění, bohužel jak je tomu u většiny baterií neudává však kolik má trvalý proudový odběr BMS či její jiná elektronika. Je nutné zvážit v případě delšího uskladnění baterie, zda je vhodné baterii nechat s 30-50 % SoC a tím riskovat možné podvybití, než kdyby byla nabitá na 100 % SoC.

Zdrojem nevyváženosti SoC může být též nerovnoměrné zatížení článků a pronikající proud obvody. Tento problém se objevuje především u levnějších řešení. U levnějších řešení mívají BMS napájené periferie často z nižších řad článků než ze samotné celé baterie. Na této BMS pak mohou být aplikovány jednodušší obvody, levnější integrované součástky a polovodiče pro nižší napětí, než by bylo potřeba



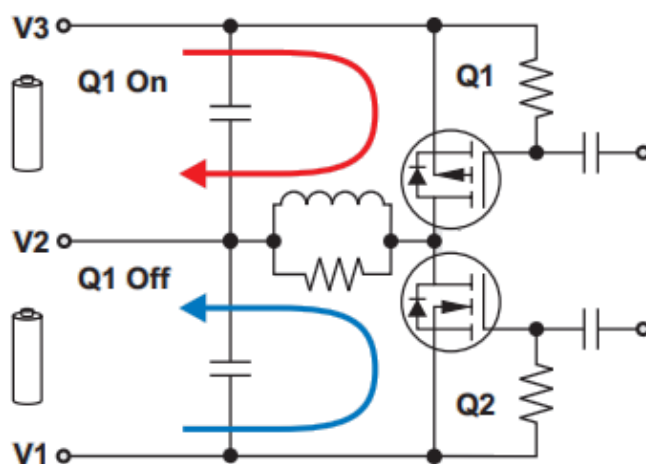
v případě napětí celé baterie. Nevýhodou právě tohoto řešení je následné vybíjení jednotlivých nižších článků oproti vyšším s větším napětím, které nejsou neustále pod zátěží.

4.1 Balancování

Balancování slouží k udržení nejlépe stejného či podobného napětí jednotlivých článků baterie, tím se zaručí dlouhá životnost a využití jejího plného potenciálu. Balancování je dočasná metoda, která by mohla být v budoucnu zapomenuta v případě dostupnosti kvalitnějších článků.

4.1.1 Aktivní

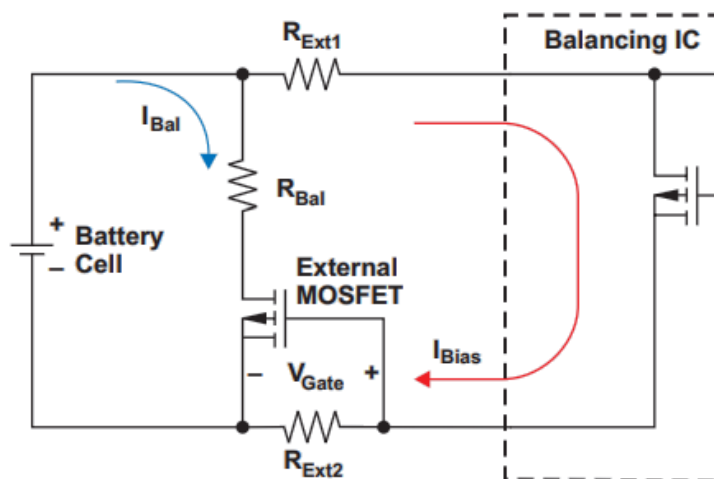
Aktivní balancování monitoruje jednotlivé články baterie, a v případě zjištěného napětového rozdílu předává energii článku s nejvyšším napětím ostatním článkům, a to na takovou dobu, dokud se všechny články nesrovnají na stejnou napětovou úroveň. Jedná se pouze o přesun neboli jakési „přelévání“ energie mezi články v průběhu nabíjení a vybíjení tak, aby byla zajištěna vyváženost celé soustavy. Díky tomu soustava aktivního balancování nevydává teplo, což je jedna z výhod oproti ostatním metodám. V případech, kdy je bateriový pack hermeticky uzavřený, ať už z důvodu vlhkosti, ochrany proti vnějším vlivům či z bezpečnostních důvodů, je aktivní balancování nejpříjemnější řešení. Nevýhodou tohoto balancování je jeho složitější implementace a cena, která bývá vyšší. Jedná se o hardwarovou implementaci aktivního balancéru, který ke své funkci vyžaduje akumulční prvky, tzn. cívky nebo kondenzátory a výkonové MOSFET tranzistory, které se pak značně projeví na celkové ceně a rozměrech [1].



Obrázek 4.2: Základní obvodové zapojení aktivního balancování [21]

4.1.2 Pasivní

Pasivní balancování monitoruje jednotlivé články baterie, a v případě zjištěného napětového rozdílu ve srovnání s ostatními články baterie článek začne vybíjet a následně přebytečný náboj odvede ve formě tepla. Články s nejvyšším napětím jsou vybíjeny (jejich energie se mění v teplo), dokud se jejich napětí nesrovná se články s nižším napětím. Tento proces probíhá zpravidla při nabíjení u mezních hranic pracovního napětí.



Obrázek 4.3: Základní obvodové zapojení pasivního balancování [21]

Existují integrované obvody, které již obsahují tyto interní obvody, které mají svá jistá omezení. Je nutné vědět, kdy jsou tyto vnitřní balancovací obvody dostačující pro zvládnutí daného obvodu v případě maximálního zatížení. Individuálně je u každého integrovaného obvodu jiná hodnota maximálního balancujícího proudu, které dosahují maximálně 50 mA, v případě vícečlávkových baterií i maximálně 5 mA [29][30]. Tato funkce je poté pro menší baterie dostačující, a je vhodná maximálně pro menší pracovní nářadí nebo podobné nenáročné aplikace. Tyto hodnoty v případě vícečlávkových baterií nemusí být dostačující pro správnou funkci, a proto se využívá více externích balancovacích obvodů.

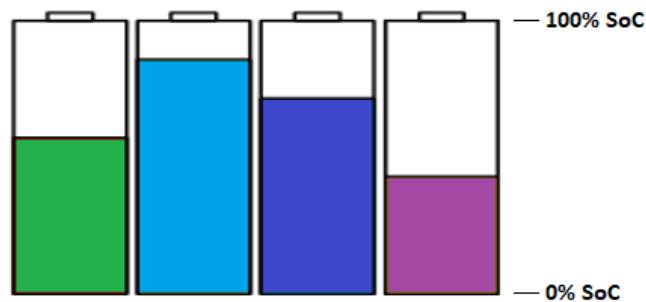
Správné balancování nezajistí jen použitý hardware, ale i software, který daný proces řídí. Je nutné, aby byl vymyšlený vhodný algoritmus pro zachování správných vlastností baterie. V případě špatně navrženého algoritmu balancování je možné u baterie při nepřetržitém balancování zkrátit její životnost či v horším případě baterii usmrtit.

Tabulka 4.1: Porovnání technik balancování

	Výhody	Nevýhody
Aktivní	balancování „beze ztrát“ netopí	rozměrné řešení vyšší cena
Pasivní	nižší cena nezabírá tolik místa - jednoduché řešení	odpor v obvodu přebytečnou energii přeměňuje na teplo

4.2 Důsledky nevyváženosti článků akumulátoru

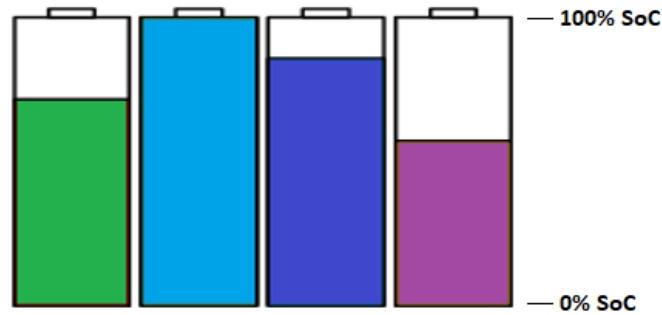
V případě, že v baterii existují nevyvážené články, lze předpokládat, že baterie bude mít na jednom či více článků vyšší napětí při konci cyklu nabíjení, a na jednom či více článků nižší napětí při konci cyklu vybíjení. V případě dlouhodobého používání takto nevyvážené baterie lze očekávat snižování její využitelné kapacity až do jejího úplného poklesu.



Obrázek 4.4: Nevyvážené články

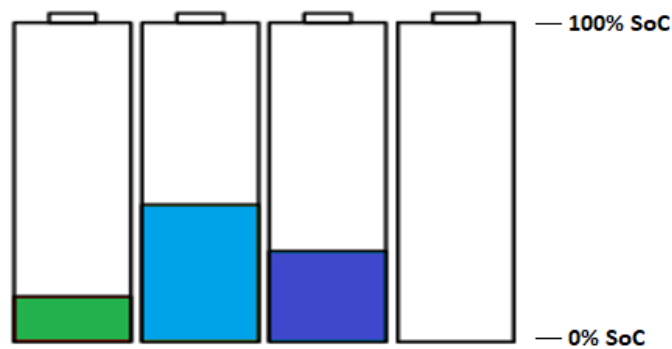
4.2.1 Životnost a kapacita baterie

Články s vyšším SoC jsou neustále vystavovány vyšším napětím OCV, což může způsobovat jejich zrychlenou degradaci - a tedy rychlejší pokles celkové kapacity. Vlivem neustálého opakování dochází k prohlubování tohoto jevu, a při nepatrném překročení maximálního povoleného nabíjecího napětí může dojít k zrychlenému znehodnocení článku.



Obrázek 4.5: Riziko přepětí

U typické vybíjecí křivky Li-ion článků lze vidět, že k nejvyššímu rozdílu napětí článků v baterii z pohledu napětí dochází, když dosáhnou svých limitů, tzn. pokud se článek přiblíží ke kritickým hodnotám (80 % SoC a 20 % SoC). Příkladem mohou být články NMC, které se v napěťové oblasti 2,5 V až 3 V odlišují nejvíce [31][32][33]. Principem tohoto jevu je skutečnost, že vnitřní odpor článku v závislosti na stavu nabití není konstantní. Nejmenší vnitřní odpor je obvykle 50 % SoC [34].



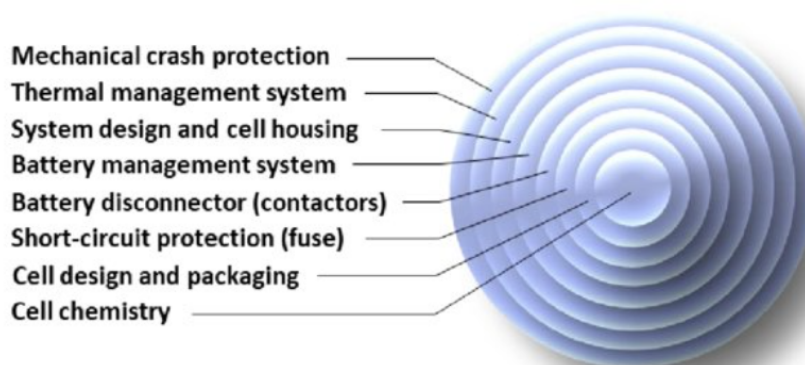
Obrázek 4.6: Riziko podpětí

V případě, že je článek vybit pod 2 V, hrozí trvalé poškození.

5 Bezpečnost

Každý článek Li-ion baterie obsahuje řadu látek s rozdílnými vlastnostmi z hlediska možného vznícení. Jelikož mají články Li-ion vyšší hustotu energie oproti dostupným článkům na trhu v poměrně malém pouzdře, je nutné dodržet postupy pro dodržení patřičné bezpečnosti. Signifikantním problémem bývá přehřátí či přebíjení baterie. V tomto případě musí být dodržován předepsaný způsob nabíjení. Při sestavování článků do baterie je nutné, aby články disponovaly jmenovitou a okamžitou kapacitou v nejlepším případě stejných či alespoň podobných hodnot. V případě přebíjení po překročení bezpečné provozní napěťové oblasti NCV mohou reagovat aktivní materiály s elektrolytem baterie, a může dojít k náhlému zvýšení vývinu tepla. Díky teplu vznikne přetlak, který je potřeba tzv. řízeně vypustit. Článek tedy začne ventilovat, a pokud se dostane při tomto stavu dovnitř vzduch, je možné že článek začne hořet či její vyteklý elektrolyt, od kterého mohou vzplanout jiné části baterie. Aby byly bezpečné články odlišeny od nebezpečných, existuje norma UL1642, zabývající se testováním bezpečnosti článků [35][36].

V případě přepravy baterií, ať už z výroby či jiným způsobem, je doporučené nabití baterií na 20-30 % SoC hlavně z důvodů bezpečnosti. K této problematice slouží norma UN 38.3 [37].

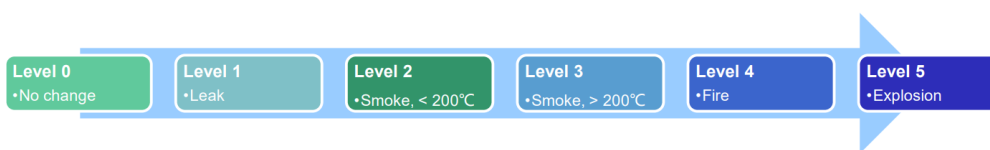


Obrázek 5.1: Bezpečnost celé baterie, převzato z [6]

5.1 Norma UL1642

UL1642 je norma zabývající se bezpečností lithiových akumulátorů, která předepisuje zkoušky a hodnocení výsledků jednotlivých článků. Následně je testovaný článek certifikován podle dosažených výsledků. Pro příklad je zde uvedena tabulka od společnosti Samsung, ve které lze vidět jednotlivé testy lithium-iontového článku.

Safety Test			Spec.	Results		OK / NG
				Results	Max. temp.	
Electrical Abuse	Overcharge	18A 20V (UL)	L1	10L0	123	OK
	Short circuit	10mΩ at 23°C	L3	5L0	81	OK
		80mΩ at 23°C (UL)	L2	5L0	129	OK
Mechanical Abuse	Impact	UL	L1	10L0	-	OK
	Crush	UL	L1	10L0	-	OK
Thermal Abuse	Hot oven	130°C	-	10L1	138	OK



Obrázek 5.2: Výsledky testování článku normou UL1642

Jak lze z obr. 5.2 zjistit, testy jsou rozdělené do několika kategorií, a to na elektrické, mechanické a tepelné namáhání. Každá z těchto kategorií je rozdělena na jednotlivé položky, které budou popsány níže. Pod tabulkou lze vidět úrovně, do kterých se jednotlivé články mohou zařadit po vykonaném testování [35].

- Úroveň 0 - nezaznamenána žádná změna
- Úroveň 1 - únik elektrolytu
- Úroveň 2 - viditelný kouř bez tepelného namáhání
- Úroveň 3 - vysoké tepelné namáhání s viditelným kouřem
- Úroveň 4 - vznícení článku
- Úroveň 5 - exploze

5.1.1 Overcharge

Článek je v počátku testu vybitý na jmenovitou hodnotu napětí udávanou výrobcem. V tomto testu je článek vystaven nabíjecímu proudu trojnásobku proudu I_c , specifikované výrobcem připojením ke stejnosměrnému napájecímu zdroji. Minimální doba zkoušky musí být 48 hodin.

5.1.2 Short circuit

Každá baterie zkušební vzorku je zkratována připojením kladného a záporného pólu svorky baterie s měděným drátem s maximální odporovou zátěží $0,1 \Omega$. Článek se neodpojuje, dokud nedojde k požáru nebo výbuchu, nebo dokud nebude zcela vybitý. Teplota vnějšího článku nebo krytu baterie nesmí překročit $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ($302 \text{ }^\circ\text{F}$).

5.1.3 Impact

Baterie zkušební vzorku je umístěna na rovném povrchu. Tyč o průměru $15,8 \text{ mm}$ je umístěna přes střed vzorku. Z výšky $610 \pm 25 \text{ mm}$ je shozena váha $9,1 \text{ kg} \pm 0,46 \text{ kg}$ na vzorek. Každá testovaná baterie je vystavena pouze jedinému nárazu.

5.1.4 Crush

Mezi dva ploché povrchy se umístí baterie, která je následně silou těchto ploch drcena. Síla pro drcení musí být aplikována pomocí hydraulického pístu o průměru 32 mm . V drcení se musí pokračovat, dokud se nevytvoří tlak na hydraulickém válci hodnoty $17,2 \text{ MPa}$, aplikovaná síla 13 kN . Jakmile je dosažen maximální tlak, je tlak z baterie uvolněn.

5.1.5 Hot oven

Baterie se zahřívá v cirkulační vzduchové peci. Teplota pece je zvyšována rychlostí $5 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($9 \pm 3,6 \text{ }^\circ\text{F}$) za minutu na teplotu $150 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($302 \pm 3,6 \text{ }^\circ\text{F}$). Při této teplotě se baterie ponechává v peci po dobu 10 minut.



6 Definice zadání, analýza dostupných řešení a jejich testování

Existuje mnoho návrhu řešení, jak implementovat systém managementu baterie pro elektrokola. Proto je dobré definovat, čeho má být výsledný systém schopný. Před tím, než se začne se samotným návrhem BMS, je nutné provést vhodnou přípravu:

- Analyzovat dostupná řešení,
- definovat požadované funkce BMS,
- zvolit vhodné periferie,
- navrhnout kompletní koncepci řešení a blokové schéma.

6.1 Definice zadání

Výsledné řešení musí splňovat určité požadavky a zajistit bezpečný provoz akumulátoru. V první řadě je potřeba zajistit aplikovatelnost BMS na jednotlivé typy článků s možností nastavení jejich pracovních oblastí a na počet jednotlivých článků. Dalším důležitým parametrem BMS je monitorování jednotlivých článků, tedy vyvedení jejich kladného a záporného pólu na DPS. Je nutné zavést řídicí funkce, které v případě běžného použití či v případě nouze baterii odpojí od zátěže, ať už se jedná o nabíjení baterie či její úplné vybití, nebo v případě nebezpečí zamezí vznícení či explozi. V neposlední řadě je nutné zajistit komunikační sběrnici pro vstup i výstup z dané BMS pro komunikační (pohon) nebo informační účely (display). Závěrem je nutné naprogramovat vhodný řídicí software a počítačový program s vhodným grafickým rozhraním. Je nutné po vytvoření BMS otestovat a ladit chyby, které by se mohly v průběhu používání objevit, a tím zamezit případnému nebezpečí (správné balancování, hlídání podpětí, napětí baterie, odpojení v případě problému).

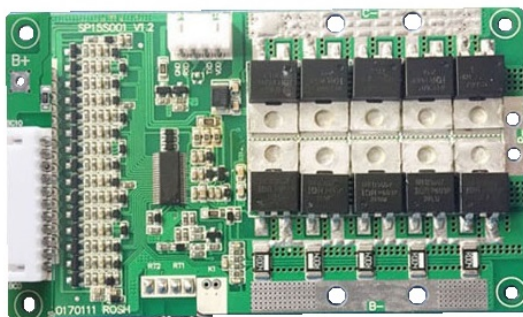
6.2 Dostupná řešení BMS

V nadcházejících několika podkapitolách jsou stručně předvedeny již existující komerční systémy BMS. Pro porovnání byly zvoleny s podobnými parametry a funkcionalitou, jakou bude mít vlastní navrhovaný systém. Byly zohledněny tyto parametry:

- Možnost zapojení až 10 článků sériově - nominální napětí 36 V,
- pasivní balancování,
- kompatibilita s Li-ion.

