



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

INTELIGENTNÍ BMS PRO LITHIOVÉ BATERIE

INTELLIGENT BMS FOR LITHIUM BATTERIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Vašíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2022



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Jakub Vašíček

ID: 220846

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Inteligentní BMS pro lithiové baterie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku BMS systémů, používaných v lithiových bateriích. Navrhněte koncept inteligentní (IoT) BMS pro monitorování stavu baterie. Zařízení zkonstruujte a uveďte do provozu. Proveďte příslušná měření a BMS testujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem elektronického systému BMS, který je nezbytný pro bezpečný provoz lithiových baterií. Na začátku je stručně popsána konstrukce lithiových baterií. Následuje přehled hlavních parametrů tohoto typu baterií. Dále jsou teoreticky popsány různé metody pro určování úrovně nabití (SoC) baterie a možnosti pro zajištění rovnoměrného nabití jednotlivých článků. Na základě teoretického rozboru jsou navržena bloková schémata jednotlivých částí BMS. Následuje popis realizace zařízení a návrhu řídicího programu. Poslední část je věnována měření dosažených parametrů. V závěru jsou pak zhodnoceny dosažené výsledky práce a navrženy možnosti pro budoucí vylepšení.

Klíčová slova

článek, baterie, BMS, Li-Ion, Li-Po, LiFePO₄, napětí, proud, SoC, měření náboje, balancování, balancer

Abstract

This thesis is focused on design of electronic system called BMS, which is necessary for lithium batteries safety operation. The first part contains a brief description of lithium battery design. The following is an overview of the main parameters of this type of batteries. The next part describing various methods of state of charge (SoC) estimation and the ways to ensure uniform charge of each cell. Based on the theoretic analysis, the block diagrams for individual parts of BMS were designed. The following describing device assembly and design of control algorithm. The last part is devoted to measurement of achieved attributes. In conclusion, results of the work are discussed and possibilities of future improvements are suggested.

Keywords

cell, battery, BMS, Li-Ion, Li-Po, LiFePO₄, voltage, current, SoC, coulomb counting, balancing, balancer

Bibliografická citace

VAŠÍČEK, Jakub. Inteligentní BMS pro lithiové baterie [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142484>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Jakub Vašíček*

VUT ID studenta: *220846*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: *Inteligentní BMS pro lithiové baterie*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
1. ÚVOD.....	11
2. KONSTRUKCE LITHIOVÝCH ČLÁNKŮ.....	12
2.1 SEPARÁTOR, ELEKTROLYT	12
2.2 KATODA.....	13
2.3 ANODA.....	13
3. NEJPOUŽIVANĚJŠÍ TYPY LITHIOVÝCH ČLÁNKŮ	14
3.1 LI-ION (LI-PO)	14
3.2 LIFEP0 ₄	15
4. ÚROVEŇ NABITÍ BATERIE (SOC).....	16
4.1 STANOVENÍ SOC DLE SVORKOVÉHO NAPĚTÍ.....	17
4.2 STANOVENÍ SOC NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ NÁBOJE	18
5. VYVÁŽENÍ ČLÁNKŮ	19
5.1 PŘÍČINY NEVYVÁŽENOSTI ČLÁNKŮ	19
5.2 METODY BALANCOVÁNÍ	20
5.2.1 <i>Top Balancing</i>	20
5.2.2 <i>Bottom Balancing</i>	21
5.2.3 <i>Top & Bottom Balancing</i>	22
5.3 BALANCERY	23
5.3.1 <i>Pasivní balancery</i>	23
5.3.2 <i>Aktivní balancery</i>	24
6. CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	25
7. NÁVRH INTELIGENTNÍ BMS PRO FV SYSTÉMY	26
7.1 MODUL PRO MĚŘENÍ PROUDU	26
7.2 MODUL PRO BALANCOVÁNÍ	29
7.3 MODUL PRO ODPOJENÍ BATERIE	33
8. REALIZACE ZAŘÍZENÍ	40
8.1 MODUL PRO MĚŘENÍ PROUDU	40
8.2 MODUL PRO BALANCOVÁNÍ	42
8.3 MODUL PRO ODPOJENÍ BATERIE	44
9. DIGITÁLNÍ KOMUNIKACE A ŘÍDÍCÍ PROGRAM	46
9.1 MODUL PRO MĚŘENÍ PROUDU	51
9.2 MODUL PRO BALANCOVÁNÍ	55
9.3 MODUL PRO ODPOJENÍ BATERIE	58
10. OVĚŘENÍ FUNKCE	61
10.1 MODUL PRO MĚŘENÍ PROUDU	61
10.2 MODUL PRO BALANCOVÁNÍ	66
10.3 MODUL PRO ODPOJENÍ BATERIE	76
11. ZÁVĚR.....	80
LITERATURA.....	83
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	86
SEZNAM PŘÍLOH.....	90

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 2.1: Struktura lithiového článku	12
Obrázek č. 3.1: Článek typu Li-Ion v pouzdře 18650 (2.5 Ah), zdroj [8].....	14
Obrázek č. 3.2: Článek typu Li-Po (1.0 Ah), zdroj [8]	14
Obrázek č. 3.3: Článek typu LiFePO ₄ v pouzdře 18650 (1.1 Ah), zdroj [10]	15
Obrázek č. 3.4: Článek typu LiFePO ₄ (100 Ah), zdroj [11].....	15
Obrázek č. 4.1: Stanovení SoC baterie mobilního telefonu	16
Obrázek č. 4.2: Určení SoC z vybíjecí charakteristiky Li-Ion článku, zdroj [14].....	17
Obrázek č. 4.3: Blokové schéma zapojení počítající náboj.....	18
Obrázek č. 5.1: Nevyvážená baterie, max vybití	19
Obrázek č. 5.2: Nevyvážená baterie, max nabití.....	19
Obrázek č. 5.3: Baterie vyvážená metodou Top Balancing, max vybití	20
Obrázek č. 5.4: Baterie vyvážená metodou Top Balancing, max nabití	20
Obrázek č. 5.5: Baterie vyvážená metodou Bottom Balancing, max nabití.....	21
Obrázek č. 5.6: Baterie vyvážená metodou Bottom Balancing, max vybití.....	21
Obrázek č. 5.7: Baterie vyvážená metodou Top & Bottom Balancing, max nabití	22
Obrázek č. 5.8: Baterie vyvážená metodou Top & Bottom Balancing, max vybití	22
Obrázek č. 5.9: Blokové schéma zapojení baterie s pasivními balancery	23
Obrázek č. 5.10: Blokové schéma zapojení baterie s aktivními balancery	24
Obrázek č. 7.1: Modul pro měření proudu, blokové schéma	26
Obrázek č. 7.2: Provedení senzoru ACS758, zdroj [15]	27
Obrázek č. 7.3: Teplotní charakteristika interní reference ATTiny402, zdroj [18].....	28
Obrázek č. 7.4: Modul pro balancování, blokové schéma	29
Obrázek č. 7.5: Princip funkce digitálního izolátoru, zdroj [20].....	30
Obrázek č. 7.6: Modul pro odpojení baterie, blokové schéma.....	33
Obrázek č. 7.7: Schéma pro simulaci měkkého startu v programu LTSpice	36
Obrázek č. 7.8: Odečet U_{GS} z přenosové charakteristiky tranzistoru NTMFS5C604NL, zdroj [21]	37
Obrázek č. 7.9: Tranzientní analýza, průběhy napětí a proudů na výstupu spínače.....	39
Obrázek č. 7.10: Model pro ověření vyzářené energie spínače	39
Obrázek č. 7.11: Ověření výpočtu vyzářené energie spínače	39
Obrázek č. 8.1: Modul pro měření proudu – 3D vizualizace, velikost S vlevo, velikost M vpravo	40
Obrázek č. 8.2: Moduly pro měření proudu – osazené kusy, zleva velikosti S, M	41
Obrázek č. 8.3: Moduly pro balancování – 3D vizualizace, zleva velikosti S, M, U.....	42
Obrázek č. 8.4: Moduly pro balancování – osazené kusy, zleva velikosti S, M	43
Obrázek č. 9.1: Implementace BMS do baterie	46
Obrázek č. 9.2: Odezva použitého digitálního filtru na jednotkový skok	52
Obrázek č. 9.3: Signalizace nabíjení vlevo, signalizace vybíjení vpravo	53
Obrázek č. 9.4: Závislost frekvence blikání na protékajícím proudu pro $I_{MAX} = 50$ A	53
Obrázek č. 9.5: Modul pro měření proudu – Vývojový diagram programu.....	54
Obrázek č. 9.6: Modul pro balancování – zapojení vstupního děliče	55
Obrázek č. 9.7: Indikace balancování, zleva velikost M, S	56
Obrázek č. 9.8: Modul pro balancování – vývojový diagram balancovací funkce	56
Obrázek č. 9.9: Modul pro balancování – Vývojový diagram programu.....	57
Obrázek č. 9.10: Hodnoty úbytku na R_s při startu	59
Obrázek č. 9.11: Modul pro odpojení baterie – Vývojový diagram programu	60
Obrázek č. 10.1: Převodní charakteristika proudových modulů	62
Obrázek č. 10.2: Relativní chyba měření proudových modulů.....	62