6.2.1 BMS 10S 20A LLT ELECTRONIC

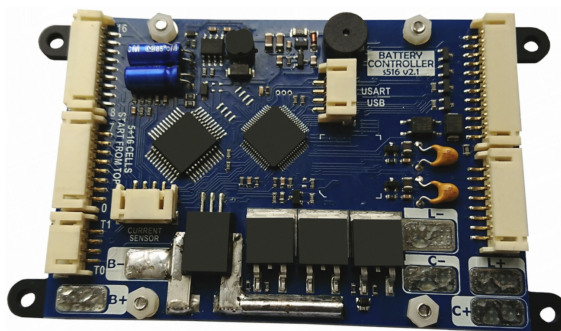
Jedná se o model BMS pro zapojení až 10 článků sériově s funkčním pasivním balancováním. Pomocí PC lze monitorovat stav baterie jako jednotlivé napětí článků, nastavené parametry a SoC. Tento systém je možné aplikovat na baterie NMC a LFP. Vybíjecí a nabíjecí proud u tohoto bateriového managementu dosahuje až 20 A a lze balancovat proudem maximálně 50-60 mA. Jednotlivé parametry jako je rozdíl napětí článků v mV, zahájení balancování na určitém napětí, přepětová ochrana, vybíjení do stanovené meze lze nastavit v PC aplikaci. Modul disponuje spínáním a rozepínáním baterie od zátěže technikou MOSFET. K produktu je možné připojit mobilní telefon přes bluetooth, a tím je jeho ovládání více intuitivní. Systém podporuje UART - USB rozhraní nebo bluetooth modul (lze použít pouze jeden modul ve stejném čase) [38].



Obrázek 6.1: 20A LLT ELECTRONIC

6.2.2 TinyBMS s516

TinyBMS s516 je vhodná pro baterie od 4S do 16S. Měří jednotlivá napětí článků, řídí spínání pomocí FET zátěže i nabíječky. Metodou CC vyčítá SoC. Obsahuje zabudované ochrany jako okamžité odpojení zátěže a nabíječky, pokud některý z článků překročí povolený rozsah napětí, proudu či teploty. Uživatelsky upgradovatelný firmware umožňuje rychlé aktualizace, slibuje vylepšení a opravu chyb. Integrovaná komunikační sběrnice umožňuje správu a streamování dat v reálném čase - podporuje UART - USB rozhraní, Bluetooth a nebo CAN (lze použít pouze jeden modul ve stejném čase). K TinyBMS je možné připojit externí snímače proudu, externí spínače, prvky pro signalizaci SoC. Jedná se tedy o modulární systém, který si uživatel sám nakonfiguruje podle potřeby. Poskytuje nabíjecí proud až 30 A a vybíjecí 150 A s pasivním balancováním dosahujícím až 300 mA [39].



Obrázek 6.2: TinyBMS s516

6.2.3 Daly BMS

Daly BMS je vhodná pro 10s Li-on články s nominálním napětím 36 V. Tato řada obsahuje celkově 8 druhů BMS definovaných podle zátěže a jednotlivých parametrů – v případě použití pro elektrokolo je vhodná verze pro 15 A zatížení. Daly BMS poskytuje standardní ochrany, odpojení od zátěže je řešeno pomocí FET. BMS disponuje také balancováním proudem maximálně 30 mA. Výhodou tohoto řešení je jednoduchost a nízká interní spotřeba proudu, nevýhodou je však absence jakékoliv komunikační sběrnice a její pevné nastavení parametrů výrobcem, nelze připojit k PC. DalyBMS je uživatelsky nekonfigurovatelná [40].



Obrázek 6.3: Daly BMS

Tabulka 6.1: Porovnání existujících řešení BMS

	20 A LLT BMS	TinyBMS s516	Daly BMS **
Měření baterie	napětí, proud, teploty	napětí, proud, teploty	napětí, proud, teploty
Ochrany	přepětová a podpětová ochrana, ochrana proti zkratu, většímu proudu a teplotám, možnost odpojení FET	přepětová a podpětová ochrana, ochrana proti zkratu, většímu proudu a teplotám, možnost odpojení FET	přepětová a podpětová ochrana, ochrana proti zkratu, většímu proudu a teplotám, možnost odpojení FET
Zaznamenávání dat	N/A	ano	N/A
Komunikační sběrnice	UART, BT	USART (USB / Bluetooth / CAN)	N/A
Odhad SoC	SoC	SoC	N/A
Balancování	pasivní, 50-60 mA	pasivní, 150 mA / 300 mA	pasivní, 30 mA
Vybíjecí/nabíjecí proud	20 A / 20 A	60 A (trvale 30 A) / 30 A (udržovaný 20 A)	15 A / 8 A
Příslušenství	PC aplikace pro konfiguraci, BT modul	PC aplikace pro konfiguraci, CAN a BT modul	N/A
Vlastní spotřeba	v režimu spánku 150 μ A / běžný režim 20 mA	v režimu spánku až 200 μ A / běžný režim 11 mA	běžný režim 100 μ A*

* v režimu spánku minimální odběr v řádu μ A (režim vybíjení)

** není uživatelsky konfigurovatelná



6.3 Požadované funkce BMS

Pro dosažení maximální životnosti baterie je nutné dodržet výrobcem stanovené parametry článků. Je dobré se zamyslet, zda-li je vhodné navrhnout BMS konfigurovatelnou, a v jaké míře může uživatel BMS nastavit. Pokud by byla BMS plně konfigurovatelná, je možné, že nezkušený uživatel nastaví nesprávné parametry, a tím by mohl zkrátit životnost dané baterie.

Aby byly balancovány jen připojené články v případě univerzálních systémů, je nutné nevyužitá místa připojit k VCC, GND nebo k nižší řadě článků. Každé chemické složení má jiné požadavky co se týče napěťových úrovní nebo SoC, a proto je vhodné navrhnout takovou bateriovou správu, která bude univerzální pro všechny typy chemií, a zároveň se zamezí přístup do úprav parametrů neoprávněným osobám.

Balancování Pro využití plné kapacity bude v systému implementované pasivní balancování. U již existujících řešení bývá balancovací proud v řádu 100 mA, proto bude balancovací proud u navrhovaného systému podobný [41].

Ochranné funkce Nejdůležitější funkcí BMS je chránit připojenou baterii před nebezpečnými stavy:

- přepólování - v tomto případě musí být obvod okamžitě odpojen, tento problém budou řešit diody při výstupu hlavního napájení se sériově zapojenou pojistkou pro spotřebič nebo nabíječku a u vstupu připojení baterie do BMS,
- hluboké vybití - v případě dosažení mezních hodnot vybíjecího napětí jednoho z článků bude okamžitě odpojena zátěž,
- přebíjení - v případě překročení maximálního napětí na libovolném článku bude nabíječka odpojena,
- provozní teploty - pokud baterie opustí povolené teplotní meze, bude okamžitě odpojena zátěž nebo nabíječka,
- balancování - chrání před zvyšováním rozdílů napětí jednotlivých článků během používání.

Komunikační sběrnice V dnešní době existují chytré nabíječky, které před začátkem nabíjení získávají informace z BMS o baterii, kterou budou nabíjet. Je proto nutné implementovat alespoň jednu komplexnější sběrnici pro případný další vývoj. Další možné využití je následná konfigurace dané BMS přes připojený převodník, která bude sloužit jako sběrnice pro její nastavení. Proto bude navrhovaný systém vybaven komunikačními rozhraními CAN Bus a UART.



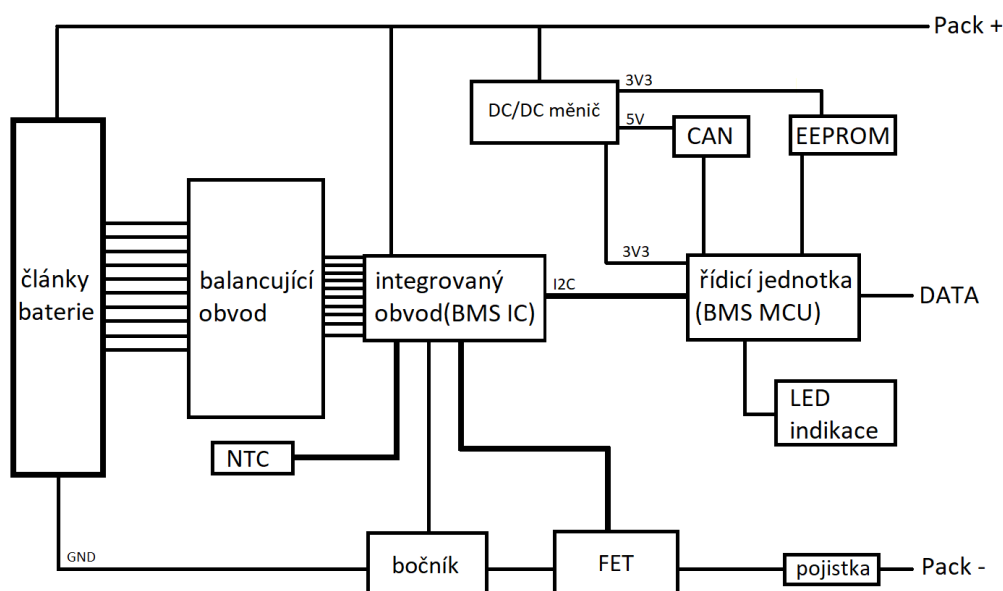
6.4 Parametry BMS

Pracovní napětí Navržený systém bude určen pro baterie od 6S až do 10S. Při použití 10S lze předpokládat nominální napětí 36 V s maximálním nabíjecím napětím 42 V.

Pracovní proud Maximální vybíjecí a nabíjecí proud bude 15 A, což bude plně dostačující i s případnými proudovými špičkami při rozjezdu elektrokola. V případě dlouhodobého trvalého zatížení 15 A bude doporučené zapojení externího chlazení.

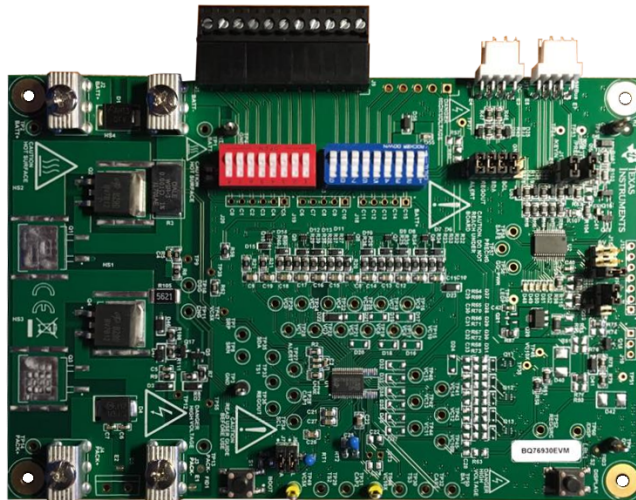
6.5 Návrh blokového schématu

Správný návrh obvodu rozhoduje o kvalitním bateriovém managementu.



Obrázek 6.4: Blokové schéma

Pro vývoj vlastního bateriového managementu byl využit vývojový kit od společnosti Texas Instrument BQ76930EVM. BQ76930EVM je kompletní vyhodnocovací kit s BMS IC BQ76930, BQ76940 vhodným pro 10S nebo 15S implementaci. Řídicím obvodem celého kitu je obvod BQ78350 zastávající funkci mikrokontroléru.



Obrázek 6.5: TI BQ76930EVM

Vývojový kit obsahuje jeden BMS IC BQ76930 (v případě verze X40EVM BQ76940) monitorovací systém, který zajišťuje potřebné typy ochran, jako jsou ochrany proti přebíjení, nadměrnému vybití, zkratu a nadproudového výboje. Dále kit obsahuje snímací rezistor proudu (shunt rezistor), výkonové FET a všechny ostatní součásti nezbytné k ochraně článků baterie. Vývojový kit lze kontinuálně nabíjet či vybíjet proudem až 15 A, balancováním lze u tohoto typu dosáhnout maximálního balancovacího proudu 43 mA díky externímu balancování. K dispozici jsou dva nastavitelné PC programy rozlišené komunikující sběrnici I2C a SMBUS. Pro nepřetržitý provoz při maximálním nabíjecím/vybíjecím proudu je nutné zajistit potřebné chlazení desky. K připojení je potřeba 10S baterie o minimálním nominálním napětí 26 V nebo DC regulovatelný zdroj s použitím v rozmezí 0-44 V (BQ76930EVM) nebo 0-66 V (BQ76940EVM) [29]. Tento vývojový kit byl hlavní inspirací pro vlastní návrh celého systému.

7 Realizace a návrh DPS

Pro vytvoření schématu zapojení a návrhu DPS byl zvolen software EAGLE verze 9.5.2 od společnosti Autodesk.

7.1 Charakteristika klíčových komponent

Napájení:

BMS je napájena z připojené baterie. Pokud se bude počítat s 10 články u baterie, tak maximální povolené napětí je 42 V, a nejnižší napětí 28 V. Celkové napětí baterie bylo nutné upravit na napětí použitelné pro komponenty na desce, konkrétně na 5 V pro integrované obvody a 3,3 V pro řídicí logiku. Snížení na 5 V bylo realizováno pomocí integrovaného obvodu DC/DC step-down měniče LMR16006 s výstupním proudem až 600 mA. Výstupní napětí z LMR16006 se nastavilo pomocí odporového děliče připojeného na zpětnou vazbu pinu FB následujícím vztahem [42]:

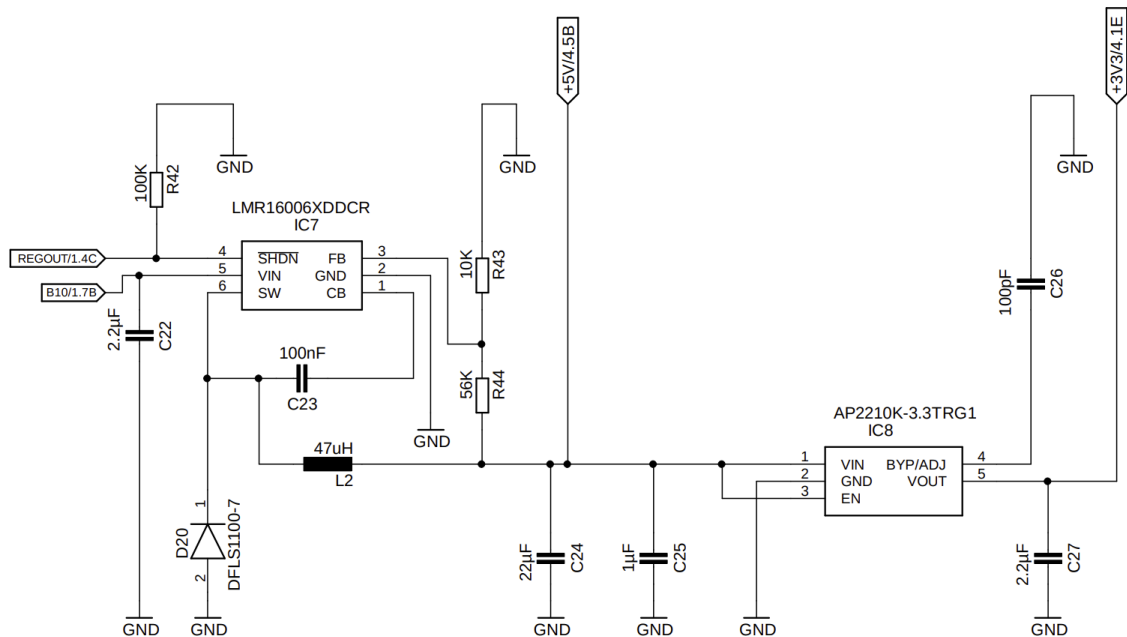
$$V_{OUT} = U_{FB} \left(1 + \frac{R44}{R43} \right) \quad (7.1)$$

kde V_{OUT} je potřebné nastavované napětí a U_{FB} je napětí zpětnovazebního pinu FB. Pro zvolení správných hodnot odporů byl podle dokumentace zvolen odpor $R43 = 10K$, a následně byl odpor $R44$ dopočítán podle upraveného vzorce 7.1:

$$R44 = R43 \left(\frac{U_{OUT}}{U_{FB}} - 1 \right) = 56k \quad (7.2)$$

Volba vhodné cívky byla vybrána z technické dokumentace, kde je uvedeno, že pro typické aplikace 600 mA je vhodná hodnota cívky 47 μH [42]. Důvod proč nebylo napětí bráno z nižších řad článků, kdy by byl obvod jednodušší, byl prostý - vybíjením jednotlivých článků přímo z nižších řad by mohlo zapříčinit urychlení jejich stárnutí, a tím způsobit kratší životnost celého akumulátoru.





Obrázek 7.1: DC/DC stepdown 3V3 a 5V

DC/DC měnič obsahuje standardní ochranné funkce. Pro 3,3 V byl použit regulátor napětí s nízkým úbytkem (LDO) 50 mV AP2210K s výstupním proudem 300 mA.

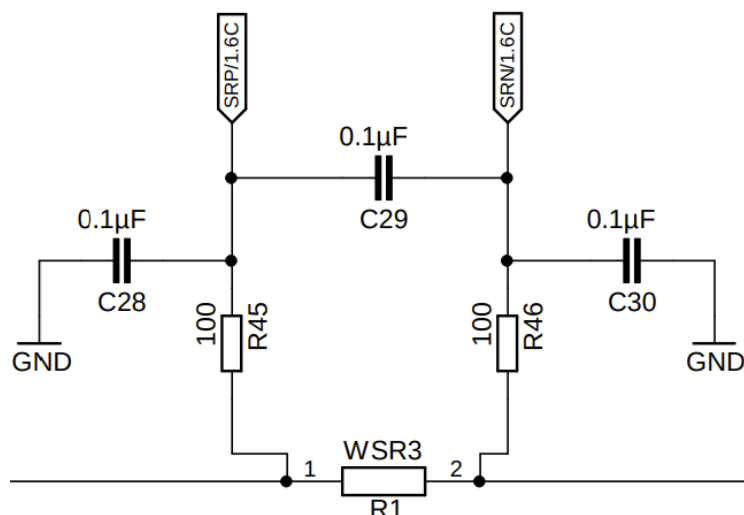
Metodika snímání proudu

Pro tuto BMS byla zvolena metoda měření proudu pomocí odporového bočnicku. Výhodou tohoto obvodu je jeho jednoduchá implementace na plošný spoj bez větších nutných úprav a jeho kompatibilita s integrovaným obvodem BQ76930. Odporový bočník R1 je zapojen sériově do obvodu a je navržen na $0,001 \Omega$ ($\pm 1\%$, 2 W), která by nijak neměla omezovat obvod (minimální ztráta). Maximální trvalá výkonová ztráta při 15 A:

$$P_z = R \cdot I^2 = 0,225 \text{ W} \quad (7.3)$$

Rezistory R45 a R46 jsou použity jako rezistory omezující proud chránící integrovaný obvod BQ76930. Kondenzátory C28 a C30 jsou blokovací kondenzátory, které se používají k potlačení vysokofrekvenčního šumu.

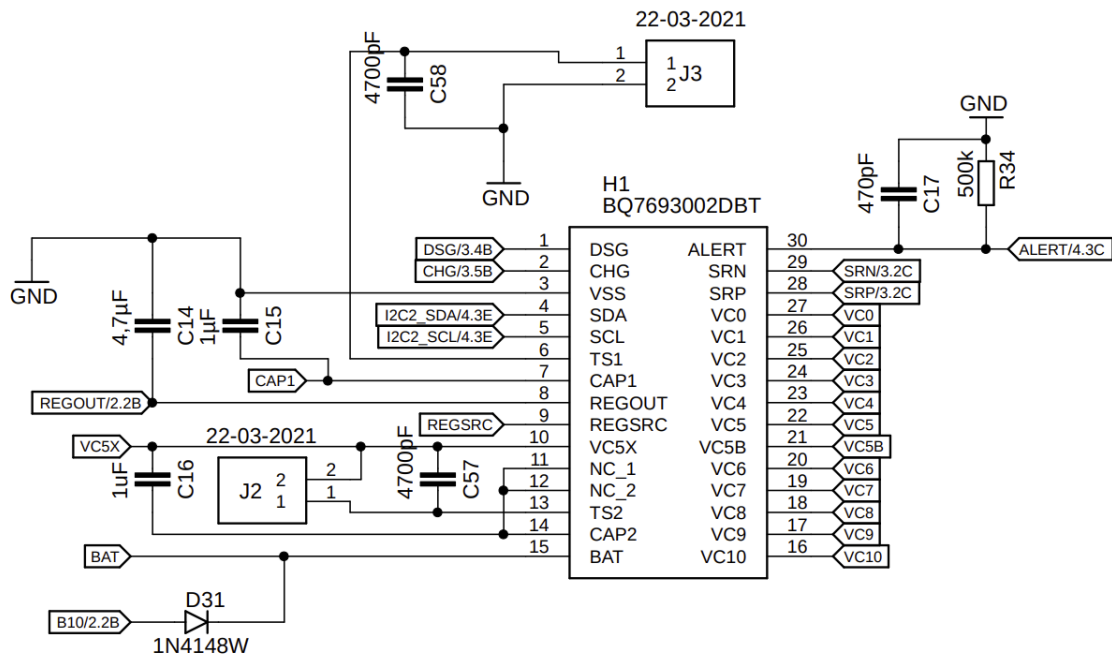




Obrázek 7.2: Bočník a jeho obvodové zapojení

Integrovaný obvod BMS

Pro měření napětí byl zvolen BMS IC BQ76930, který monitoruje napětí článků, umožňuje zapojení proudového senzoru (shunt rezistor), spíná / rozepíná FET a měří teploty. Spotřeba tohoto obvodu je v normálním režimu maximálně 130 μA , kdy v režimu sleep může mít spotřebu jen 1,8 μA [30]. BQ čip monitoruje napětí jednotlivých článků baterie, celkové napětí baterie, teploty z teplotních čidel, mimo jiné zajišťuje i vybíjení jednotlivých článků (pasivní balancování), ochranu napětí (OV, UV) a proudu (OCD, SCD). Díky řízení FET lze zareagovat v případě dosažení limitů ochranných prvků. Všechny tyto parametry se zapisují do předem předdefinovaných registrů, ze kterých následně MCU vyčítá data přes sběrnici I2C a vyhodnocuje stav baterie. Dva připojené termistory J2 a J3 slouží k hlídání provozních teplot. Paralelně zapojený kondenzátor k NTC C57 a C58 slouží ke stabilizaci napětí [43].



Obrázek 7.3: BQ76930 a obvodové zapojení

Balancování

Pro účely balancování a měření napětí bylo použito externí balancovací zapojení pro BQ76930. Bylo zvoleno pasivní balancování díky kompaktním rozměrům a nenáročnosti obvodu. Balancování je řešeno pouze při nabíjení (důvodem jsou ztráty, které nechceme mít při vybíjení se zapojenou zátěží - menší dojezd) a při uživatelském balancování, kdy je možné v uživatelském prostředí nastavit vybalancování článků v klidovém stavu. Pro výpočet vybíjecího rezistoru je využit Ohmův zákon

$$U = R \cdot I. \quad (7.4)$$

Pro výpočet je nejprve nutné zvolit vhodnou velikost balancovacího proudu. Při výpočtu lze vycházet z maximálního napětí technologií NMC a NCA, které je 4,2 V [10], proto byl zvolen balancovací proud 120 mA, který by měl být dostačující v delších časových intervalech pro správné vybalancování napětí na jednotlivých člancích baterie. Pro zvolení správného rezistoru:

$$R_{bal} = \frac{U_{cell}}{I_{bal}} = 35 \Omega \quad (7.5)$$

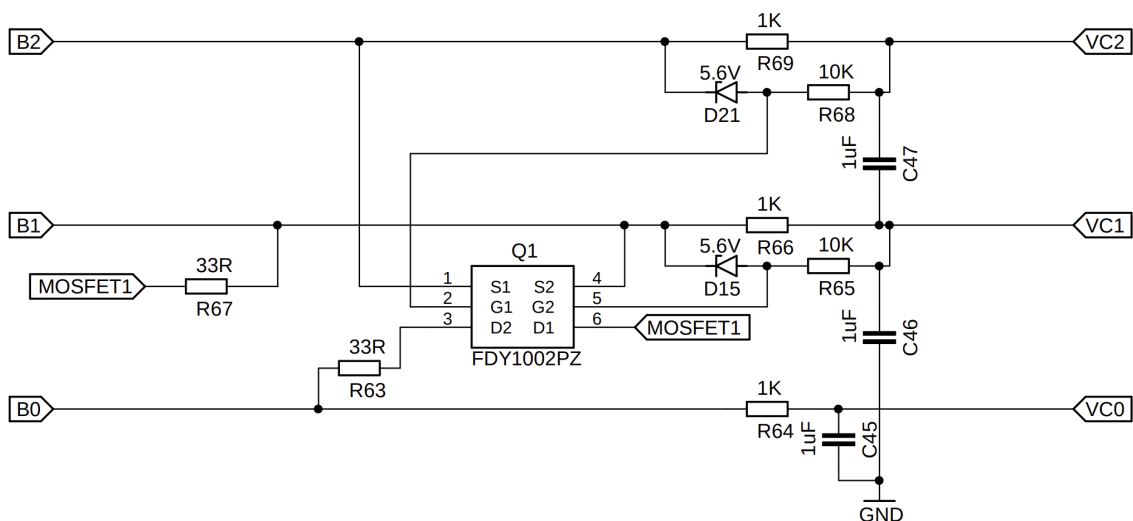
Po vypočtení rezistoru byl nakonec vybrán podobný rezistor z řady E24 33R, který dokáže balancovat proudem 127 mA. Nyní je nutné spočítat maximální ztrátový výkon, a dle těchto údajů lze následně vybrat vhodný rezistor.

$$P_z = R_{bal} \cdot I_{bal}^2 = 0,53 W \quad (7.6)$$

Na obrázku 7.4 je uvedené schéma balancování pro 2 články baterie. Balancovací odpory R63 a R67 jsou připojovány paralelně k článkům pomocí dvoukanálového



MOSFET tranzistoru Q1 FDY1002PZ. Ten byl zvolen na základě použití pro maximální napětí na článek 4,2 V, kde v případě 4,2 V má $R_{DS(on)}$ hodnotu zhruba $0,35 \Omega$ při pokojové teplotě 25 °C [44]. Schéma zapojení obvodu vychází z katalogového listu BQ76930EVM [29]. Svorky B0, B1, B2 jsou připojeny k prvním dvěma sériově zapojeným článkům postupně od záporného pólu ke kladnému pólu jednotlivých baterií. Pro další články jsou analogicky použité další svorky se stejným zapojením. Rezistory R64, R66, R69 a kondenzátory C45, C46, C47 tvoří obvod filtru dolní propust, kterou je měřené napětí filtrováno. V případě zapojení D15, D21 a R65, R68 zajišťují ochranu hradla tranzistoru Q1 a integrovaného obvodu [45]. Svorky VCO, VC1 a VC2 jsou vyhodnocovací vstupy do integrovaného obvodu. Analogicky je takto zapojeno všech 10 sériových článků.

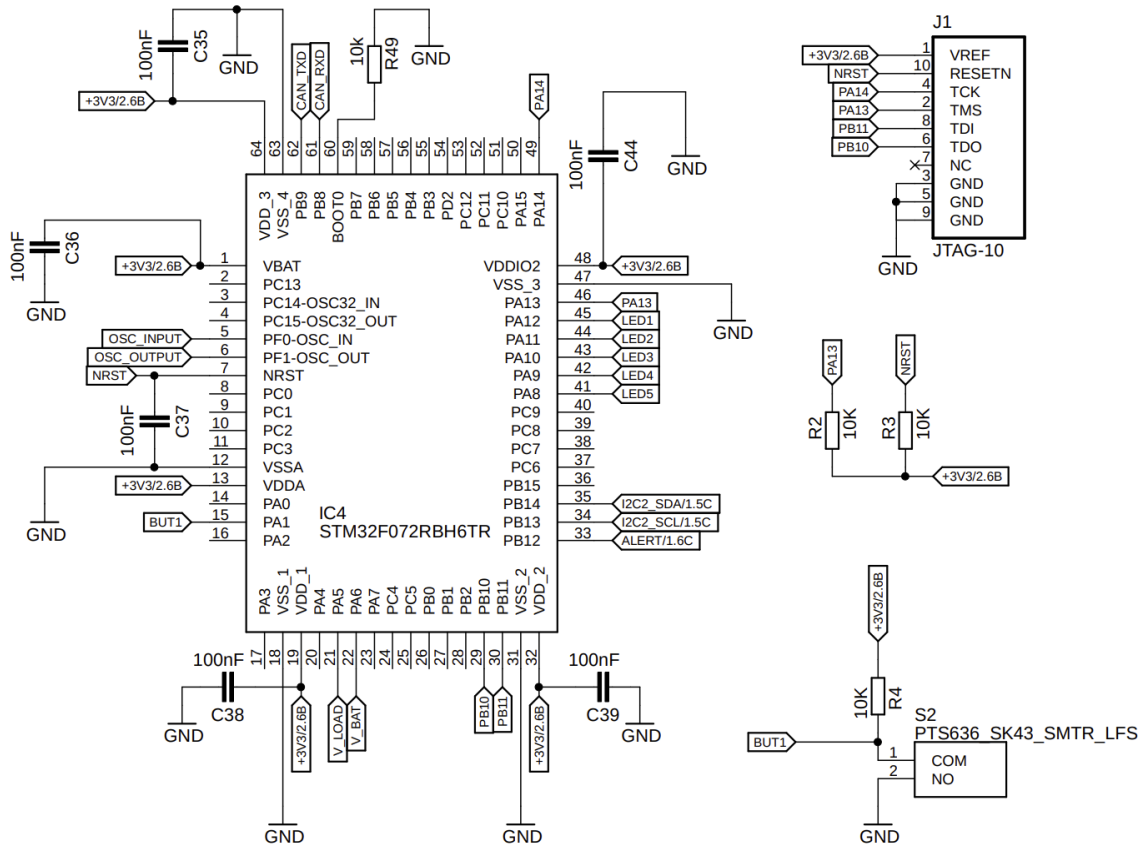


Obrázek 7.4: Balancování 2 článků

MCU:

Hlavním řídicím systémem celého BMS je MCU. Pro vlastní návrh byl zvolen MCU STM32F072R8T. Jedná se o 32bitový procesor architektury ARM, který využívá jádro CPU s maximální frekvencí 48 MHz. Jedná se o poměrně levný integrovaný obvod s potřebnými funkcemi a periferiemi pro správnou funkčnost BMS. Vnitřní A/D převodník (až 16ti kanálů při rozlišení 12 bitů, rozlišení 1 mV), je pro čtení napětí baterie dostačující [46]. Jelikož je procesor u AD převodníku tolerantní k maximálnímu napětí 3,3 V, je nutné v případě vyčítání celkového napětí baterie snížit maximálních 42 V na 3,3 V. Pro tento účel zde slouží odporový dělič R59, R60, R61 a R62. U tohoto řešení byl postačující vnitřní oscilátor s maximální frekvencí 48 MHz. Pro programování MCU je vyvedena SWD sběrnice (TDI, TDO, TCK, TMS, NRST) na připojený konektor JTAG J1. Komunikace mezi MCU a BMS IC probíhá skrze I2C, která se skládá ze dvou vodičů SCL a SDA. Na tyto vodiče musí být aplikovány pull-up rezistory, které zamezí rušivým signálům přivedením logické 1. Jak je zmíněno v kapitole [Testování a ladění chyb](#), je nutné připojit pull-upy i k vodičům TMS a NRST SWD sběrnice. Každý pár napájecích zdrojů (VBAT, VDDA / VSSA, VDD / VSS, VDD-1 / VSS-1, atd.) musí být oddělen filtračním

blokovacím kondenzátorem C36, C37, C38, C39, C44, C35. Tyto kondenzátory musí být umístěny co nejbližší k příslušnému pinu pro zajištění správné funkcionality [45]. V_{BAT} v tomto případě slouží pro napájení RTC a záložní registry. VDDA je určené pro napájení ADC/DAC a VDD slouží k napájení I/O mikroprocesoru a interního regulátoru. Spotřeba tohoto mikroprocesoru je podle technické dokumentace v normálním režimu kolem 12 mA a v případě režimu sleep 3,04 mA [46].



Obrázek 7.5: Zapojení MCU a jeho periférií

Spínání:

Spínání napětí je realizováno pomocí tranzistorů typu MOSFET. V návrhu se vyskytují 4 tranzistory Q1, Q2, Q3 a Q4, které rozepínají a spínají baterii od zátěže. Pokud jednotlivé články baterie dosáhnou meze vybití/nabití, BMS baterii odpojí, a nechá jí odpojenou do doby, než bude splněna podmínka

$$U_{min} < U_{cell} < U_{max}.$$

V této části je důležité zmínit, že se jedná o část řízenou BMS IC BQ76930 vstupy DSG a CHG. Pro tento obvod byl zvolen 100 V MOSFET CSD19536KTT na základě vývojového kitu BQ76930EVM, kde se jedná o stejný princip, proto nebyl důvod volit jiný. $R_{DS(on)}$ má hodnotu zhruba 2,8 m Ω při pokojové teplotě 25 °C [47]. V případě průchodu proudu 15A

$$P = R_{DS(on)} \cdot I^2 = 0,63 \text{ W} \quad (7.7)$$



Dle konstanty R_{JA} (tepelný odpor přechod - okolní prostředí) určené v dokumentaci [47] lze pomocí vztahu

$$t_{up} = P \cdot R_{JA} \quad (7.8)$$

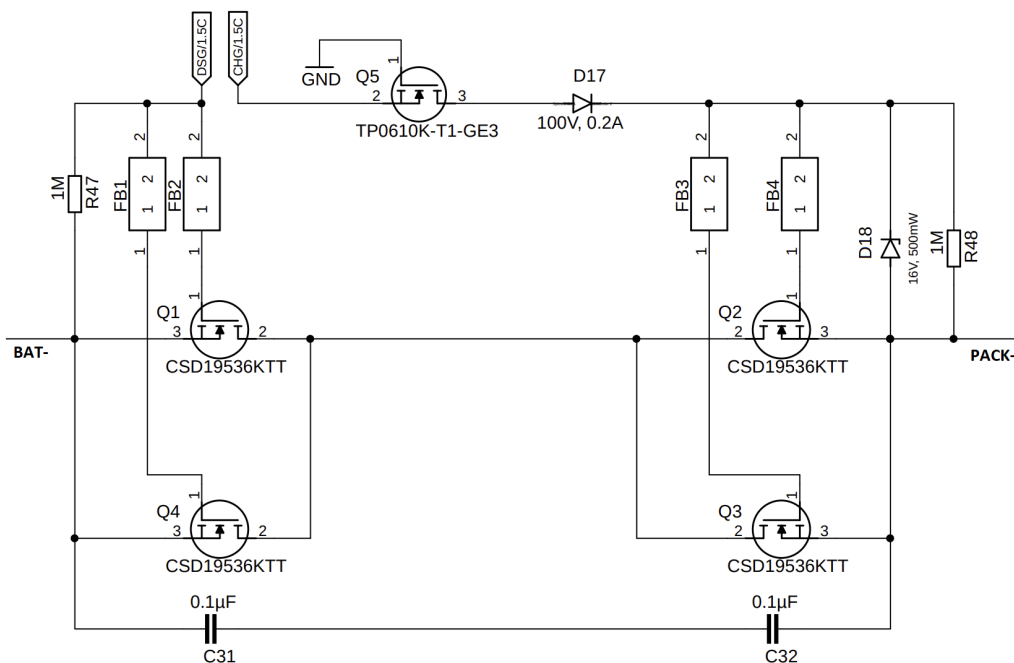
zjistit, o kolik se MOSFET ohřeje vůči okolnímu prostředí, tedy:

$$t_{up} = P \cdot R_{JA} = 0,63 \cdot 62 = 39,06 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7.9)$$

V případě přičtení teploty okolního prostředí $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ získáme celkovou teplotu součástky:

$$39,06 + 25 = 64,06 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.10)$$

Antisériové zapojení tranzistorů Q1 a Q2 (v případě Q4 a Q3) má své opodstatnění. U MOSFET může z pinu Source do pinu Drain vždy téct proud díky parazitní diodě [45][43][44][47]. V případě zapojení pouze jednoho tranzistoru do obvodu by z jedné strany neustále tekla proud. Tranzistory jsou proto umístěné proti sobě piny Source, kdy jsou parazitní diody orientovány směrem od sebe, a díky tomu je v kombinaci 2 tranzistorů obvod možné odepnout z každé strany. Tím je pokryto jak nabíjení, tak i vybíjení. Jelikož mají parazitní diody úbytek napětí až $1,1 \text{ V}$, není vhodné, aby v případě sepnutí jednoho tranzistoru proud dále procházel parazitní diodou druhého tranzistoru (přenos tepla), proto se spínají společně. Pro řízení mosfetů slouží registr SYSCTRL2 na posledních 2 bitech CHG a DSG, který po zvolení logické nuly a jedničky baterii rozepne či sepne k určité zátěži [30]. Paralelní zapojení tranzistorů Q4 a Q3 slouží ke zvýšení možného průchozího proudu, ale také k šíření tepla do širší oblasti PCB.



Obrázek 7.6: Schéma zapojení FET



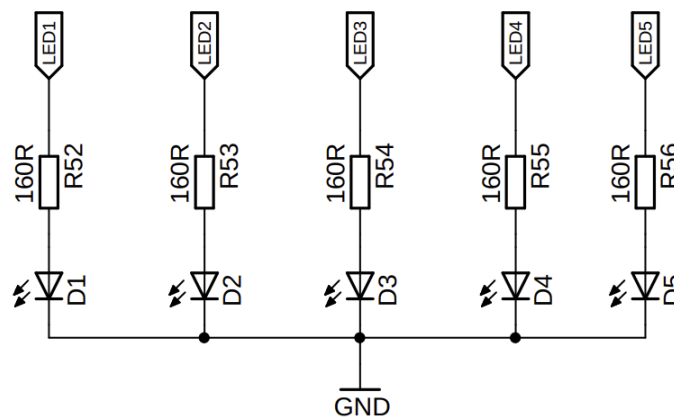
Dioda D18 slouží k prevenci proti rychlému sepnutí tranzistoru Q2 a Q3. R48 slouží k udržení vysoké impedance, když jsou MOSFETY Q2 a Q3 rozepnuté - požadavek BQ navíc zajišťuje že na pinu CHG nikdy nevznikne napětí vyšší než 20 V. Dioda D17 slouží k zabránění toku proudu do obvodu. Tranzistor typu P Q5 slouží k odpojení pinu CHG od PACK-a tím udržuje pin CHG mimo jakékoliv napětí [45]. V případě, že není na CHG žádné napětí je PACK- pomocí tohoto tranzistoru uzemněný.

Signalizační prvky:

K světelné signalizaci bylo vybráno 5 LED diod v SMD pouzdře. Byly vybrány low power diody s propustným proudem $I_f = 2$ mA. Tyto LED diody poslouží v návrhu jako signalizace stavu SoC v %:

- Dioda D1, indikující stav SoC na 20 %
- Dioda D2, indikující stav SoC na 40 %
- Dioda D3, indikující stav SoC na 60 %
- Dioda D4, indikující stav SoC na 80 %
- Dioda D5, indikující stav SoC na 100 %

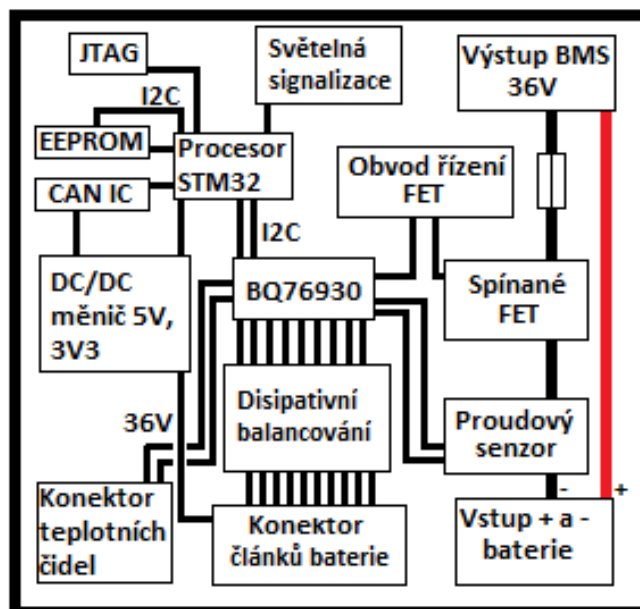
Spínání diod bude vždy při zapnutí BMS a na vyžádání stisknutím příslušného tlačítka.



Obrázek 7.7: Schéma zapojení LED diod

7.1.1 Layout PCB

Komponenty byly rozmístěny podle načrtnutého obrázku 7.8 tak, aby periférie BMS byly vždy nejkratší cestou navedeny k ostatním komponentám [48][49].