Obrázek č. 10.3: Závislost klidové spotřeby proudového modulu na napájecím napětí	63
Obrázek č. 10.4: Měření ohřevu proudového modulu velikosti M při $I = 50$ A	64
Obrázek č. 10.5: Měření ohřevu proudového modulu velikosti S při $I = 50$ A.....	64
Obrázek č. 10.6: Testovací sestava pro měření balancerů	66
Obrázek č. 10.7: Převodní charakteristika balancovacích modulů	67
Obrázek č. 10.8: Relativní chyba měření balancovacích modulů	67
Obrázek č. 10.9: Změřená VA charakteristika balancerů	68
Obrázek č. 10.10: Průběh vlastního ohřevu balancerů při $I_{BAL,MAX}$	70
Obrázek č. 10.11: Měření ohřevu balancovacího modulu č. 2 velikosti M při $I_{BAL,MAX}$	70
Obrázek č. 10.12: Měření ohřevu balancovacího modulu č. 4 velikosti S při $I_{BAL,MAX}$	70
Obrázek č. 10.13: Testovací sestava pro měření přenosu tepla z článku do balanceru.....	71
Obrázek č. 10.14: Přenos tepla z článku do balanceru, teplota podložky $\vartheta = 70$ °C.....	72
Obrázek č. 10.15: Klidový proud balancerů	73
Obrázek č. 10.16: Měření odolnosti balanceru proti přepětí.....	74
Obrázek č. 10.17: Měření odolnosti balanceru proti přepětí, detail na výstup LDO regulátoru	75
Obrázek č. 10.18: Zátěž pro testování modulu pro odpojení baterie	76
Obrázek č. 10.19: Průběh spínání kapacitní zátěže o velikosti $C_L = 20$ mF	77
Obrázek č. 10.20: Průběh spínání kapacitní zátěže o velikosti $C_L = 26,8$ mF.....	78
Obrázek č. 10.21: Měření ohřevu modulu pro odpojení baterie při $I = 50$ A bez chladiče.....	79
Obrázek č. 10.22: Měření ohřevu modulu pro odpojení baterie při $I = 50$ A s chladičem.....	79

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 2.1: Materiály aktivní vrstvy katody, zdroj dat [4].....	13
Tabulka č. 2.2: Materiály aktivní vrstvy anody, zdroje dat [5], [6], [7].....	13
Tabulka č. 3.1: Elektrické parametry Li-Ion (Li-Po) článků.....	14
Tabulka č. 3.2: Elektrické parametry LiFePO ₄ článků.....	15
Tabulka č. 7.1: Modul pro měření proudu, očekávané parametry	26
Tabulka č. 7.2: Přehled vhodných variant senzoru ACS758.....	27
Tabulka č. 7.3: Modul pro balancování, očekávané parametry	29
Tabulka č. 7.4: Modul pro odpojení baterie, očekávané parametry	33
Tabulka č. 8.1: Modul pro měření proudu – konstrukční parametry	40
Tabulka č. 8.2: Modul pro měření proudu – přibližná cena za 1 ks.....	41
Tabulka č. 8.3: Modul pro balancování – konstrukční parametry	42
Tabulka č. 8.4: Modul pro balancování – přibližná cena za 1 ks.....	43
Tabulka č. 8.5: Modul pro odpojení baterie – konstrukční parametry	44
Tabulka č. 8.6: Modul pro odpojení baterie – přibližná cena za 1 ks verze S (50 A)	45
Tabulka č. 9.1: Nastavení UART komunikace	47
Tabulka č. 9.2: Struktura 5 slov dlouhé zprávy (Délka zprávy = 5)	47
Tabulka č. 9.3: Struktura 7 slov dlouhé zprávy (Délka zprávy = 7)	47
Tabulka č. 9.4: Adresování jednotlivých modulů	48
Tabulka č. 9.5: Modul pro měření proudu – přehled dostupných příkazů	48
Tabulka č. 9.6: Modul pro balancování – přehled dostupných příkazů	49
Tabulka č. 9.7: Modul pro odpojení baterie – přehled dostupných příkazů.....	49
Tabulka č. 9.8: Vypočítané rozlišení měření proudu pro jednotlivé varianty modulů.....	51
Tabulka č. 9.9: Hodnoty úbytku na R_S při startu.....	59
Tabulka č. 10.1: Měřené hodnoty proudových senzorů a vypočítaná relativní chyba	61
Tabulka č. 10.2: Naměřené hodnoty klidové spotřeby proudového modulu	63
Tabulka č. 10.3: Měření napětí balancerů a vypočítaná relativní odchylka.....	66
Tabulka č. 10.4: Měření VA charakteristiky balancerů	68
Tabulka č. 10.5: Měření vlastního ohřevu balancerů při $I_{BAL,MAX}$	69
Tabulka č. 10.6: Měření přenosu tepla z článku do balanceru, teplota podložky $\vartheta = 70^\circ\text{C}$	72
Tabulka č. 10.7: Měření spotřeby balancerů.....	73

1. ÚVOD

Lithiové akumulátory dnes nachází uplatnění v čím dál větším množství aplikací. Od malých baterií určených pro napájení spotřební elektroniky až po velká stacionární úložiště obsahující tisíce článků.