Obrázek 7.8: Rozvržené komponenty na PCB

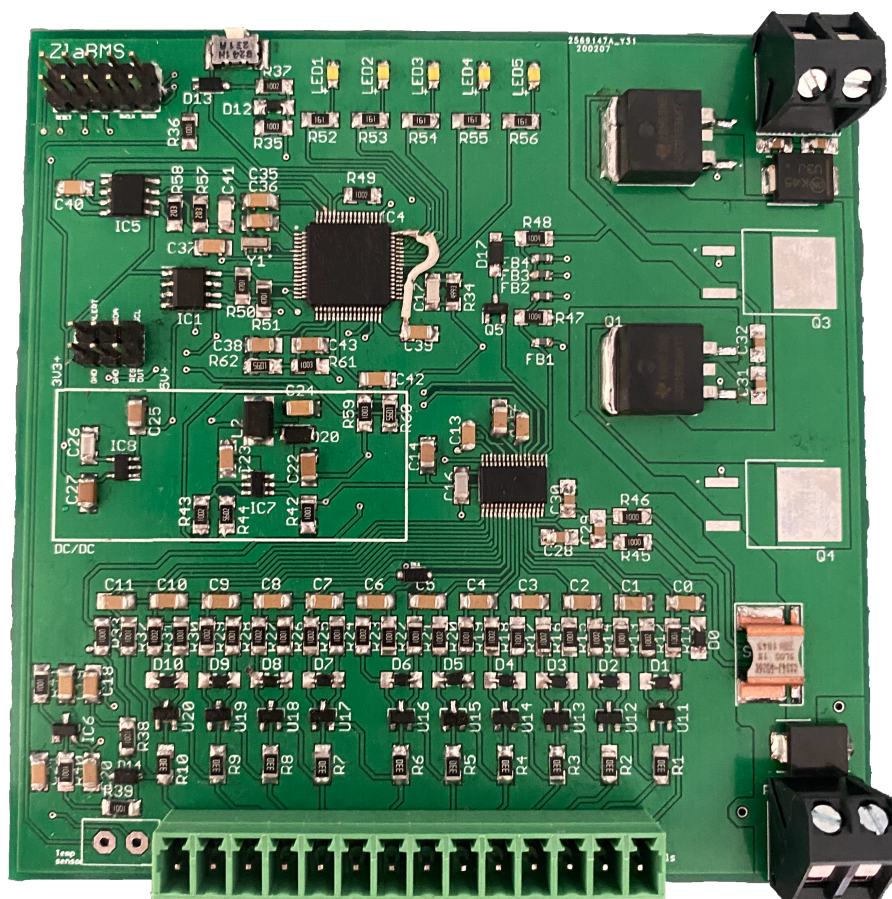
V dolní části lze vidět vstupy pro baterii, tedy konektor balancování, hlavního napájení a konektor teplotních čidel. Na opačné straně byl navržen výstup z BMS, který slouží k zapojení zařízení. Mezi hlavní cestou baterie a spotřebiče jsou umístěné tranzistory, které zajišťují spínání či rozepínání připojené zátěže a proudový senzor. BMS IC BQ76930 umístěný přímo ve středu DPS. Nouzové odpojení baterie je vyřešeno smd pojistkou 15 A.

Na levé straně DPS lze nalézt DC/DC měnič, logické obvody MCU, komunikující s BQ76930 přes komunikační sběrnici I2C, EEPROM a CAN. Programovací konektor JTAG je navržen v levém horním rohu pro lepší manipulaci při programování.

7.2 Návrh DPS

7.2.1 ZlamBMS

Podle schémat a layoutu v předchozích kapitolách byla vyrobena deska plošných spojů.

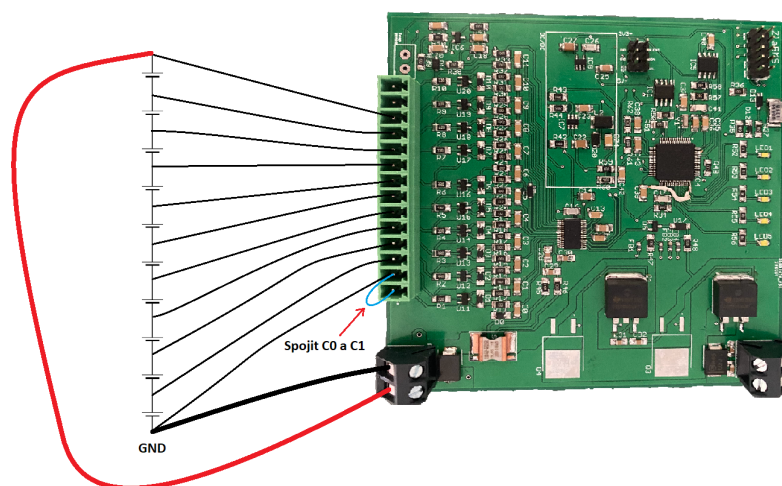


Obrázek 7.9: ZlamBMS v1

Deska byla navržena jako dvouvrstvá DPS jednostranně osazená. Součástky byly osazeny ručně. DPS má rozměry 100 mm × 100 mm, jelikož se jedná o testovací model, nepředpokládá se zástavbou do konkrétní aplikace. Jak lze vidět na DPS obr. 7.9, je zde navedena drátová propojka napájení pro MCU, v návrhu byla tato nutnost opomenuta viz [Testování a ladění chyb](#). Následně byl obvod patřičně otestován v kapitole [Testování a porovnání BMS](#).

7.2.2 Testování a ladění chyb

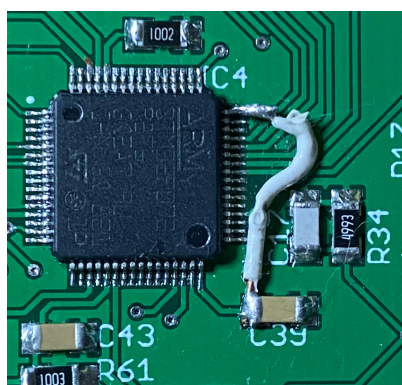
Po dokončení prvního návrhu DPS byla BMS náležitě otestována.



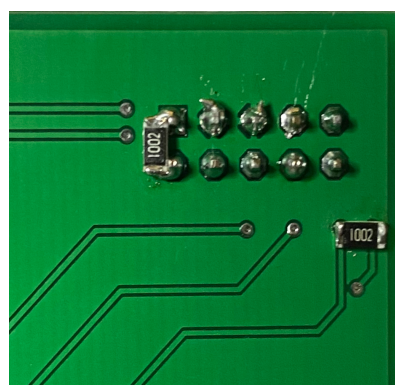
Obrázek 7.10: Zapojení baterie ke ZlamBMS

Po naměření správných hodnot napájení 3,3 V a 5 V byl obvod otestován připojením k PC pomocí SWD programátoru nucleo STM32 propinovaného do konektoru JTAG. Následoval pokus o oživení MCU, kdy bylo MCU po prvním zapojení nečinné, a po opakované kontrole všech připojených periférií byla nalezena chyba na straně návrhu HW. Chybou byl odpojený pin MCU pro napájení výstupů z IC a absence pull-up rezistorů pro programovací piny SWDIO a NRST.

Chyba byla opravena drátovou propojkou nejbližší možnou cestou od 3V3 k IC a osazením 10k odporů k cestám SWDIO a NRST viz obr. 7.11.



(a) Navedení 3V3 na MCU

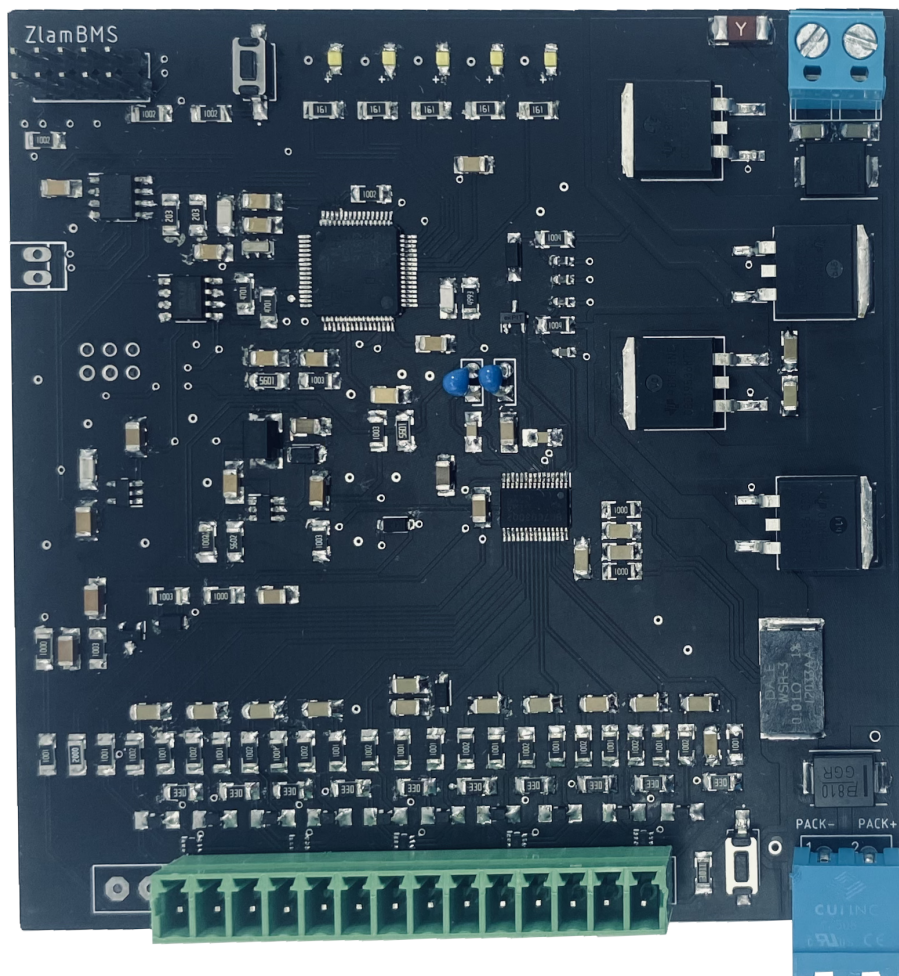


(b) 2x Pull-up

Obrázek 7.11: Úpravy PCB

Po opětovném zapojení byl MCU již plně funkční. Oživená DPS byla v této chvíli připravena pro naprogramování a její plnou konfiguraci.

Po nalezení chyb bylo usouzeno, že je vhodné navrhnout nový plošný spoj verze 2 s doplněnými nedostatky z předchozí verze.



Obrázek 7.12: ZlamBMS v2

Oproti předchozí verzi zde byly přidány tlačítka pro programovatelné akce, přidán výstup pro CAN, balancovací obvod byl vylepšen kvalitnějšími součástkami, proudový senzor byl nahrazen za přesnější, a byl přidán nový bezpečnostní prvek smd pojistka 15 A. Připojení hlavních vodičů baterie k BMS bylo lépe vyřešeno náhradou snadno rozpojitelné svorkovnice - šroubovatelná svorkovnice byla z důvodu neustálé manipulace nepraktická.

Tabulka 7.1: Porovnání navrženého bateriového managementu s komerčním řešením

	ZlamBMS	20 A LLT BMS
MCU	STM32F072	ATmega328P
BMS AFE	BQ76930	BQ76930
Měření baterie	napětí, proud, teploty	napětí, proud, teploty
Ochrany	přepětová a podpětová ochrana, ochrana proti zkratu, většímu proudu a teplotám, možnost odpojení FET	přepětová a podpětová ochrana, ochrana proti zkratu, většímu proudu a teplotám, možnost odpojení FET
FET	2x CSD19536KTT	10x KNB3308A
Zaznamenávání dat	ano, zaznamenávání SoC, počet cyklů *	N/A
Komunikační sběrnice	UART, CAN	UART
Odhad SoC, SoH	SoC	SoC
Balancování	pasivní, 127 mA **	pasivní, 50-60 mA
Vybíjecí/nabíjecí proud	15 A*** / 15 A	20 A / 20 A
Maximální počet článků	10	10
Minimální počet článků	6****	10
Příslušenství	PC aplikace pro konfiguraci	PC aplikace pro konfiguraci, BT modul
Vlastní spotřeba	běžný režim 18 mA / režim spánku 2 mA *****	režimu spánku 150 µA / běžný režim 20 mA
Rozměry DPS	100 mm x 100 mm	110 mm x 65 mm

* interní zaznamenávání dat BMS pomocí EEPROM

** výpočet kapitola balancovací obvod

*** při trvalém 15 A zatížení nutné chlazení

**** nezapojené články nutno propojit s nejbližším nižším článkem

***** odvozeno z dokumentace MCU a BMS IC

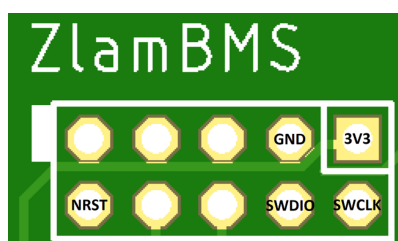


8 Programování a popis algoritmu

Programování se rozděluje na 2 části:
Programování čipu STM32 v jazyku C a tvorba uživatelské aplikace v jazyku C#.

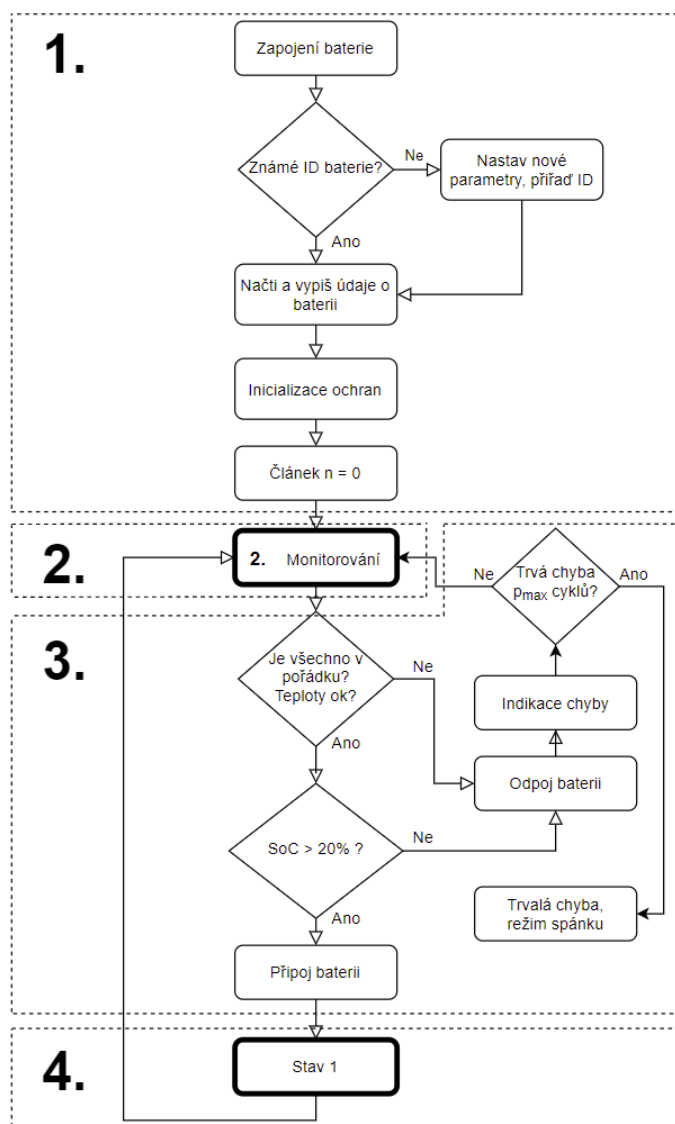
8.1 Programování MCU

Pro připojení k BMS přes sběrnici SWD byl využit modul ST-link na kitu Nucleo STM32F446RET6. K programování MCU byl použit software STM32CubeIDE verze 1.3.0.



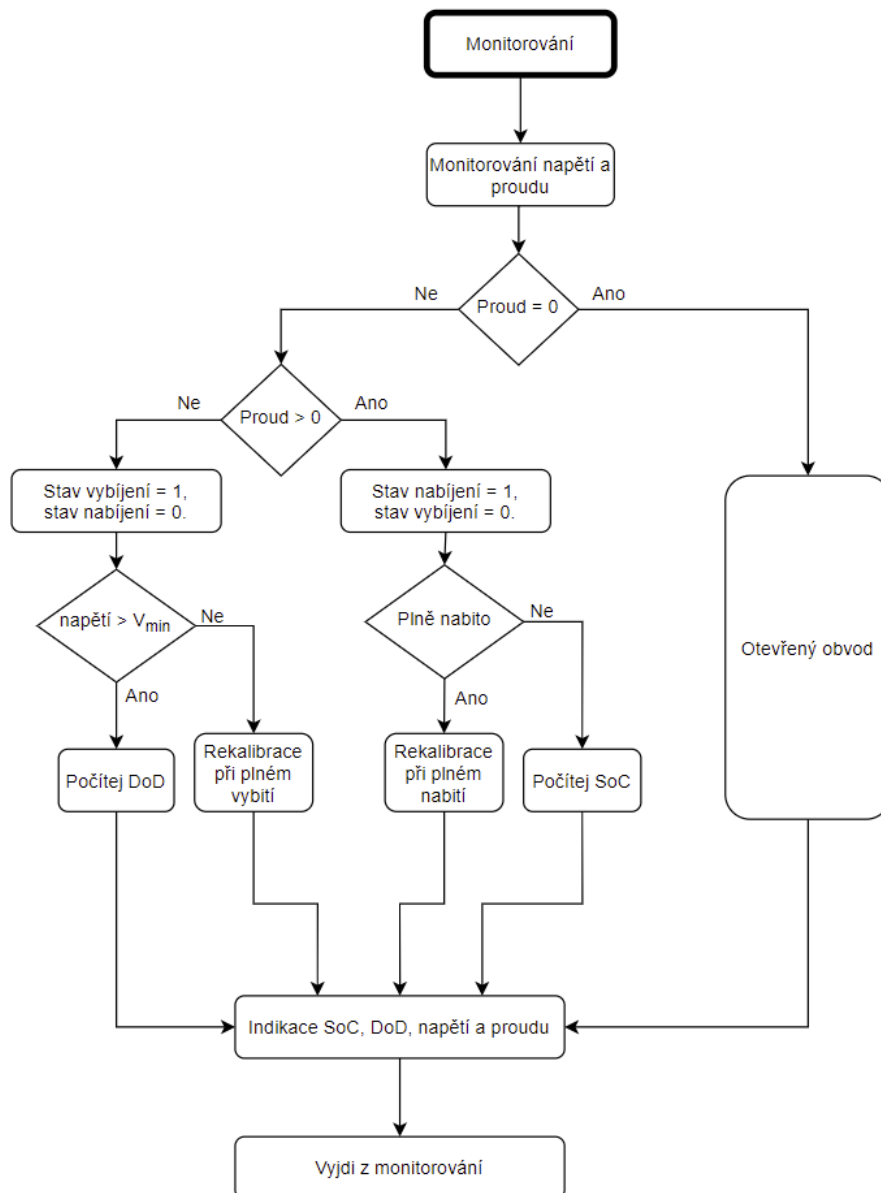
Obrázek 8.1: Pinout SWD sběrnice JTAG

Algoritmus BMS je nejdůležitější částí celého systému. Jedná se o stanovený soubor pravidel, podle kterých se vyhodnocovací systém řídí. Algoritmus se rozděluje na několik částí na obrázku 8.2 vývojový diagram. První částí (část 1) je nastavení všech parametrů BMS a její inicializace, identifikace baterie (porovnání známého napětí) a její zařazení do systému. Dalším krokem je inicializace ochran, vyčtení nastavených hodnot a následné zahájení sekvence posílání „paketu“ po sběrnici UART - tedy balíku obsahující veškeré údaje o připojené baterii. Tento balík slouží pro konfiguraci celé BMS, a v případě propojení s uživatelským rozhraním si GUI tento balík odchytí, rozbalí, zobrazí v grafické podobě a následně může upravovat jednotlivé parametry viz kapitola [Uživatelské rozhraní](#). V dalším kroku (část 2, 3 a 4) přechází algoritmus do hlavní opakující se smyčky. V této smyčce se vyhodnocuje celkové napětí, proud procházející obvodem, stav balancování, SoC, UV, OV, a v případě vyhodnocené chyby se baterie odpojí od připojené zátěže / nabíječky.



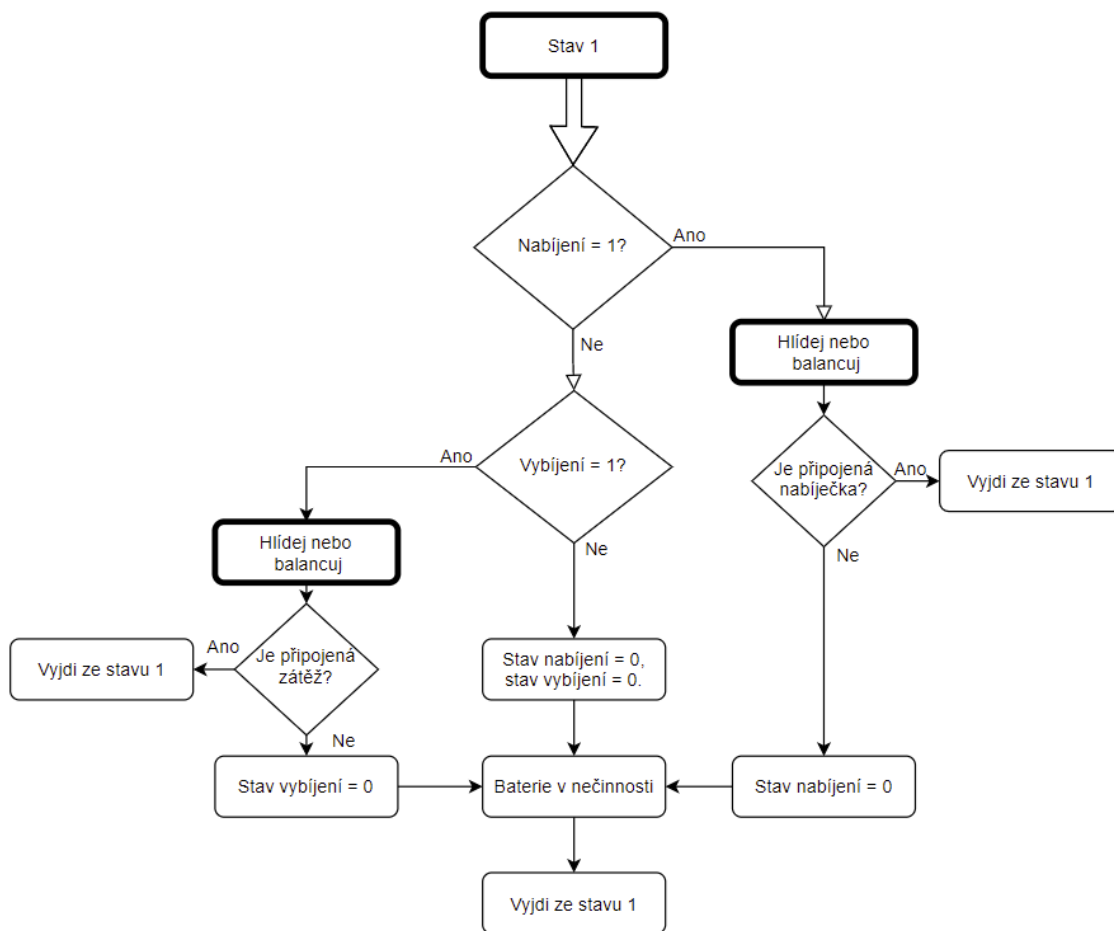
Obrázek 8.2: Hlavní vývojový diagram

Vnořením do monitorování v části 2. systém přechází do stavu zjišťování napětí, proudu baterie a odvozování stavu SoC. Prvním krokem zjistí, zda-li je baterie ve stavu nabíjení, vybíjení či v klidovém stavu. Následně vyhodnotí v případě nabíjení SoC a vybíjení DoD.



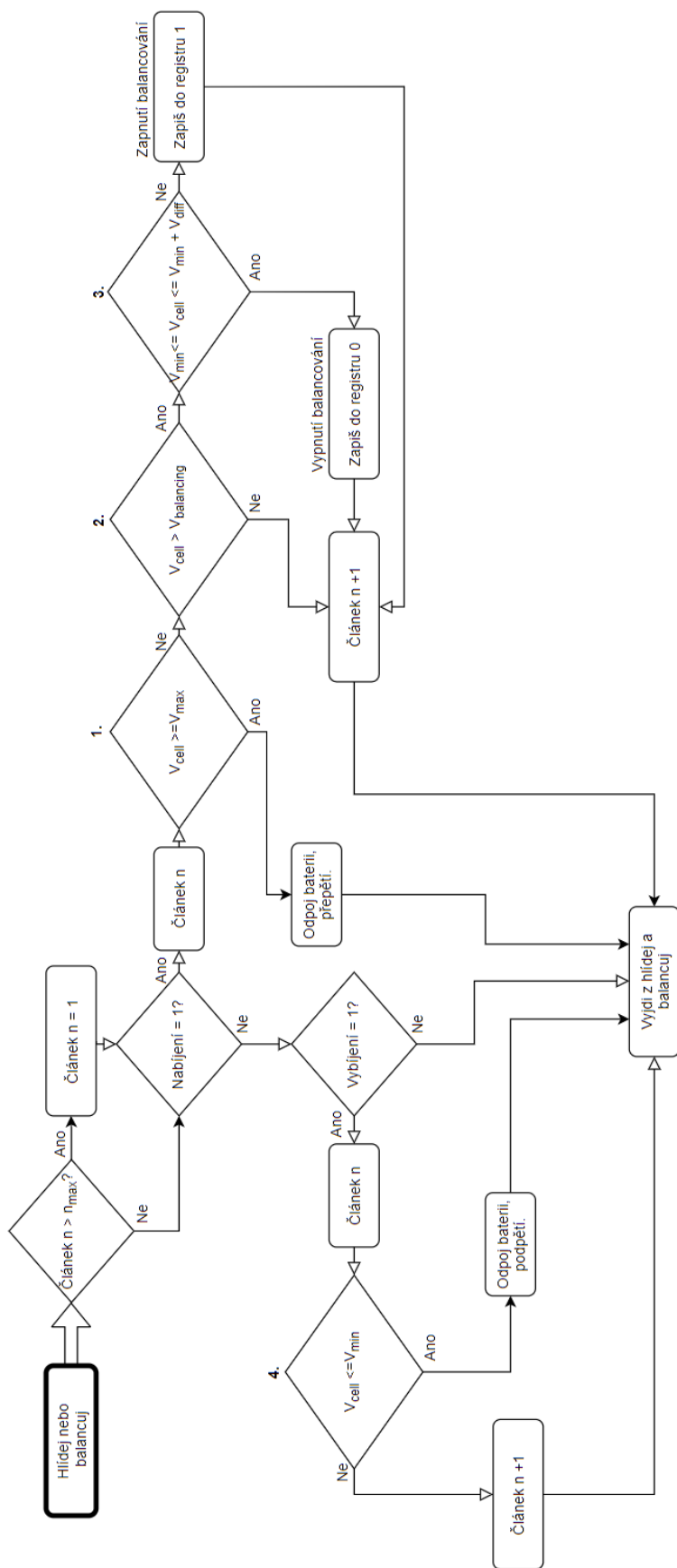
Obrázek 8.3: Monitorování napětí, proudu a výpočet SoC

Část 3 představuje ochranný systém, který v případě detekce limitů ochran či závady na samotném BMS systému přechází do stavu chyby, kde je okamžitě odpojena baterie. V tomto stavu setrvává do té doby, než jsou splněny limity ochran nebo závada odstraněna. Příkladem zde může být dosažení limitů napětí na akumulátoru, nekomunikující integrovaný obvod, dosažení teplotních limitů či detekce přerušného vodiče pro měření napětí na člancích. Pokud se chyba po nastavených p_{max} neodstraní, přejde BMS do trvalé chyby, kde dojde k uspání, a v tomto stavu setrvává do požadovaného servisního zásahu.



Obrázek 8.4: Vývojový diagram - 2

Stav 1 (část 4) slouží jako hlavní algoritmus pro zjištění napětí jednotlivých článků. Tento stav monitoruje každý článek zvlášť, a v případě splněné podmínky zapíná balancování. Hlavní algoritmus pro hlídání napětí jednotlivých článků a jejich podmínka pro balancování je v podstavu „hlídej a balancuj“.

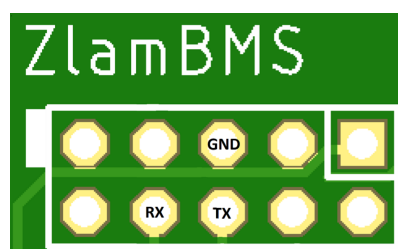


Obrázek 8.5: Vývojový diagram - logaritmus balancování

V obou případech nabíjení / vybíjení je vždy nejdříve zjištěno napětí každého z článků (č. 1 a 4). Pokud není podmínka splněna, a jeden z článků vykazuje vyšší / nižší napětí, je předán signál „chyby“, a je indikováno plné nabití nebo vybití. V případě nabíjení splnění podmínky č. 1 se může přejít k podmínce balancování č. 2. Parametr $V_{balancing}$ určuje, od jakého prahového napětí se články začnou balancovat, jestliže překročí tuto stanovenou hodnotu. Překročením prahové hodnoty $V_{balancing}$ algoritmus vstoupí do podmínky balancování č. 3. Hlavní podmínkou balancování je porovnávání článku s nejnižší hodnotou napětí akumulátoru V_{min} s aktuálně porovnávaným článkem n . Při balancování je stanoven nastavitelný parametr V_{diff} , který udává mez všech článků od V_{min} po $V_{min} + V_{diff}$. Pokud se aktuálně porovnávaný článek ocitne mimo tuto mez, je spuštěno balancování.

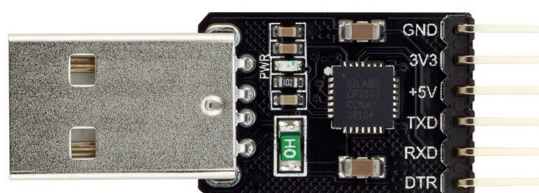
8.2 Uživatelské rozhraní

GUI představuje pro uživatele důležitou část celého zařízení. V praxi využívají jen grafické rozhraní a nezajímají se o to, co se děje „uvnitř“. K vytváření GUI byl použit software Visual Studio 2019 v programovacím jazyku C#. Pro komunikaci mezi GUI a BMS slouží sběrnice UART.



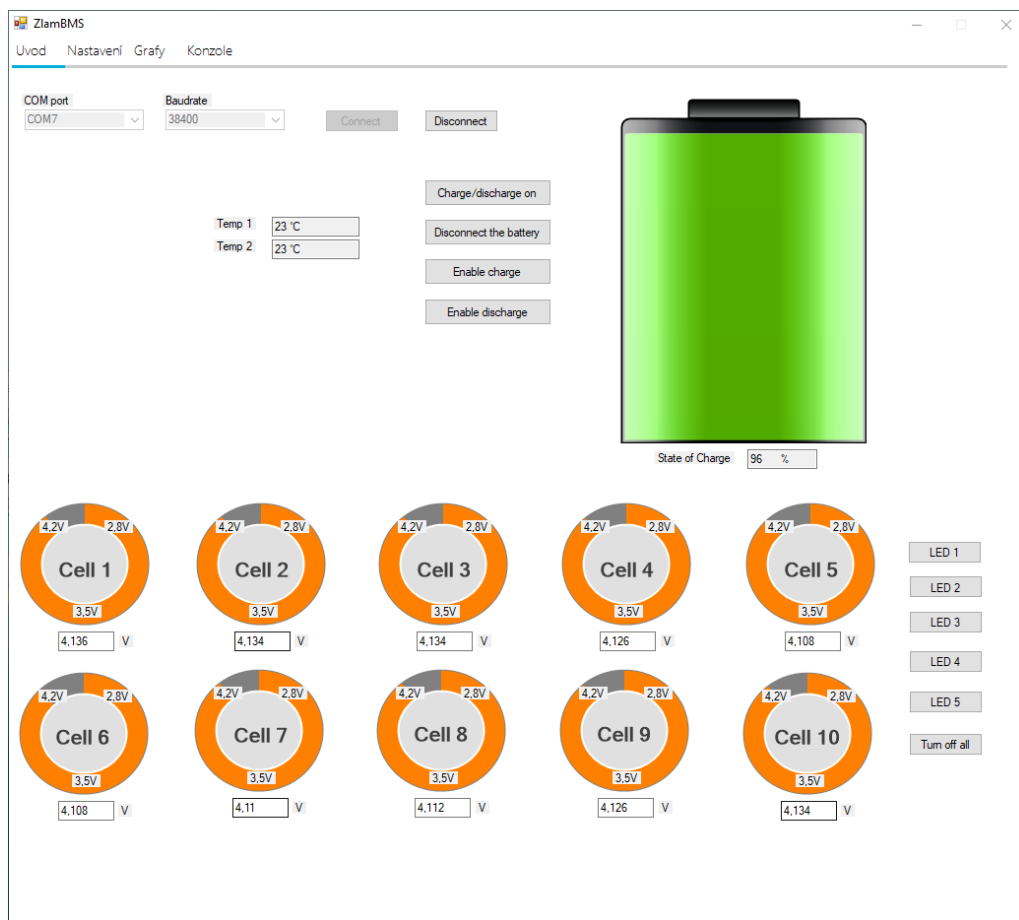
Obrázek 8.6: Pinout SWD sběrnice UART

Pro připojení bylo nutné využít externího převodníku USB - UART, kde byl využit převodník CP2102. V případě tohoto převodníku bylo zapotřebí nainstalovat vhodné ovladače.



Obrázek 8.7: Převodník CP2102 USB - UART

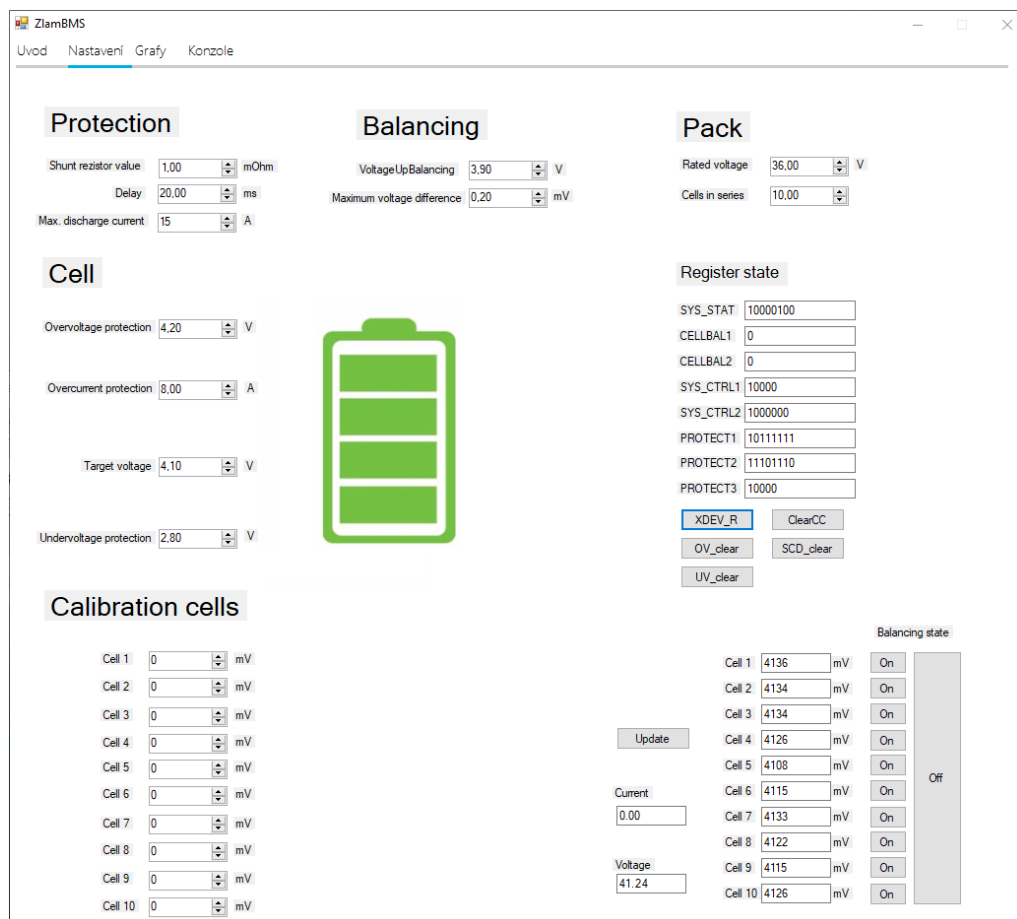
Okno aplikace je zobrazeno na obrázku 8.8 a je výchozím zobrazením v sekci úvod, když je aplikace spuštěna. Pro připojení je nutné vybrat v aplikaci vhodný sériový port s nastaveným baudrate 38400 bps a zvolit volbu connect. Aplikace vyčte jednotlivá data ze zachyceného „paketu“ BMS a načte je do jednotlivých rozhraní aplikace. Úspěšné připojení lze poznat vykreslením animace napětí u jednotlivých článků a odemknutí dalších položek v menu nastavení, grafy a konzole. Na úvodní obrazovce lze manuálně spínat/rozepínat zátěž baterie (například z důvodu přepravy) či zapínat jednotlivé LED diody. Na stránce jsou zobrazeny také teploty z interních NTC čidel. V případě potřeby je možné zapojit i externí čidla a tím měřit teplotu přímo na baterii.



Obrázek 8.8: GUI - úvodní obrazovka

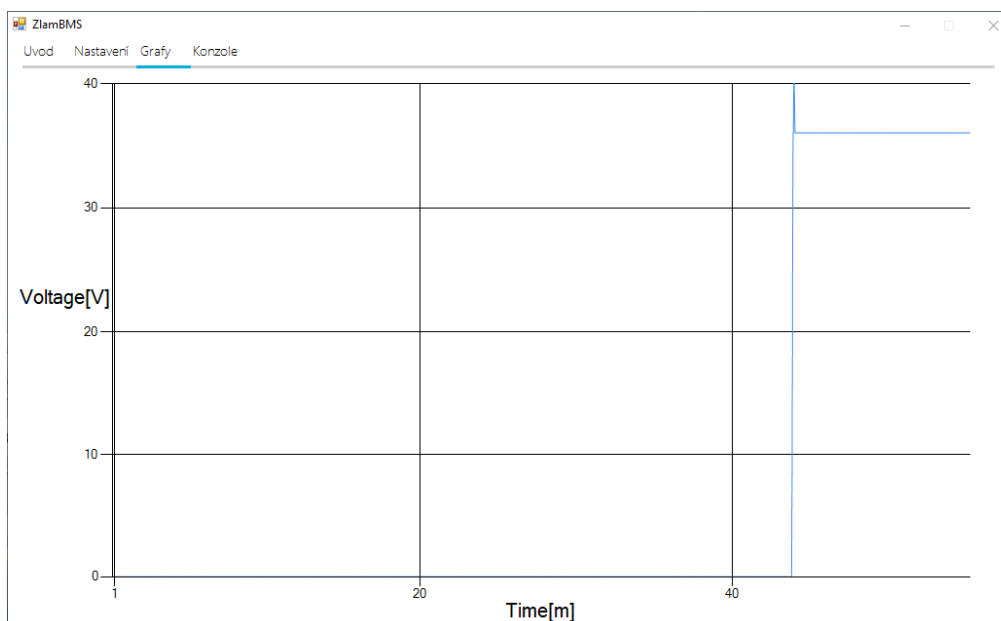
V sekci nastavení (obr. 8.9) lze měnit hodnoty jednotlivých ochran a parametrů baterie od nastavení parametrů VoltageUpBalancing - U_{diff} v sekci balancování, až po nastavení ochran OV nebo UV. Napravo jsou zobrazené jednotlivé registry integrovaného obvodu, a v dolní části je zobrazené napětí jednotlivých článků baterie v zjednodušené tabulce s možností zapnutí manuálního balancování. V případě napěťových rozdílů u jednotlivých článků po ověření multimetrem lze jednotlivé články kalibrovat na správné napětí v rozsahu ± 100 mV. Chybové stavy v registru SYS_STAT lze mazat jednotlivými tlačítky pod zobrazenými registry.