V poslední době roste poptávka po tomto typu baterií hlavně díky rozvoji elektromobility. Roste i zájem o baterie pro domácí fotovoltaické systémy [1]. V současné době vznikají obavy z rostoucích cen elektrické energie a domácí fotovoltaické systémy se jeví jako ideální způsob, jak si zajistit alespoň částečnou energetickou soběstačnost.

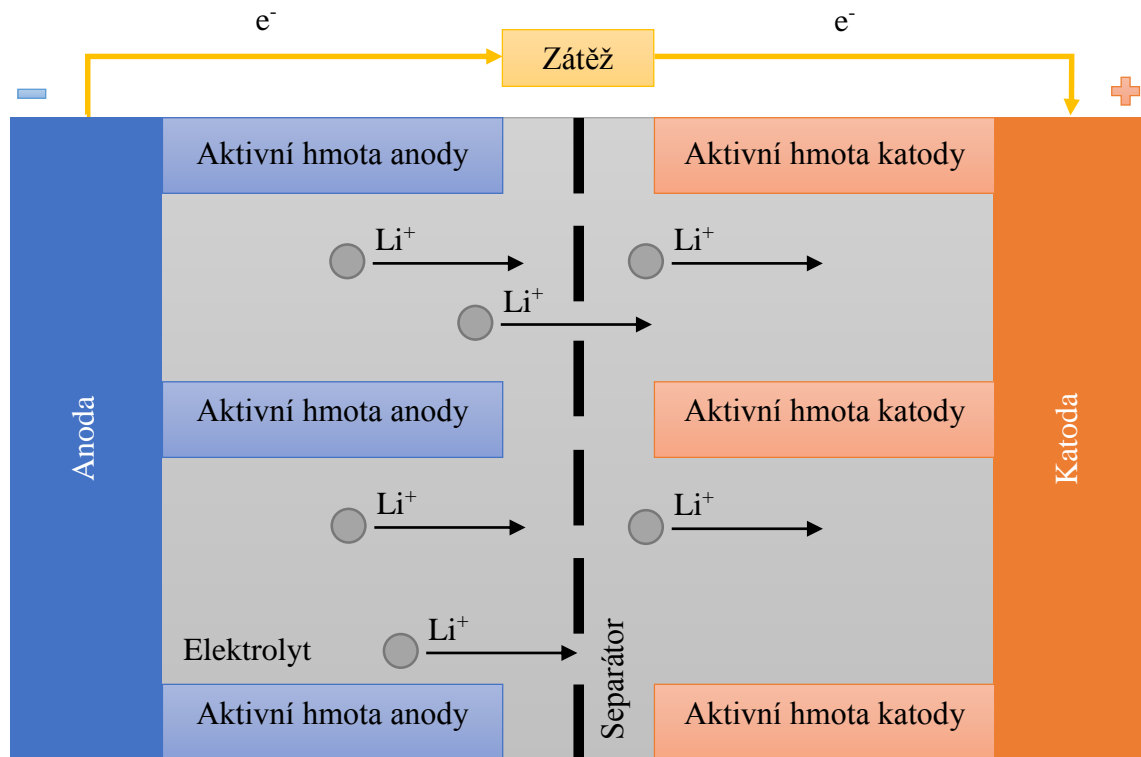
Lithiové články dosahují oproti jiným typům vyšší účinnosti při nabíjení/vybíjení, jsou schopny dodávat velké proudy a nabízejí vysokou hustotu uložené energie. Jsou však velmi citlivé na hluboké vybíjení či přebíjení, které často vede k jejich trvalému poškození, v horším případě k úplnému zničení. Při takových stavech hrozí přehřívání článků, které může vést až k požáru, obzvláště u typu Li-Ion (Li-Po) [2].

Cílem BMS je, aby k výše popisovaným stavům pokud možno nikdy nedošlo. BMS obvykle hlídá napětí jednotlivých článků, jejich teplotu a protékající proud. Na základě těchto údajů je možné zajistit např. rovnoměrné nabíjení článků, nebo odpojení baterie v případě poruchového stavu. BMS nemusí plnit jen ochrannou funkci. Některé typy jsou schopny na základě měření proudu počítat náboj, který je v baterii uložen. Uživatel je tak přesně informován, kolik energie v baterii ještě zbývá a může tomu přizpůsobit své chování.

Je tedy zřejmé, že BMS přináší řadu bezpečnostních i uživatelských výhod, proto už je dnes určitou formou tohoto systému vybavena prakticky každá lithiová baterie.

2. KONSTRUKCE LITHIOVÝCH ČLÁNKŮ

Každý lithiový článek se skládá ze čtyř hlavních komponent – anody, katody, elektrolytu a separátoru. Struktura článku je zobrazena na obrázku 2.1.



Obrázek č. 2.1: Struktura lithiového článku

2.1 Separátor, elektrolyt

Separátor zabraňuje přímému kontaktu anody a katody, obsahuje pouze mikroskopické díry, přes které mohou procházet lithiové ionty. Mezi nejpoužívanější materiály patří polyethylen a polypropylen.

Zbylou výplň baterie mezi anodou a katodou tvoří elektrolyt, který umožňuje pohyb lithiových iontů. Jde o směs solí, rozpouštědel a dalších aditiv. Existují elektrolyty v pevné i kapalně formě. [3]

2.2 Katoda

Katoda bývá vyrobena nejčastěji z **hliníkové fólie**. Na této fólii je pak nanášena aktivní vrstva, která je zdrojem lithiových iontů. Materiálové složení aktivní vrstvy má zásadní vliv na kapacitu a napětí baterie [4]. Přehled materiálů pro aktivní vrstvu anody shrnuje tabulka níže.

Tabulka č. 2.1: Materiály aktivní vrstvy katody, zdroj dat [4]

Materiál	Charakteristika
LCO Lithium kobalt oxid	jeden z prvních typů, v současnosti používaný ve většině typů Li-Ion baterií
LMO Lithium mangan	+ vyšší proudy, + vyšší počet cyklů, + větší energetická hustota
NMC Lithium nikl kobalt mangan	používaný v bateriích pro trakční aplikace
LFP Lithium železo fosfát	+ nižší cena + nižší toxicita - menší energetická hustota

2.3 Anoda

Anoda bývá tvořena **měděnou fólií**. Aktivní vrstva má za úkol při nabíjení/vybití přijímat/vydávat lithiové iony [3]. Přehled materiálů pro aktivní vrstvu anody je uveden v následující tabulce.

Tabulka č. 2.2: Materiály aktivní vrstvy anody, zdroje dat [5], [6], [7]

Materiál	Charakteristika
grafit	v současnosti nejpoužívanější materiál
LTO (Lithium titan oxid)	používaný v kombinaci s katodami typu LMO a NMC, + vyšší životnost + vyšší nabíjecí proudy - nižší energetická hustota
křemík	experimentální materiál, měl by zajistit vyšší kapacitu a nabíjecí proudy, je však třeba vyřešit problém s velkou objemovou roztažností při nabíjení

3. NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ TYPY LITHIOVÝCH ČLÁNKŮ

V této kapitole budou stručně popsány nejpoužívanější typy lithiových článků, pro které bude navrhovaná BMS primárně určena.