Tyto chybové stavy se objevují v případě OV nebo UV, nebo pokud se systém uspí a zůstane ve stavu trvalé chyby, kdy je nutný servisní zásah. V případě těchto chybových stavů je baterie trvale odpojena. Pro zapojení baterie je nutné v případě odstranění závady tyto chybové stavy odstranit příslušnými tlačítky.



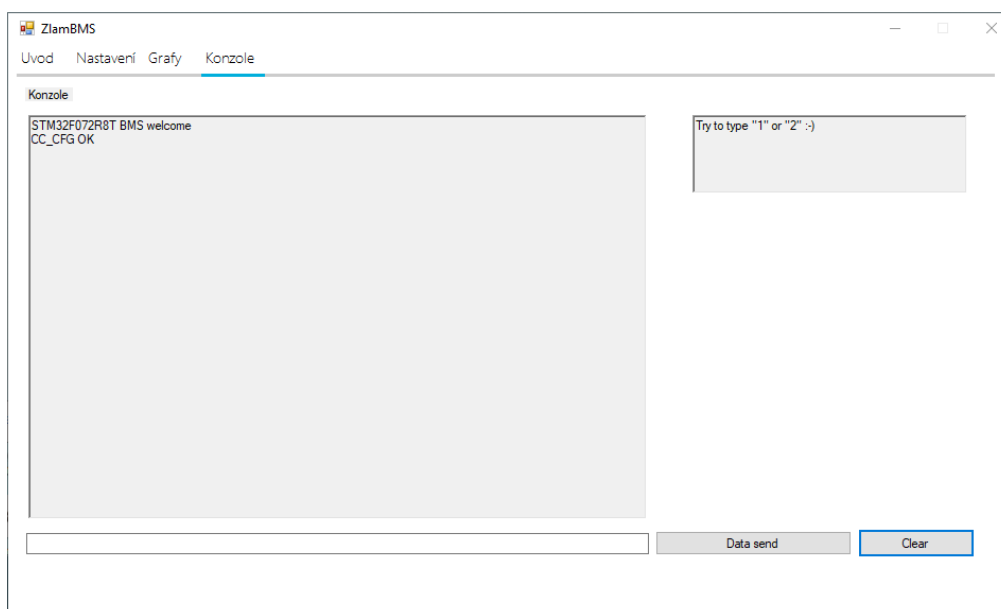
Obrázek 8.9: GUI - nastavení

Graf v aplikaci slouží k vykreslení nabíjecích či vybíjecích charakteristik v reálném čase viz obr. 8.10.



Obrázek 8.10: GUI - graf pro vykreslení vybíjecí/nabíjecí charakteristiky

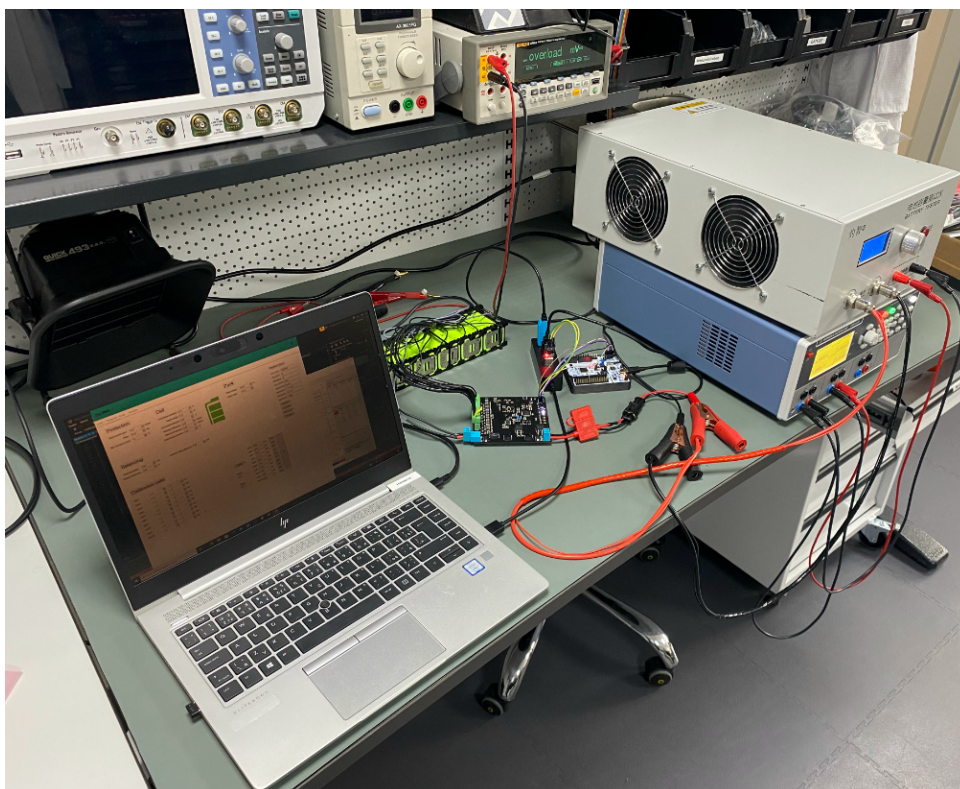
Sekce konzole obr. 8.11 slouží k vyvolání příkazů, jenž nejsou implementované do GUI - je vhodné ukázat, že manuálním posíláním zpráv přes UART je možné nastavovat jednotlivé parametry, příkladem může být rozdíl uživatelských práv. Uživatel nezná příkazy, které by nastavovaly například odlišnou chemii baterie, a tyto příkazy bude znát jen servisní pracovník. Uživatel bude využívat jen tlačítka a modifikovatelná okénka s pevně nastaveným rozsahem, tím se zajistí, že nikdy nenastaví špatné hodnoty, které by mohly baterii uškodit.



Obrázek 8.11: GUI - konzole

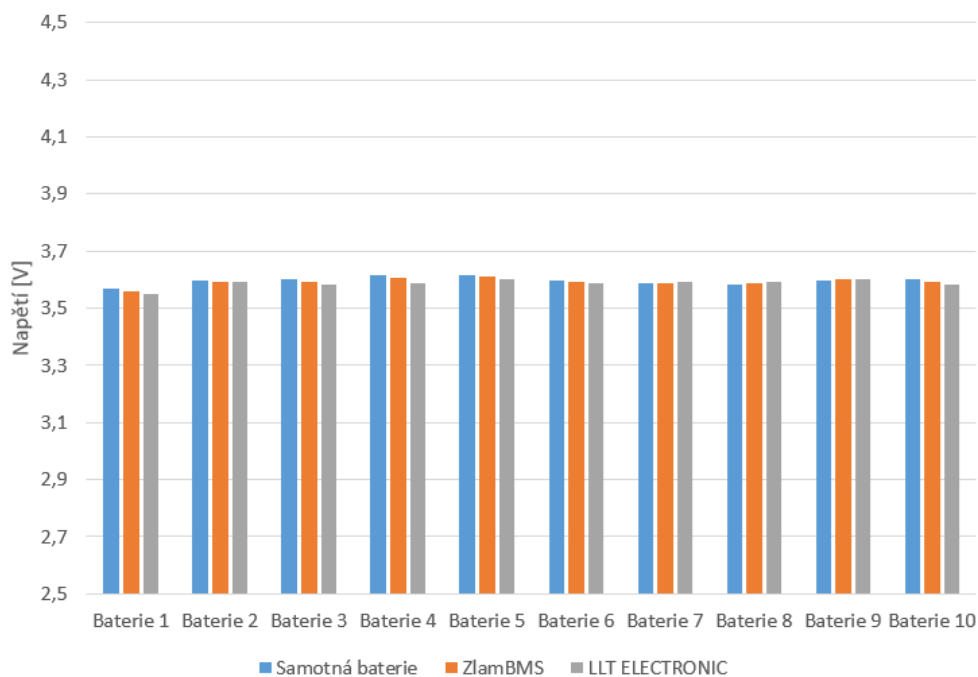
9 Testování a porovnání BMS

Po oživení BMS systému bylo nutné vlastní návrh otestovat zátěžovými testy. K testování posloužila zapůjčená baterie 10S1P složená z článků Swing 5300 s nominální kapacitou 5300 mAh [50]. Nabíjecí a vybíjecí proud byl zvolen 0,4C. Pro porovnání byl otestován také LLT BMS. K testování byl využit bateriový tester EBC-B20H od firmy ZKETECH a laboratorní zdroj pro nabíjení baterie nastaveným napětím 42 V. V prvním případě byla zatěžována samotná baterie bez BMS, následovalo testování ZlamBMS, a v poslední řadě byla otestována LLT BMS. Pro testování bylo zvoleno 10 cyklů, kdy zastavení vybíjení a nabíjení bylo provedeno v limitech baterie, tzn. 100 % nebo 20 % SoC, tak bylo testování zastaveno. Tímto způsobem byla ověřena funkčnost ochranných prvků BMS.

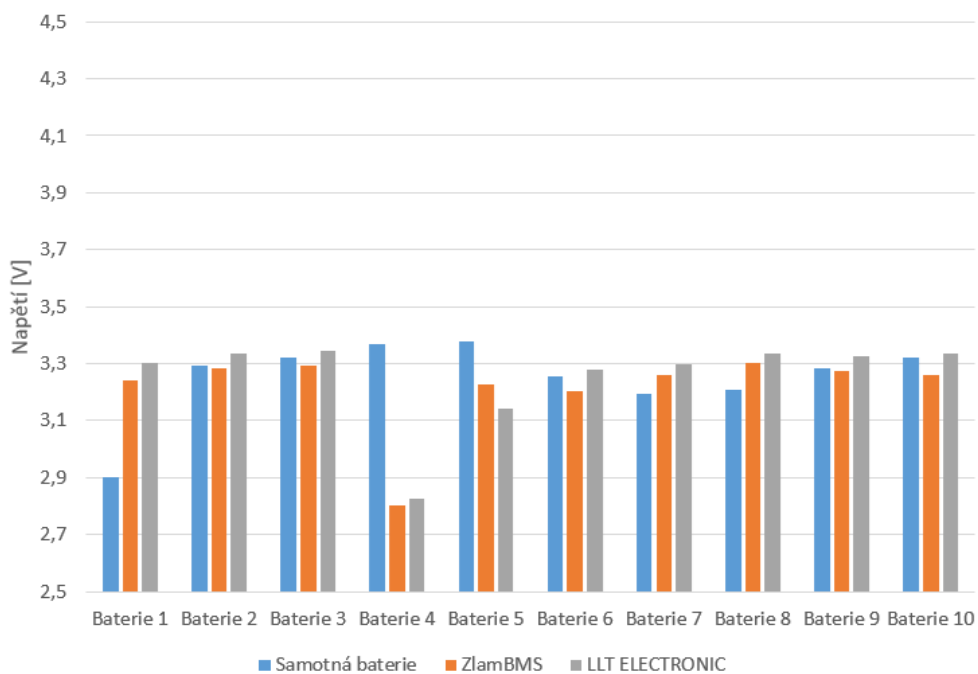


Obrázek 9.1: Pracoviště pro měření nabíjecích/vybíjecích charakteristik

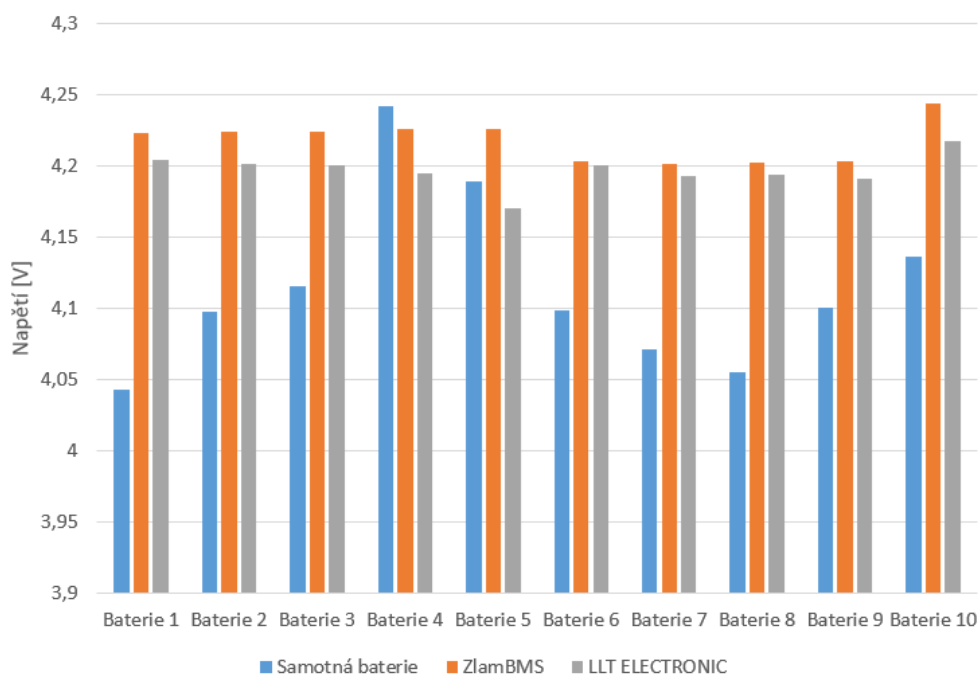
9.1 Porovnání výsledků



Obrázek 9.2: Počáteční stav před testem 10 cyklů



Obrázek 9.3: Vybíjení 2A do úplného minima - 10.cyklus



Obrázek 9.4: Nabíjení 2A do úplného maxima - 10. cyklus

Z důvodu velkého objemu dat jsou zde zobrazeny pouze výsledky 10. cyklů z každého testování. Veškeré podklady k naměřeným datům lze nalézt v příloze. Test byl prováděn za stálé pokojové teploty 23 °C za stejných podmínek. Pro přesnější porovnání byl spočítán rozptyl výsledků 10. cyklu podle vzorce:

$$Rozptyl(x_{testovane}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (9.1)$$

Tzn. čím menší hodnota rozptylu bude, tím tato technologie balancuje lépe.

Tabulka 9.1: Výsledky měření

	Baterie	LLT BMS	ZlamBMS
OV protection [V]	4,2	4,2	4,25*
UV protection [V]	2,8	2,8	2,8
Čas nabíjení	2:15	2:27	2:46
Čas vybíjení	2:06	3:05	3:20
Rozptyl	0,00336024	0,00012745	0,00018944

* špatně nastavený parametr OV protection

9.2 Zhodnocení naměřených dat

Lze si všimnout větších rozdílů naměřených dat u baterie s BMS a bez viz graf 9.2, 9.3 nebo 9.4. V případě vlastního návrhu si systém nevedl špatně, ale v porovnání s LLT BMS má větší rozptyl balancování. V případě vyššího napětí u ZlamBMS nad 4,2 V u jednotlivých článků se stala chyba v nastavení parametru OV protection na 4,25 V. Pro budoucí použití by bylo vhodné nastavit maximální napětí na 4,2 V. Z naměřených dat lze dokázat, že balancováním jednotlivých článků baterie lze dosáhnout lepších vlastností oproti článkům, které nebyly za celou dobu balancovány vůbec.

Měřením byla také ověřena funkčnost ochran ZlamBMS. Při překročení nastavených limitů BMS úspěšně odpojila baterii od připojené zátěže/nabíječky. Časový rozdíl v tabulce 9.1 ZlamBMS a LLT BMS byl evidentně ovlivněn i špatně nastaveným parametrem OV U_{max} . Lze porovnat jednotlivé časy nabíjení/vybíjení, kde je vidět poměrně velký rozdíl mezi baterií s bateriovým managementem a bez bateriového managementu. Jedná se pouze o 10 cyklů, tedy v případě, pokud by cyklování pokračovalo dále, by pravděpodobně baterie bez balancování dlouho nevydržela a neustálým používáním by se snižoval poměr využitelné kapacity baterie.

V případě vybíjení jsou ve všech ze 3 případů na vině slabší články, které při zlomu cca 20 % SoC začnou náhle napětově klesat až do limitů i v případě, že jsou ostatní články v dobré kondici. V grafu 9.3 je vidět stav baterie po vybíjení, kde v tomto konkrétním případě se jedná o články 1 a 4. Tyto články klesly až na minimální napětí 2,8 V i přes fakt, že ostatní články nepřekročily hranici 3,1 V.

Graf 9.4 zobrazuje články po nabíjení tedy 100 % SoC. Baterie nabíjená bez připojeného balancování dopadla o dost hůře (rozptyl 0,0033) než u aplikovaného balancování. K samotné baterii je vhodné pronést, že pokud by byly články kvalitní, teoreticky by bylo možné používat baterii i bez připojeného balancování, nehrozil by totiž tak velký napětový rozdíl článků. V tomto konkrétním případě se jedná o starší baterii, tedy zde bylo očekávané, že se články mohou dost odlišit. V tomto případě je rozdíl až 230 mV.

9.3 Možnosti dalšího vývoje

Dalším vývojem ZlamBMS by mohla být kompaktnější velikost. Jelikož je snahou dosáhnout co nejmenších rozměrů baterie, je nutné tomu přizpůsobit i BMS. Na ZlamBMS byly využívány SMD pouzdra velikosti 1206, proto by bylo možné využít SMD 0603 či ještě menší 0402 a tím by se mohl návrh významně zmenšit.

Dalším možným vylepšením by mohla být náhrada mikroprocesoru STM32 řady F úspornější řadou, například L, a zároveň použití menšího pouzdra.

V návrhu je také začleněno CAN rozhraní, které je připraveno ke komunikaci s nabíječkou nebo řídicí jednotkou elektrokola. EEPROM byla pro tuto BMS navržena jako paměťové úložiště pro možnosti zaznamenávání průběhu života baterie - zjednodušení diagnostiky (po)záručních oprav. Do paměti se smí zapisovat pouze použitelné údaje pro diagnostiku s využitím RTC MCU. Příkladem je počet cyklů baterie, výpis chyb (událostí) nebo SoC.

Další možnou úpravou by byla implementace integrovaného obvodu BQ76940, která umožňuje zapojit až 15S článků. Tyto úpravy by poté vyžadovaly změnu elektronických součástek. V případě implementace rozhraní bluetooth by se mohla zjednodušit konfigurace BMS například pomocí mobilní aplikace. Otázkou by pak byl trvalý proudový odběr BMS a vytvoření nového algoritmu.

9.4 Dosažené výsledky

Úspěšně byl tento systém otestován reálným měřením pomocí laboratorního přípravku a porovnán s již existujícím řešením. V souladu s dílčími cíli práce byl vlastní návrh implementován a otestován na sestaveném elektrokole.



Obrázek 9.5: Elektrokolo s připojenou ZlamBMS

Závěr

V první části diplomové práce byla zpracována rešerše lithiium-iontových článků, kde byla popsána jejich mechanická a elektrochemická konstrukce. Li-ion články jsou obecně citlivé na provozní parametry, a proto je nutné dodržovat stanovené hodnoty. Opuštění těchto povolených parametrů by mohlo vést k výraznému zkrácení životnosti článků. Při provozu je proto nutné tyto články neustále monitorovat, a v případě překročení stanovených parametrů je nutné vykonat náležitý zásah. Pro tyto zásahy se používají monitorovací a ochranné systémy (BMS). Po detailní analýze akumulátorů byl proveden rozbor funkcí a způsobů vyhodnocování naměřených dat pomocí BMS.

Následující část práce se na základě zjištěných informací zabývala metodami návrhu vlastního řešení BMS a byla popsána jeho koncepce.

Návrh byl zrealizován deskou plošných spojů ZlamBMS s kompletním algoritmem, kde byla vyvinuta konfigurační PC aplikace. Za pomoci této aplikace lze v aplikaci nastavovat profily jednotlivých baterií a vyčítat údaje k analýze, které lze dále ukládat do počítače nebo na paměť EEPROM na DPS. Dále umožňuje grafické zobrazení nabíjecích nebo vybíjecích charakteristik. K dispozici je také konzole pro nastavení skrytých parametrů, které je možné v případě potřeby nastavit. Vývoj prošel dvěma návrhy, kdy první vzorek ZlamBMS obsahoval chyby, které byly v posledním vzorku opraveny. Navržený systém byl reálně otestován DC zátěží a nabíječkou po dobu 10 cyklů bez projevených chyb. Následovala implementace BMS na sestavené elektrokolo, které bylo následně podrobena zkouškou jízdy. Výsledkem tak vznikl funkční vzorek vlastního návrhu BMS systému.