3.1 Li-Ion (Li-Po)

Články označované jako Li-Ion či Li-Po dnes najdeme v mnoha zařízeních, od spotřební elektroniky až po elektromobily. Rozdíly mezi typem Li-Ion a Li-Po jsou především ve formě elektrolytu a mechanické konstrukci [8]. Oba typy používají anodu s grafitovou aktivní vrstvou a katodu typu LCO, případně LMO nebo NMC. Elektrické vlastnosti jsou tedy velmi podobné, proto jsou oba typy uvedeny ve společné podkapitole.

Tabulka č. 3.1: Elektrické parametry Li-Ion (Li-Po) článků

Minimální napětí článku:	2,5	V
Nominální napětí článku:	3,6 (3,7)	V
Maximální napětí článku:	4,2	V
Maximální vybíjecí proud:	1–30	C
Energetická hustota:	250	Wh/kg



Obrázek č. 3.1: Článek typu Li-Ion v pouzdře 18650 (2.5 Ah), zdroj [8]



Obrázek č. 3.2: Článek typu Li-Po (1.0 Ah), zdroj [8]

Li-Ion články jsou nejčastěji vyráběny v pouzdech s kódovým označením 18650. Z těchto článků jsou pak skládány baterie v širokém rozsahu velikostí. Od malých baterií pro spotřební elektroniku, až po baterie složené z tisíců článků pro elektromobily, nebo úložiště fotovoltaických elektráren.

Li-Pol články jsou obvykle vyráběny ve formě plátů, zabalených ve fólii. Díky této konstrukci jsou o něco lehčí, ale zato náchylnější k mechanickému poškození.

Hlavním problémem článků Li-Ion a Li-Po je jejich hořlavost. Ke vzplanutí dochází nejčastěji v důsledku přehřívání článku, které bývá způsobeno přebíjením či příliš vysokým proudem. Při hoření mohou články dosahovat velmi vysokých teplot, až 2000 °C [2], proto není možné hasit hořící články vodou. Pro bezpečný provoz tohoto typu článků je nutná správně navržená BMS, která články v případě poruchy včas odpojí.

3.2 LiFePO₄

Články typu LiFePO₄ používají stejně jako články Li-Ion a Li-Po anodu s grafitovou aktivní vrstvou. Rozdíl je v aktivní vrstvě katody, která je zde typu LFP. To přináší oproti článkům Li-Ion a Li-Po trochu odlišné elektrické parametry.

Tabulka č. 3.2: Elektrické parametry LiFePO₄ článků

Minimální napětí článku:	2,5	V
Nominální napětí článku:	3,3	V
Maximální napětí článku:	4,0	V
Maximální vybíjecí proud:	0,5–3	C
Energetická hustota:	100	Wh/kg



Obrázek č. 3.3: Článek typu LiFePO₄ v pouzdře 18650 (1.1 Ah), zdroj [10]



Obrázek č. 3.4: Článek typu LiFePO₄ (100 Ah), zdroj [11]

LiFePO₄ články jsou vyráběny v mnoha velikostech. Od malých článků v pouzdrech 18650, až po velké články dosahující kapacity řádově stovek Ah. Oproti článkům Li-Ion, které se vyrábějí převážně v pouzdru 18650, je tak mnohem snazší poskládat baterii o vysoké kapacitě.

Nevýhodou tohoto typu článků je menší energetická hustota oproti typu Li-Ion. Často však tyto články nachází uplatnění ve stacionárních úložištích, např. pro fotovoltaické elektrárny, kde tento parametr není kritický.

Hlavní výhodou článků LiFePO₄ je jejich bezpečnost. Tyto články bývají označovány jako nejbezpečnější typ lithiových baterií, protože jsou nehořlavé [9][12]. Stále však hrozí přehřívání článků vlivem přebíjení, nebo vysokých proudů. To může vést k nárůstu tlaku uvnitř článku, uvolnění elektrolytu a zničení článku. Proto je i tento typ článků vhodné provozovat pouze v kombinaci se spolehlivou BMS.

4. ÚROVEŇ NABITÍ BATERIE (SoC)

Parametr SoC (State of Charge) udává relativní množství náboje, který je v baterii uložen. Matematicky jej můžeme popsat následující rovnicí:

$$SoC = \frac{Q}{Q_n} \quad (4.1)$$

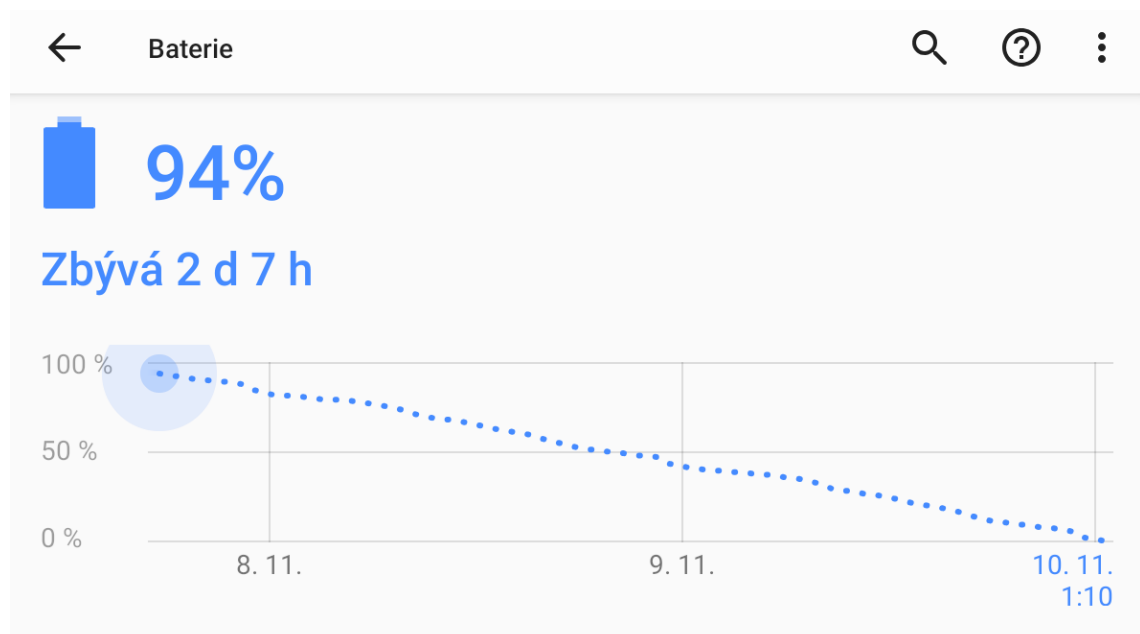
kde Q je náboj uložený v baterii a Q_n nominální kapacita baterie.

Někdy se můžeme setkat i s parametrem DoD (Depth of Discharge), který udává naopak hloubku vybití baterie.

$$DoD = 1 - SoC \quad (4.2)$$

Pro samotnou bezpečnost provozu baterie není přesné stanovení SoC kritické. Stačí pouze odpojit zátěž/nabíjení při dosažení minimální/maximální hodnoty napětí článku. SoC je ale velmi cenným údajem pro uživatele. Asi málokdo by chtěl používat např. mobilní telefon, který by nedával žádnou informaci o stavu baterie a při vybití by se jednoduše vypnul. Případně elektromobil, který by ze stejných důvodů uprostřed jízdy bez varování odpojil baterii.

Kromě stanovení SoC pak může BMS na základě aktuálního zatížení baterie odhadnout i zbývající dobu provozu nebo v případě zmíněného elektromobilu zbývající počet km. Uživatel tak získává představu o tom, do kdy je nutné zajistit nabíjení, případně přizpůsobit své chování tak, aby baterie vydržela déle.

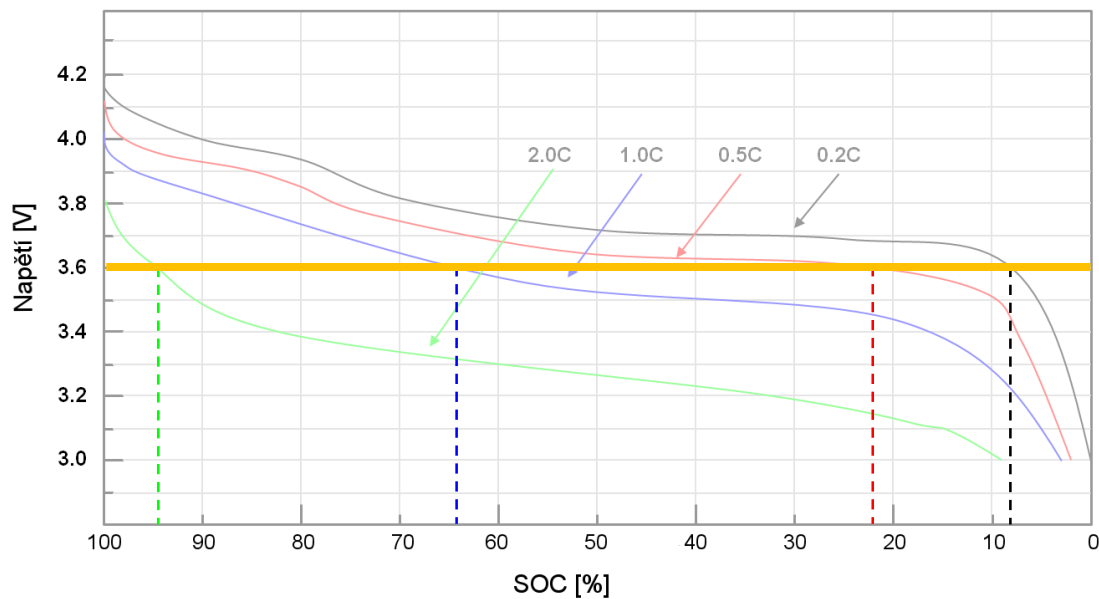


Obrázek č. 4.1: Stanovení SoC baterie mobilního telefonu

4.1 Stanovení SoC dle svorkového napětí

Pro každý typ článku existuje určitý vztah mezi SoC a svorkovým napětím. Problém nastává, pokud během měření článkem protéká proud. Každý článek má určitý vnitřní odpor, který je teplotně závislý a mění se i v důsledku přirozeného stárnutí článku. Obzvláště při zatěžování článku v širokém rozsahu proudů může být měření vlivem úbytku na vnitřním odporu značně ovlivněno.

Jako příklad poslouží vybíjecí charakteristika běžného Li-Ion článku pro různé velikosti výstupního proudu.



Obrázek č. 4.2: Určení SoC z vybíjecí charakteristiky Li-Ion článku, zdroj [14]

Z vybíjecí charakteristiky je patrné, že lze vždy poměrně spolehlivě poznat plně nabitý článek (napětí kolem 4 V) i plně vybitý článek (napětí kolem 3 V). Horší je však, když na článku naměříme např. hodnotu 3,6 V. Pokud nemáme informaci o vybíjecím proudu a vnitřním odporu konkrétního článku, můžeme z této hodnoty pouze konstatovat, že úroveň nabití se nejspíš nachází někde v intervalu 5–95 %.

Pokud bychom uvažovali proudové zatížení článku např. pouze v rozsahu 0,2–0,5C, můžeme v tomto případě říct, že pro napětí 3,6V by mohlo SoC odpovídat hodnotě v intervalu cca 10–20 %.

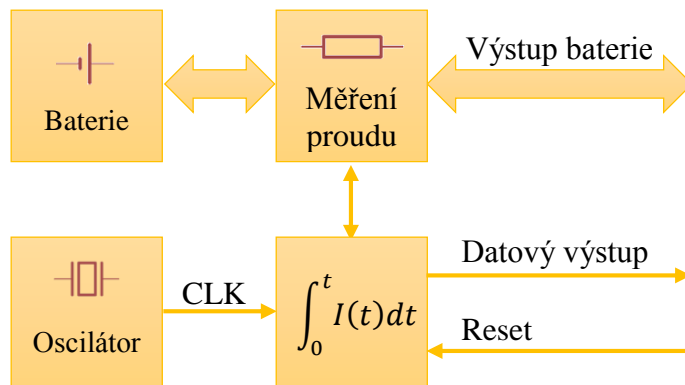
Metoda stanovení SoC dle napětí je tedy použitelná pouze pro orientační měření při zatížení článku malými proudy a při stálé teplotě.

4.2 Stanovení SoC na základě měření náboje

Protože lithiové články mají obecně velmi nízké ztráty a pomalé samovybíjení, lze stav nabití stanovit velmi přesně na základě měření náboje. V anglické literatuře je tato metoda označována jako „*coulomb counting*“.

$$Q = \int_0^t I(t) dt \quad (4.3)$$

Jak ukazuje rovnice 4.3, velikost náboje můžeme stanovit jako integrál proudu v čase. Pro stanovení SoC lze pak vyjít přímo z rovnice 4.1, která je uvedena v úvodu této kapitoly. Možné provedení zařízení pro počítání velikosti náboje zobrazuje následující blokové schéma:



Obrázek č. 4.3: Blokové schéma zapojení počítající náboj

Pro dlouhodobě stabilní měření náboje je důležité především zajistit měření proudu s minimální nesymetrií (offsetem). Relativní chybu měření SoC způsobenou offsetem lze vyjádřit následující rovnicí:

$$\delta_{SOC} = \frac{I_{ofs}}{Q_n} \cdot t \quad (4.4)$$

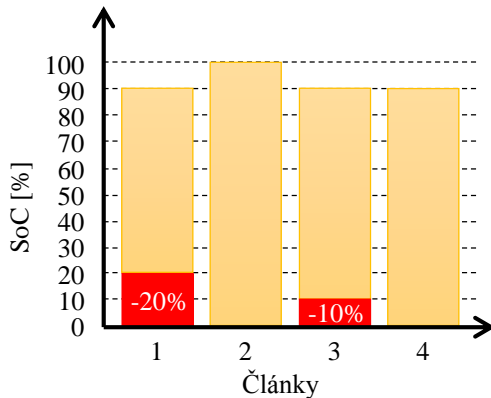
Z rovnice vyplývá, že i velmi malý offset může časem způsobit značnou odchylku. Pokud bychom chtěli dlouhodobě ($t \rightarrow \infty$) měřit s nulovou odchylkou, musel by se offset proudu $I_{ofs} = 0$. K tomu by baterie musela mít nulové samovybíjení. To bohužel reálně není možné, proto je nutné počítadlo náboje jednou za čas resetovat. Např. při každém úplném vybití baterie, které lze snadno poznat dle svorkového napětí.