Literatura

- [1] WEICKER, P., A systems approach to lithium-ion battery management. Boston: Artech House, 2014. ISBN 978-1-60807-659-8.
- [2] CENEK, M., Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-865-3403-0.
- [3] DEMIROCAK, D., SRINIVASAN, S., a STEFANAKOS, E., A Review on Nanocomposite Materials for Rechargeable Li-ion Batteries. Applied Sciences [online]. 2017, 7(7) [cit. 2021-5-16]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7070731
- [4] Cell Construction [online]. 2005 [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: https://www.mpoweruk.com/cell_construction.htm
- [5] MENICTAS, Ch., SKYLLAS-KAZACOS, M., a LIM, T. M., ed. Advances in batteries for medium and large-scale energy storage. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. Woodhead Publishing Series in Energy. ISBN 978-1-78242-013-2.
- [6] BISSCHOP, R., WILLSTRAND, O., a ROSENGREN, M., Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles [online]. 2019 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.18738.15049
- [7] LI, W., CROMPTON, K. R., HACKER, Ch., a OSTANEK, J. K., Comparison of Current Interrupt Device and Vent Design for 18650 Format Lithium-ion Battery Caps. Journal of Energy Storage [online]. [cit. 2021-5-16]. ISSN 2352-152X.
- [8] AUGERALD, A., SINGO, T., DESPREZ, P., PERISSE, F., MENECIER, S., a ABBAOUI, M. Arc analysis to the CID of li-ion battery cells in high-current applications, 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), 2014, pp. 1-7, doi: 10.1109/HOLM.2014.7031038.
- [9] IEEE Guide for Application and Management of Stationary Batteries Used in Cycling Service, in IEEE Std 1660-2008 , vol., no., pp.1-36, 25 Dec. 2008, doi: 10.1109/IEEESTD.2008.4690900.
- [10] Cathode materials. Targray [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.targray.com/li-ion-battery/cathode-materials/cathode-active-materials>

- [11] NOVÁK, J., SADÍLEK, O., a SÝKORA, P., Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu [online]. Univerzita Pardubice, 2016 [cit. 2021-5-19]. Akademická publikace.
- [12] HTCFR18650-1800mAh-3.2V: Product specification [online]. Germany: ENERdan [cit. 2021-5-16].
- [13] YONG-HOON, K. LRB-PS-CY12.50Wh-M36T: Product specification [online]. In: . 2017 [cit. 2021-5-16].
- [14] Hodina křemíku se blíží? [online]. 2019 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: www.technickytydenik.cz
- [15] Lithium-titanátové baterie: opomíjená technologie s velkým potenciálem? [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/lithium-titanatove-baterie-opomijena-technologie-s-velkym-potencialem>
- [16] ZHANG, L., PENG, H., NING, Z., MU, Z., a SUN, Ch., Comparative Research on RC Equivalent Circuit Models for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles. Applied Sciences [online]. 2017, 7(10) [cit. 2021-5-13]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/7/10/1002>
- [17] Li, S., a Cheng, X., A comparative study on RC models of lithium-ion battery, 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940818.
- [18] VALDA, L., Metody a algoritmy vyvažování sériově řazených lithiových článků. Plzeň, 2016. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
- [19] MACH, O., EICHLER, J. a KRČMÁŘ, L., "Electronics and software structure of BMS with circuits of BQ769x0 series," 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), Prague, Czech Republic, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ME49197.2020.9286669.
- [20] LIPU, M.S. HOSSAIN, M.A., HANNAN, HUSSAIN, A., M.M. HOQUE, Pin J. KER, M.H.M. SAAD a AYOB, A., A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations [online]. 2018, , 115-133 [cit. 2021-5-16]. ISSN 0959-6526.
- [21] Journal of Electrochemical Science and Technology [online]. The Korean Electrochemical Society [cit. 2021-5-16]. ISSN 2288-9221.
- [22] PowerPack 300|400|500 PowerTube 500: Bosch Systems [online]. In: BOSCH, 2018 [cit. 2021-5-18].



- [23] Manual BAFANG s TOTEM 14Ah (Tour 5.0): Samsung cell 14 Ah (504 Wh) [online]. In.: MTF [cit. 2021-5-18].
- [24] PRIBULLA, D., Návrh zařízení pro power hil simulaci Li-Pol článku. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan CHALUPA.
- [25] What is C-Rate? [online]. 2020 [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.bluesky-energy.eu/en/2020/04/24/what-is-c-rate/>
- [26] Příspěvatelé WikiSkript, Hallův jev [online], c2016. Datum poslední revize 12. 03. 2016, 07:54 UTC. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Hall%C5%AFv_jev&oldid=342155
- [27] BMS Signal Transformers - Everything you need to know [online]. 2018 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.rs-online.com/designspark/bms-signal-transformers-everything-you-need-to-know>
- [28] Cell balancing buys extra run time and battery life [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf>
- [29] Bq76930 and bq76940 Evaluation Module User's Guide. Texas Instrument [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slvu925c/slvu925c.pdf>
- [30] Bq769x0 3-series to 15-series cell battery monitor family for li-ion and phosphate applications [online]. 2013, 2019 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76930.pdf>
- [31] WOOD, M., LI, J., RUTHER, R. E., DU, Z., SELF, E. C., MEYER, H. M., DANIEL, C., BELHAROUAK, I., WOOD, D. L., Chemical stability and long-term cell performance of low-cobalt, Ni-Rich cathodes prepared by aqueous processing for high-energy Li-Ion batteries [online]. 2020, , 188-197 [cit. 2021-5-22].
- [32] BACCOUCHE, I.; JEMMALI, S.; MANAI, B.; OMAR, N.; AMARA, N.E.B. Improved OCV Model of a Li-Ion NMC Battery for Online SOC Estimation Using the Extended Kalman Filter. *Energies* 2017, 10, 764. <https://doi.org/10.3390/en10060764>
- [33] M. THINGVAD, L. CALEARO, A. THINGVAD, R. VISKINDE and M. MARINELLI., Characterization of NMC Lithium-ion Battery Degradation for Improved Online State Estimation, 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209879.
- [34] D. ANSEÁN, V. M. GARCÍA, M. GONZÁLEZ, J. C. VIERA, C. BLANCO a J. L. ANTUÑA, DC internal resistance during charge: Analysis and

- study on LiFePO₄ batteries, 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013, pp. 1-11, doi: 10.1109/EVS.2013.6914746.
- [35] UL Standard for Safety for Lithium Batteries: UL 1642. 3. Northbrook: Underwriters Laboratories, 1995.
- [36] UL1642 Certification of Lithium-ion Battery [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.lipolbattery.com/UL1642>.
- [37] Complete List of UN 38.3 Tests [online]. In: USA: Inventus Power [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: inventuspowers.com
- [38] 10S 36V Li-ion 20A [online]. In: . [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.lithiumbatterypcb.com/product/>
- [39] Tiny BMS s516 – 30A / 150A / 750A: Datasheet [online]. In: Energus Power Solutions, 2018 [cit. 2021-5-16].
- [40] DL-J10G-L10S015ATJ-MM00: Li-ion 10S 36V15A Common port with Balance [online]. In: Rev 1.0. Dongguan Daly Electronics Co. [cit. 2021-5-22].
- [41] How much balancing current do you need? [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: http://liionbms.com/php/wp_balance_current.php
- [42] SNVSA24: LMR16006 SIMPLE SWITCHER® 60 V 0.6 A Buck Regulators [online]. In: Texas Instrument, 2014 [cit. 2021-5-22].
- [43] Bq76920, bq76930, bq76940 AFE FAQ: User's Guide [online]. 2014, 2019 [cit. 2021-5-16]. Texas Instrument.
- [44] FDY1002PZ: Dual P-Channel (–1.5 V) Specified PowerTrench® MOSFET [online]. In: Semiconductor Components Industries, 2008, 2017 [cit. 2021-5-16].
- [45] BOYLESTAD, R. L. a NASHELSKY, L., Electronic Devices and Circuit Theory: International Edition. 9. 2005. ISBN 0-13-197408-4.
- [46] STM32F072x8 STM32F072xB: Datasheet - production data [online]. In: DS9826 Rev 6. STMicroelectronics, 2019 [cit. 2021-5-23].
- [47] SLPS540B: CSD19536KTT [online]. In: Texas Instrument, 2015, 2016 [cit. 2021-5-16].
- [48] ZÁHLAVA, V., Metodika návrhu plošných spojů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2193-9.
- [49] ŠANDERA, J., Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0181-0.
- [50] Swing® 5300 Rechargeable Lithium-ion Cell: BOSTON - power datasheet [online]. In: Boston-Power, 2011 [cit. 2021-5-16].



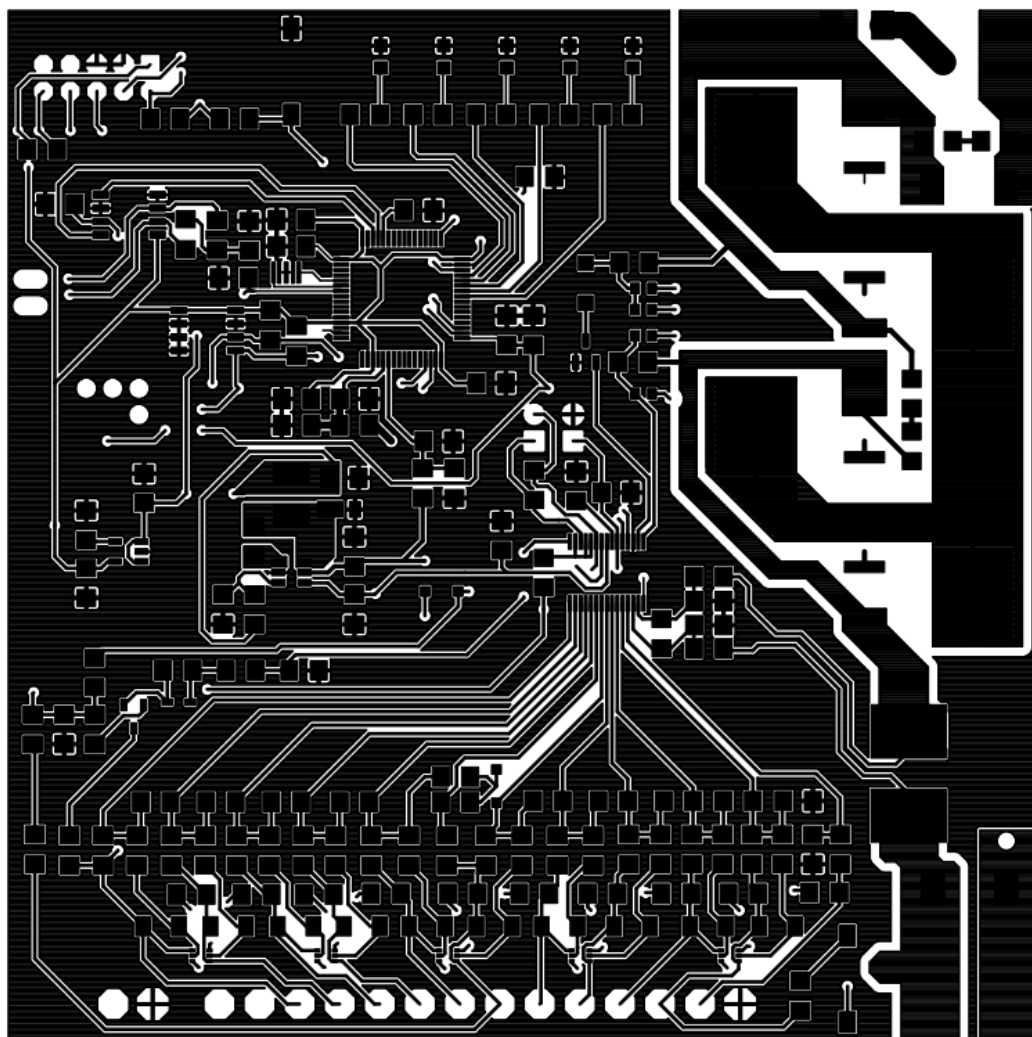
Přílohy

A Obsah přiloženého CD

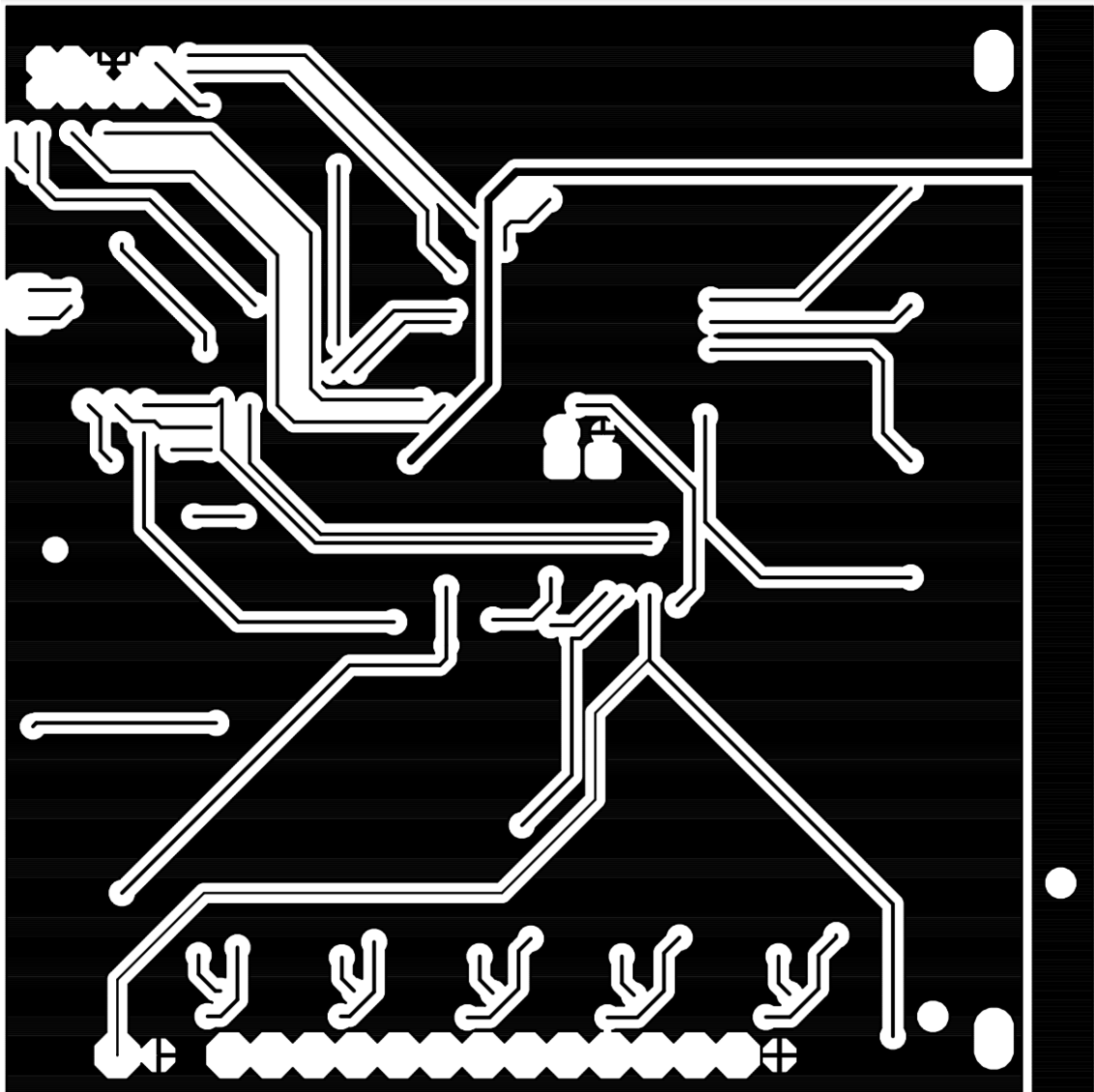
- Diplomová práce - ve formátu .pdf
- Schéma - ve formátu .pdf
- Konfigurační aplikace ZlamBMS
- Výrobní data DPS
- Naměřená data