Výběr oscilátoru není pro měření SoC kritický. Přesnost běžně prodávaných krystalových oscilátorů se pohybuje v řádu desítek ppm, což bude vzhledem k chybě způsobené nepřesností měření proudu naprosto zanedbatelná odchylka. SoC je navíc definován jako podíl hodnot Q a Q_n a dá se předpokládat, že obě hodnoty budou zatíženy cca stejnou chybou. Při dělení se tak případná chyba vykrátí.

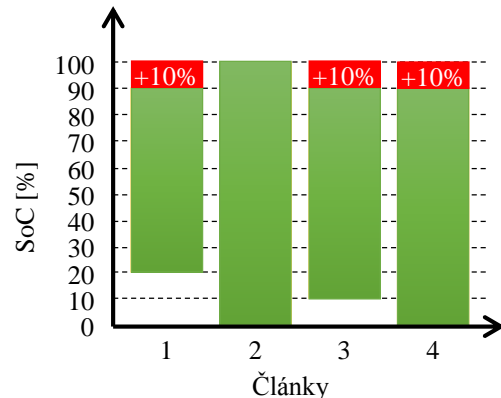
Pokud je zajištěno přesné měření proudu a pravidelné resety počítadla, poskytuje tato metoda měření velmi přesné výsledky, nezávisle na velikosti zátěže, teplotě, nebo stáří článku. Výhodou je i možnost průběžně monitorovat maximální kapacitu článku.

5. VYVÁŽENÍ ČLÁNKŮ

V předchozí kapitole byly popsány způsoby, jak určit SoC baterie. Pokud je však baterie složena z více článků, je nutné zajistit, aby byly všechny články nabitě rovnoměrně. Při nerovnoměrném nabití jednotlivých článků by docházelo k podvybíjení článků s nižší úrovní SoC a naopak přebíjení článků s vyšší úrovní SoC. Tato situace je názorně vykreslena na následujících obrázcích.



Obrázek č. 5.1: Nevyvážená baterie, max vybití



Obrázek č. 5.2: Nevyvážená baterie, max nabití

5.1 Příčiny nevyváženosti článků

Mezi nejčastější příčiny nerovnoměrného nabití článků patří rozdílné samovybíjení, rozdílná kapacita, ale i nevhodné vyvažování v důsledku rozdílné impedance.

Samovybíjení u lithiových článků bývá obvykle velmi malé. Běžně je udáváno, že lithiový článek ztratí za měsíc cca 0,5–1 % náboje z celkové kapacity. Drobné rozdíly v samovybíjení lze tedy balancováním poměrně snadno kompenzovat.

Větší problém představují rozdílné kapacity článků. Zde není tak snadné udržet články rovnoměrně nabitě po celou dobu pracovního cyklu. Obvykle se volí kompromis, kdy jsou články vyvažovány buď tak, aby dosáhly rovnoměrného nabití při konci nabíjení nebo při konci vybití.

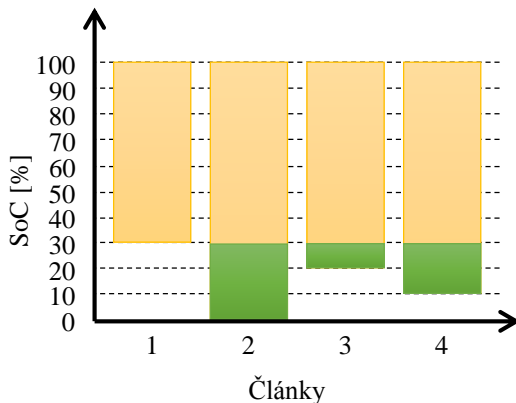
K nevyváženosti článků může snadno dojít i nevhodným vyvažováním. Vyvažování totiž často probíhá pouze na základě svorkového napětí. V předchozí kapitole bylo popsáno, že vztah mezi svorkovým napětím článku a SoC je silně závislý na protékajícím proudu v důsledku vnitřního odporu článku. Pokud budou mezi články větší rozdíly ve velikosti vnitřního odporu, i dokonale vyvážená sada článků se může při vyšších proudech jevit jako nevyvážená, což může vést k nevyžádaným zásahům BMS.

5.2 Metody balancování

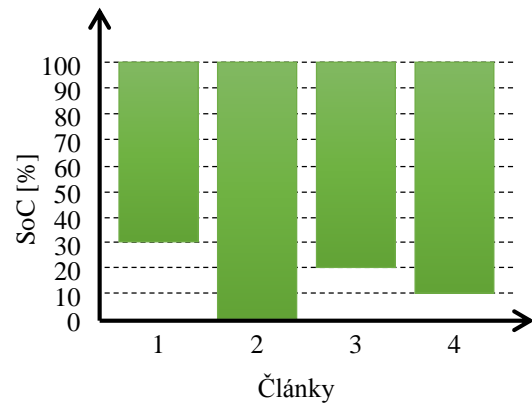
Proces vyvažování článků bývá často nazýván jako „balancování“. Metody balancování dělíme podle toho, ve které fázi nabíjecího cyklu dochází k vyvážení článku.

5.2.1 Top Balancing

Jak už název napovídá, články jsou při použití této metody balancovány na hranici maximálního nabití. Balancování tedy probíhá obvykle ke konci nabíjecího cyklu.



Obrázek č. 5.3: Baterie vyvážená metodou Top Balancing, max vybití



Obrázek č. 5.4: Baterie vyvážená metodou Top Balancing, max nabití

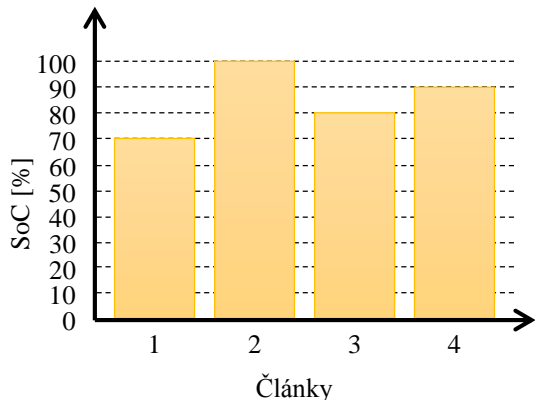
Princip metody Top balancing znázorňují obrázky výše. Je třeba zmínit, že obrázky ukazují pro lepší názornost velmi velké rozdíly mezi články. U správně fungující baterie by měl být rozdíl kapacit mezi jednotlivými články maximálně v jednotkách procent.

Z obrázků je patrné že, při metodě Top balancing jsou články maximálně vyvážené při 100 % SoC, všechny články však není možné vybit do 0 % SoC. V okamžik, kdy dojde k úplnému vybití nejslabšího článku, je nutné baterii odpojit, aby nedocházelo k dalšímu vybíjení, které by mohlo způsobit poškození slabších článků.

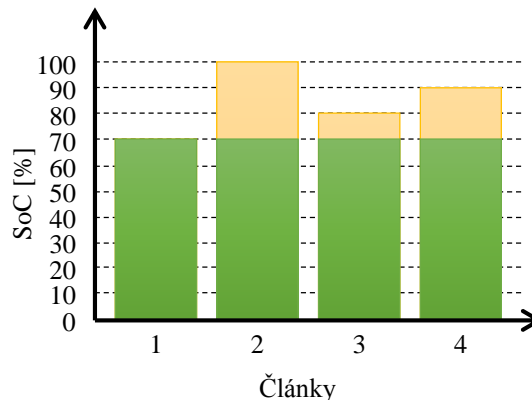
Tato metoda je ideální pro aplikace, kde není běžné baterii vybit až do 0 % SoC. Příkladem mohou být právě úložiště pro domácí fotovoltaické elektrárny [13]. Kapacita baterie zde bývá obvykle volena tak, aby s rezervou pokryla potřeby domácnosti. Naopak nabíjení do 100 % SoC je poměrně běžné. Výhodou je, že samotný fotovoltaický regulátor, který zajišťuje nabíjení baterie, nemusí s BMS žádným způsobem komunikovat. Nabíjecí cyklus může řídit pouze podle svorkového napětí baterie. Díky tomu je možné baterii nabíjet prakticky jakýmkoli běžně prodávaným regulátorem. Na konci nabíjecího cyklu už do baterie navíc obvykle teče jen malý proud, což značně snižuje chybu měření, způsobenou rozdílnou vnitřní impedancí článků a přechodovým odporem kontaktů.

5.2.2 Bottom Balancing

Metoda Bottom balancing využívá opačného přístupu, což znamená, že články jsou balancovány během vybíjení.



Obrázek č. 5.6: Baterie vyvážená metodou Bottom Balancing, max vybití



Obrázek č. 5.5: Baterie vyvážená metodou Bottom Balancing, max nabití

Princip je opět zobrazen na obrázcích výše, použity jsou články se stejnou kapacitou, jako v předchozí podkapitole.

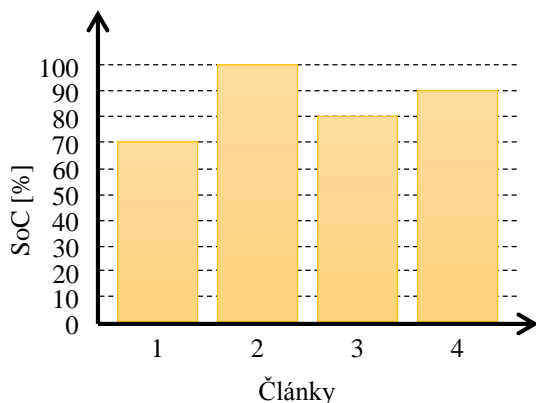
Články jsou v tomto případě maximálně vyvážené při 0 % SoC, ale není možné nabít všechny články do 100 % SoC. V okamžik, kdy dojde k plnému nabití nejslabšího článku, musí být nabíjení odpojeno.

Metoda Bottom balancing může být vhodná např. pro baterie elektromobilů [8]. Při zbývajícím nízkém dojezdu se dá očekávat, že řidič přizpůsobí svůj styl jízdy tak, aby jel co nejušporněji. Klidný styl jízdy znamená malý proud z baterie, tedy ideální podmínky pro balancování. Po příjezdu k rychlonabíječce už pak může dobíjet maximální rychlostí.

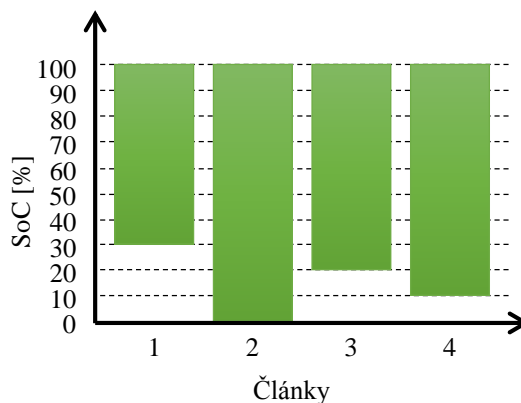
Bottom balancing je naopak nevhodná metoda pro bateriová úložiště fotovoltaických elektráren. Nemuselo by nutně vadit, že tyto baterie obvykle nebývají vybíjeny až do 0 % SoC, balancování lze provádět i při vyšších úrovních nabití. Problém by mohl nastat v okamžik, kdy se bude fotovoltaický regulátor snažit nabít baterii do 100 %. Dojde k plnému nabití nejslabšího článku, ale ostatní články ještě nabité nebudou. Celkové napětí baterie tak bude nižší, a pokud nebude regulátor komunikovat s BMS, bude v nabíjení pokračovat. BMS nezbyde nic jiného, než regulátor odpojit, což může u některých levnějších regulátorů vést až k jejich zničení.

5.2.3 Top & Bottom Balancing

Některé balancery umožňují i kombinaci výše zmíněných metod. Jsou zde však kladeny výrazně vyšší nároky na výkon balancerů. V případě čistého top nebo bottom balancingu dorovnávají balancery pouze změny způsobené stárnutím článků. K balancování tak může docházet i přes každodenní cyklování baterie třeba jen několikrát do roka.



Obrázek č. 5.8: Baterie vyvážená metodou Top & Bottom Balancing, max vybití



Obrázek č. 5.7: Baterie vyvážená metodou Top & Bottom Balancing, max nabití

Top & bottom balancing znamená, že při vybíjení jsou články srovnány na spodní hranici a při nabíjení jsou zase přerovnány na horní hranici. K balancování tak dochází při každém nabíjení i vybíjení.

Při použití aktivních, neboli „přelévacích“ balancerů o dostatečném výkonu je jediné tímto způsobem možné dostat z baterie maximum energie a celková kapacita není omezená kapacitou nejslabšího článku.

Metoda je vhodná všude, kde je kladen důraz na získání maximálního množství energie z baterie. To i za cenu vyšších nákladů na balancery, které mohou přesáhnout náklady na pořízení baterie s mírně vyšší kapacitou. Smysl může tato metoda dávat i v případech, kdy máme k dispozici levnou baterii, složenou např. z článků různého stáří, které mají mezi sebou velké rozdíly kapacity. Nízká cena baterie pak může vykompenzovat vyšší cenu BMS, problémem však může být životnost takové baterie.

5.3 Balancery

Jde o zařízení, které umožňuje vyvažování článků. Dělíme je na pasivní a aktivní. V této podkapitole budou popsány hlavní výhody a nevýhody jednotlivých typů.