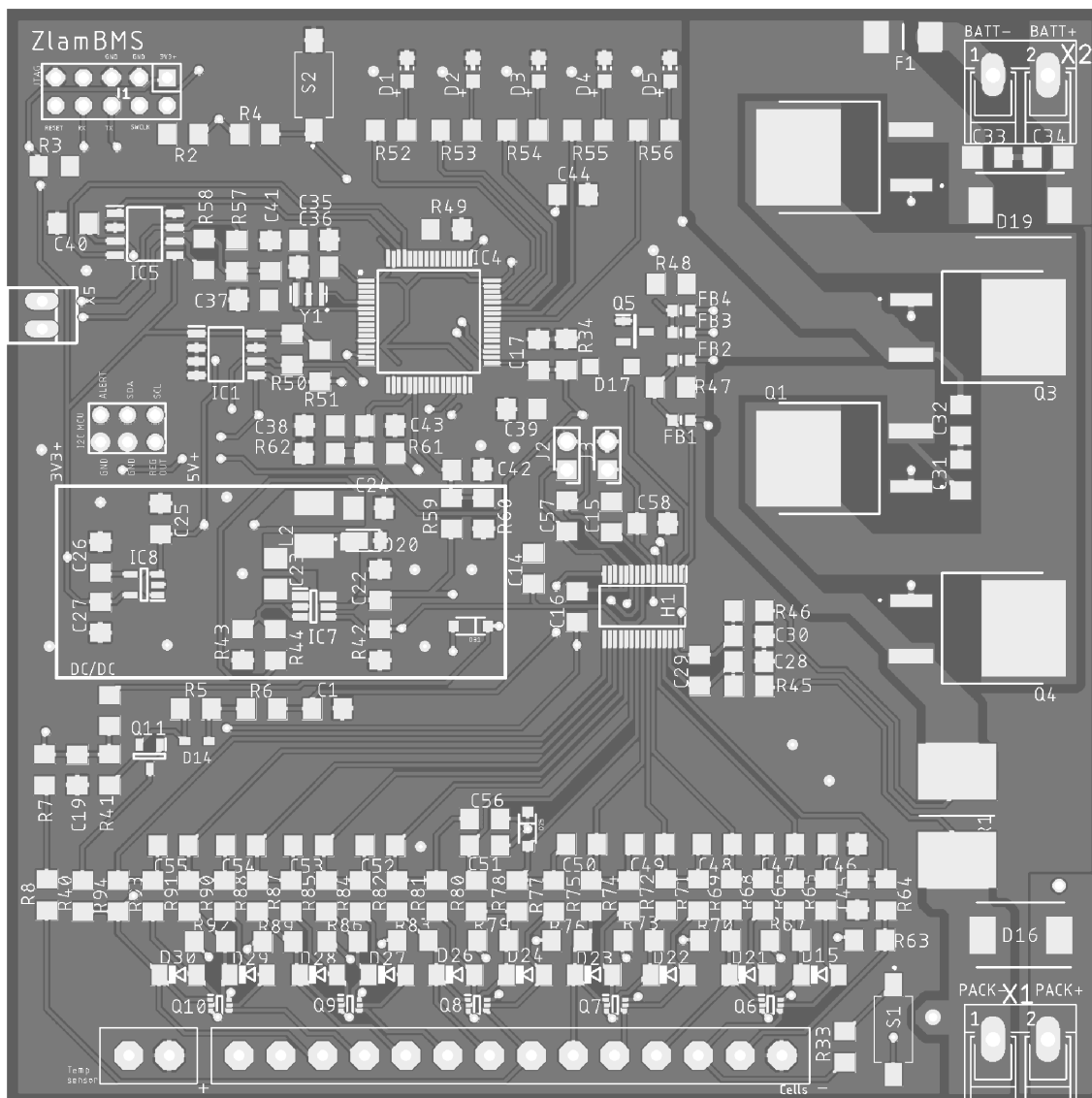
B PCB dokumentace



Obrázek 9.6: BMS TOP



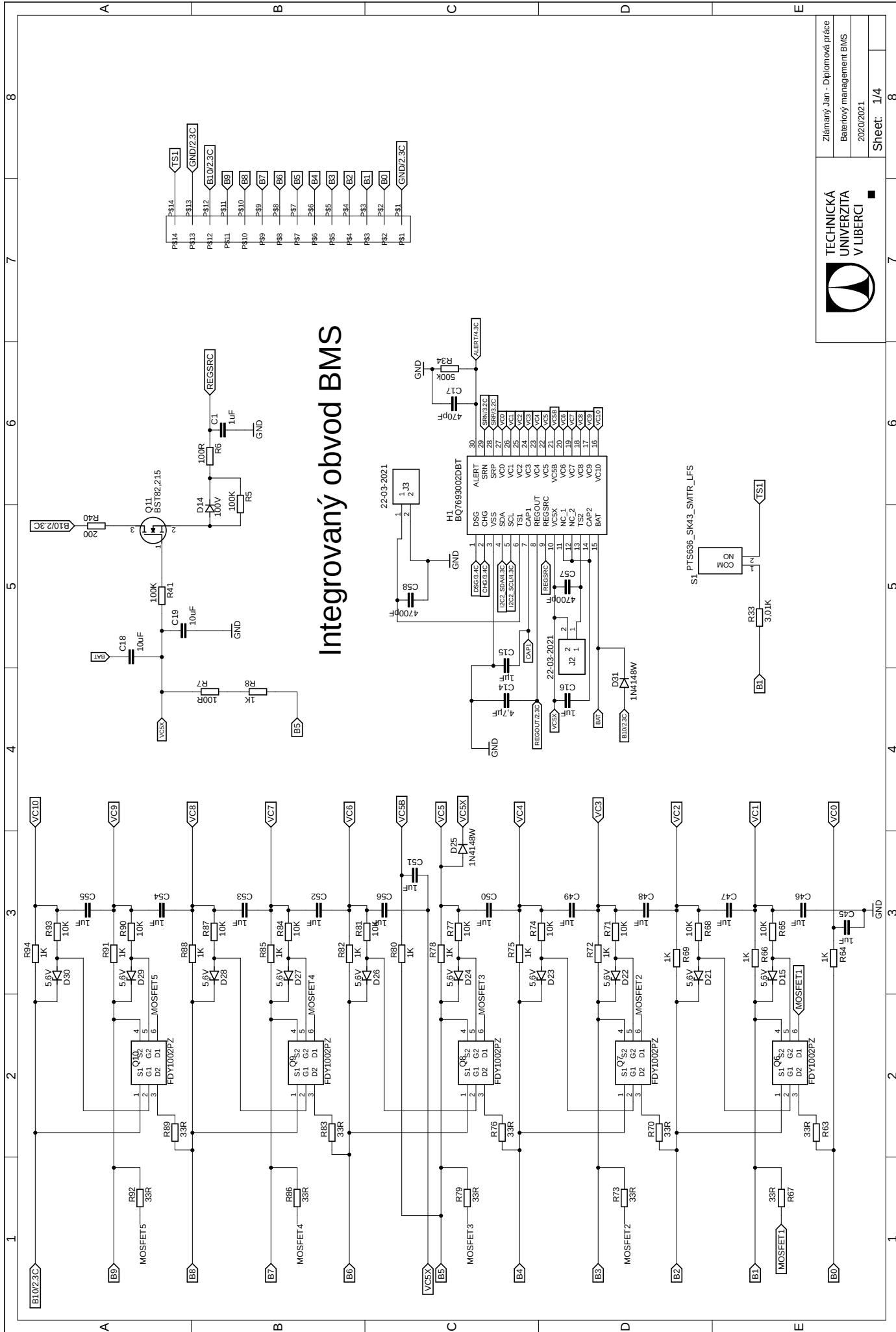
Obrázek 9.7: BMS Bottom



Obrázek 9.8: Umístění součástek PCB

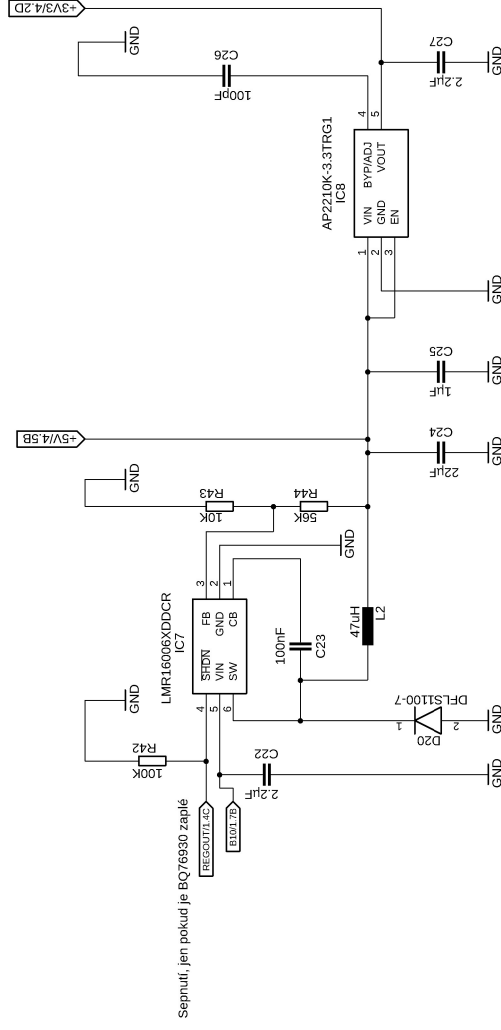
BOOM ZlamBMS

Qty	Value	Device	Package	Parts	Description
2		AK300/2	AK300/2	X1, X2	CONNECTOR
5		LEDCHIP-LED0805	CHIP-LED0805	D1, D2, D3, D4, D5	LED
7	0.1uF	C-EUC1206	C1206	C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34	CAPACITOR, European symbol
5	100K	R-EU_R1206	R1206	R5, R41, R42, R59, R61	RESISTOR, European symbol
4	100R	R-EU_R1206	R1206	R6, R7, R45, R46	RESISTOR, European symbol
1	100V	D50D323	SOD323	D14	DIODE
1	100V, 0.2A	DIODE-SOD123	SOD123	D17	DIODE
10	100nF	C-EUC1206	C1206	C23, C35, C36, C37, C38, C39, C40, C42, C43, C44	CAPACITOR, European symbol
1	1000pF	C-EUC1206	C1206	C26	CAPACITOR, European symbol
14	10K	R-EU_R1206	R1206	R2, R3, R4, R43, R65, R68, R71, R74, R77, R81, R84, R87, R90, R93	CAPACITOR, European symbol
1	10k	R-EU_R1206	R1206	R49	RESISTOR, European symbol
2	10uF	C-EUC1206	C1206	C18, C19	CAPACITOR, European symbol
5	160R	R-EU_R1206	R1206	R52, R53, R54, R55, R56	CAPACITOR, European symbol
13	1k	R-EU_R1206	R1206	R8, R64, R66, R69, R72, R75, R78, R80, R82, R85, R88, R91, R94	RESISTOR, European symbol
2	1M	R-EU_R1206	R1206	R47, R48	RESISTOR, European symbol
2	1M41.48W	DIODESOD123	SOD-123	D25, D31	Diode
14	1uF	C-EUC1206	C1206	C1, C16, C45, C46, C47, C48, C49, C50, C51, C52, C53, C54, C55, C56	CAPACITOR, European symbol
2	1uF	C-EUC1206	C1206	C15, C25	CAPACITOR, European symbol
2	2.2uF	C-EUC1206	C1206	C22, C27	CAPACITOR, European symbol
1	200	R-EU_R1206	R1206	R40	RESISTOR, European symbol
2	20k	R-EU_R1206	R1206	R57, R58	RESISTOR, European symbol
2	44277		HDRV2W67P0X254_1X2_483X236X107	X2, J3	2 way straight PCB header, 2.54mm pitch Molex KK 254 Series, Series Number 4030
1	22-23-2021		22-23-2021	X5	2 way straight PCB header, 2.54mm pitch Molex KK 254 Series, Series Number 4030
1	22uF	C-EUC1206	C1206	C24	CAPACITOR, European symbol
1	3.01K	R-EU_R1206	R1206	R33	RESISTOR, European symbol
10	33R	R-EU_R1206	R1206	R63, R67, R70, R73, R76, R79, R83, R86, R89, R92	RESISTOR, European symbol
1	4.7uF	C-EUC1206	C1206	C14	CAPACITOR, European symbol
1	4.7k	R-EU_R1206	R1206	R50	RESISTOR, European symbol
1	4.7k	R-EU_R1206	R1206	R51	RESISTOR, European symbol
2	4700pF	C-EUC1206	C1206	C57, C58	CAPACITOR, European symbol
1	470pF	C-EUC1206	C1206	C17	CAPACITOR, European symbol
1	47uH	L-EUL1812	L1812	L2	INDUCTOR, European symbol
10	5.6V	ZENER-DIODES080C	SOD80C	D15, D21, D22, D23, D24, D26, D27, D28, D29, D30	Z-Diode
1	1500k	R-EU_R1206	R1206	R34	RESISTOR, European symbol
1	156K	R-EU_R1206	R1206	R44	RESISTOR, European symbol
2	5K6	R-EU_R1206	R1206	R60, R62	RESISTOR, European symbol
1	5pF	C-EUC1206	C1206	C41	CAPACITOR, European symbol
1	AP2210K-3.3TRG1		SOT95P280X145-5N	IC8	300mA 3.3V RF ULDO Regulator SOT23-5 AP2210K-3.3TRG1,
1	ATA6561-GAQW-N		SOIC127P600X175-8N	IC5	MICROCHIP - ATA6561-GAQW-N - CAN TRANSCIEVER, 5MBPS, -40 TO 150DEG C
4	BLM185G221TZ1D		BEADC1608X75N	FB1, FB2, FB3, FB4	Ferrite Beads 0603 220ohms 1000ma Auto Infotainment
1	BQ7693002DBT		SOP50P640X120-30N	H1	6 to 10-Series Cell Li-Ion and Li-Phosphate Battery Monitor (bq76940 Family)
1	BST82.215		SOT95P230X110-3N	Q11	BST82.215 N-Channel MOSFET, 190 mA, 100 V, 3-Pin SOT-23 Nexperia
4	CSDI19536KTT		CSDI19536KTT	Q1, Q2, Q3, Q4	CSDI19536KTT 100 V N-Channel NexFET#153; Power MOSFET
1	CSTCE8M00G15C99-R0		CSTCE G	Y1	CSTCE8M00G15C99-R0, Ceramic Resonator, 8MHz 33pF, 3-Pin Cap Chip, 3.2 x 1.3 x 0.8mm
1	DFL51100-7		POWERDI123_1	D20	Diode Schottky 1A 100V PowerDI 123 Diodes Inc DFL51100-7, SMT Schottky Diode, 100V 1A, 2-Pin PowerDI 123
1	FDY1002PZ		SOTFL50P160X70-6N	Q6, Q7, Q8, Q9, Q10	MOSFET, Fairchild, FDY1002PZ
1	JTAG-10		JTAG-10	J1	JTAG 10-Pin Programming/Debug Connector
1	KONEKTOR125		KONEKTOR125_FOOTPRINT	U51	Voltage Regulators - Switching Regulators LMR16006 SIMPLE SWIT 60V Buck
1	LMR16006XDDCR		SOT95P280X110-6N	IC7	M24256-BRMN6P, Serial EEPROM Memory 256kbit, Serial-I2C, 900ns 1.8 5.5 V, 8-Pin SOIC
1	M24256-BRMN6P		SOIC127P600X175-8N	IC1	Rectifier 3A 600V Ultrafast 75ns SMC ON Semiconductor MURS360T3G Rectifier Diode, 4A, 600V, 2-Pin SMC
1	MURS360T3G		DIOM7958X256N	D19	Tactile Switches Tact 50mA 12VDC, 6.0x3.5, 4.3mm H, 250gf, G leads, No ground pin, Black Actuator
2	PTS636_SK43_SMTR_LFS		PTS636_SK43_SMTR_LFS	S1, S2	Surface Mount Fuses 15A Fast Acting 2410 SingFuse
1	SF-2410F1500W-2		FUSC6125X236N	F1	ESD Suppressors / TVS Diodes 75volts 5uA 12.4 Amps Uni-Dir
1	SMCJ75A		DIOM7959X262N	D16	ARM Microcontrollers - MCU with 128 Kbytes Flash, 48 MHz CPU, USB, CAN and CEC functions
1	STM32F072RBH6TR		QFP50P1200X1200X160-64N	IC4	TP0610K-T1-GE3 P-Channel MOSFET, 185 mA, 60 V, 3-Pin SOT-23 Vishay
1	TP0610K-T1-GE3		SOT95P237X112-3N	Q5	WSR3 SMD Resistor, 3W, 1%, R010 Vishay Mount Resistor 4527 Case 10m +/-1% 3W +/-75ppm/C
1	WSR3R0100FEA		RESC11670X279N	R1	

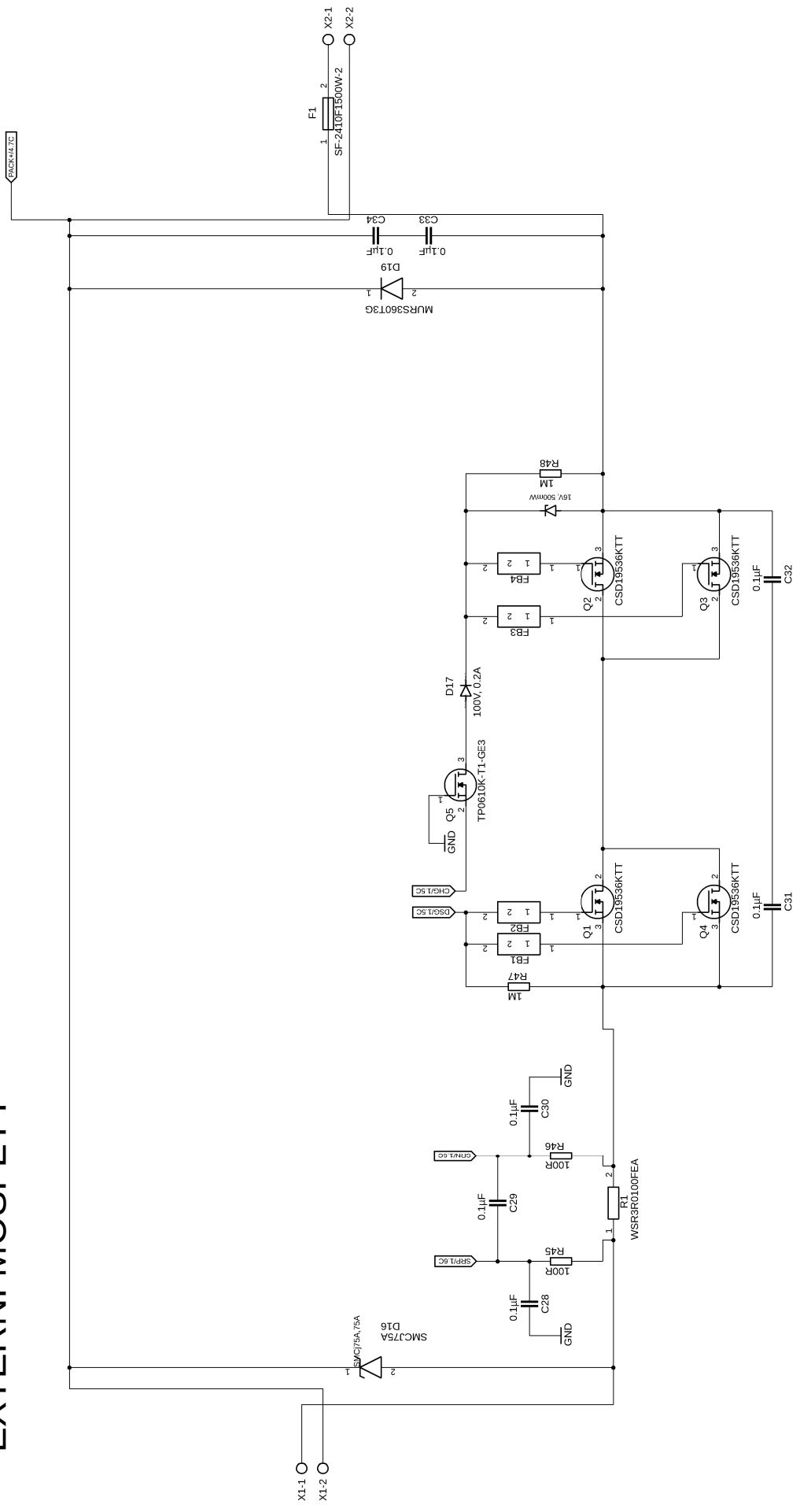


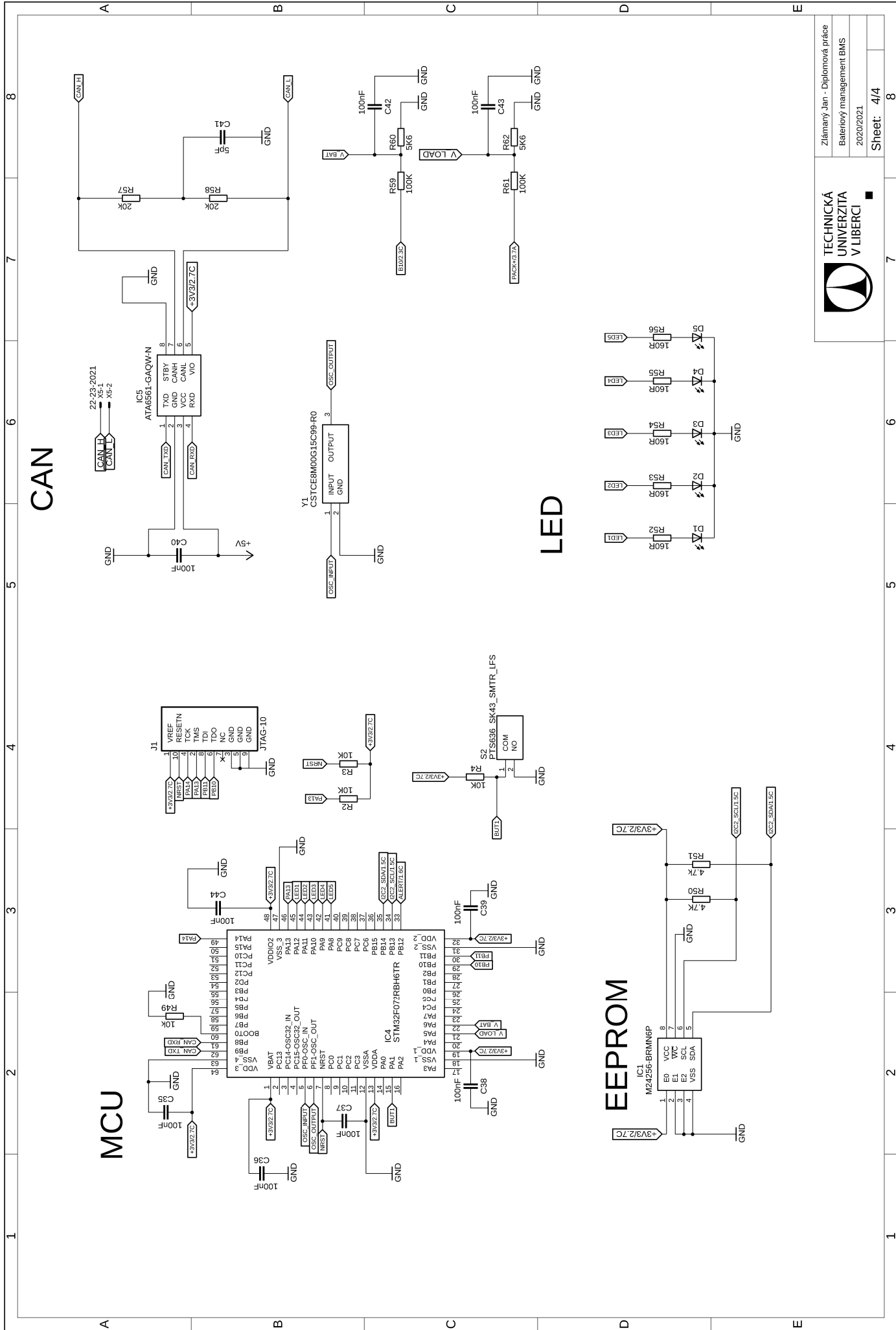
Integrovaný obvod BMS

Napájení 5V a 3.3V



EXTERNÍ MOSFETY





CAN

LED

EEPROM