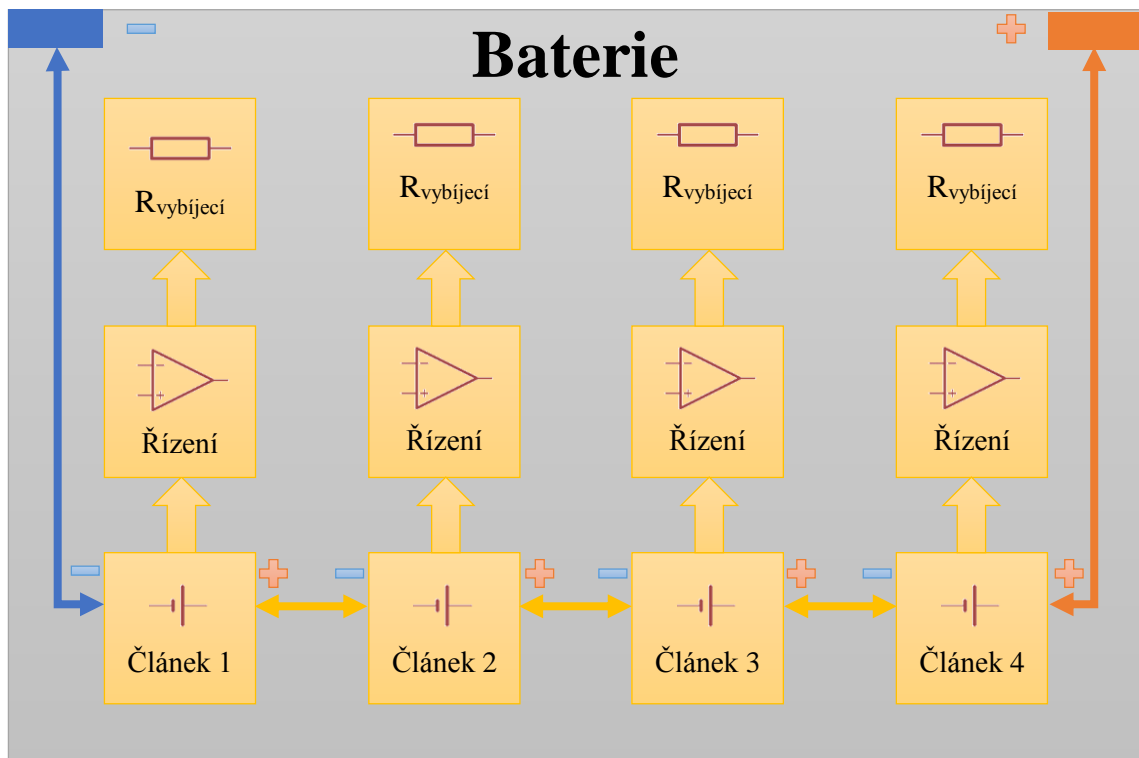
5.3.1 Pasivní balancery

Tento typ balancerů je nejčastěji používán pro metodu Top Balancing. Balancer se pak chová prakticky jako zenerova dioda. Nabíjení článku není žádným způsobem ovlivňováno, dokud článek nedosáhne maximální hodnoty napětí. Všechna další výkon je pak vyzařován ve formě tepla, dokud nedojde k plnému nabití i ostatních článků.

V případě metody Bottom Balancing je situace o něco složitější, proto se pasivní balancery pro tuto metodu příliš nepoužívají. Balancery by musely komunikovat i mezi sebou. Pokud by ke konci vybíjecího cyklu bylo napětí některého z článků nižší, silnější články by byly dodatečně vybíjeny tak, aby se dostaly na úroveň nejslabšího článku.

Metoda Top & Bottom Balancing se u tohoto typu balanceru také prakticky nepoužívá. Bylo by nutné vyzařovat energii při každém nabíjecím i vybíjecím cyklu, což by vedlo zejména u baterií s většími rozdíly kapacit článků k neúměrně velkým ztrátám.

Přes všechny zmíněné nedostatky jsou pasivní balancery stále velmi často používané a to zejména pro baterie, které jsou určeny pro fotovoltaické systémy. Mezi hlavní výhody patří jednoduchost a nízká cena. Obzvláště pokud je baterie složena z článků stejného typu a ze stejné výrobní série, články obvykle stárnou velmi podobně. Balancer tedy nemusí vyrovnávat příliš velké rozdíly a tepelné ztráty jsou tak velmi malé.



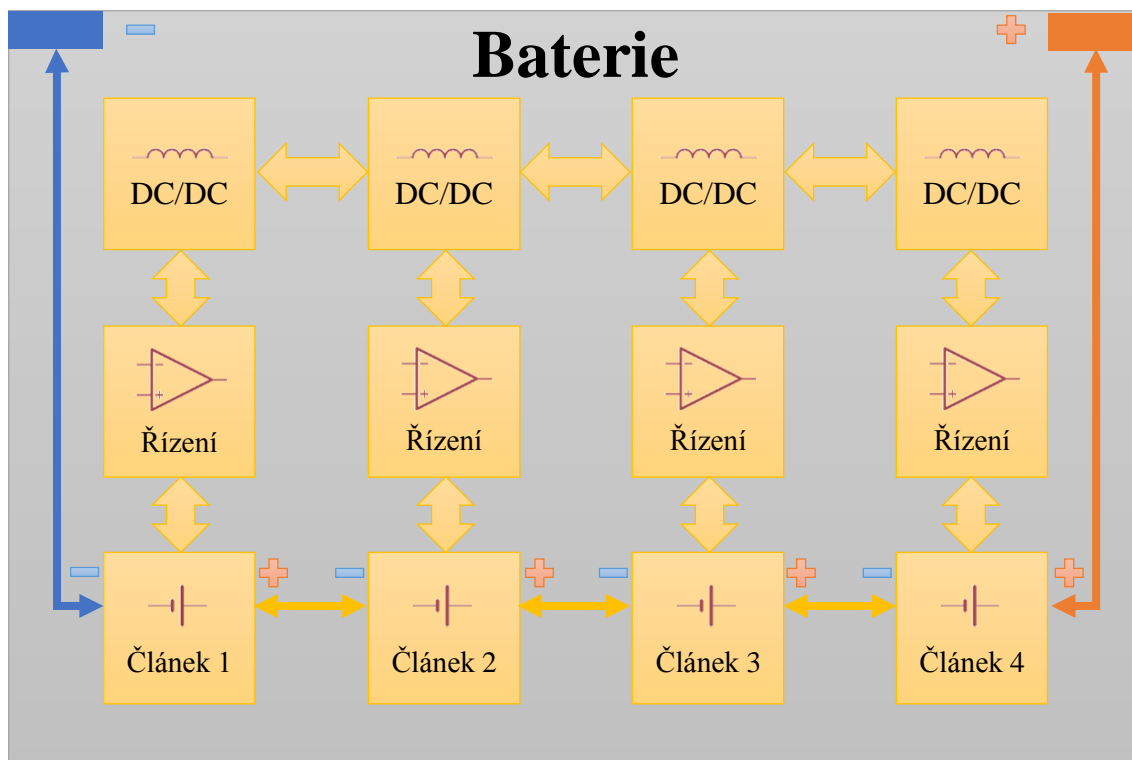
Obrázek č. 5.9: Blokové schéma zapojení baterie s pasivními balancery

5.3.2 Aktivní balancery

Aktivní balancery jsou vhodné pro všechny tři výše zmíněné metody. Největší smysl však jejich použití dává pro metodu Top & Bottom Balancing, kde se plně uplatní jejich hlavní výhoda. Přebytková energie článků zde není vyzařována ve formě tepla, ale „přelévána“ do ostatních článků. Díky tomu nemusí být kapacita celé baterie omezena kapacitou nejslabšího článku a je tak možné využít veškerou uloženou energii.

Oproti pasivním balancerům jsou aktivní balancery obvykle také schopny dosahovat vyšších balancovacích proudů při zachování stejných rozměrů. Zatímco u pasivních balancerů jsou minimální rozměry limitovány především velikostí maximálního vyzařeného výkonu, aktivní balancery vyzařují výkonu jen minimum. Při použití moderních součástek s malými ztrátami tak může i výkonný aktivní balancer dosahovat velmi malých rozměrů.

Hlavní nevýhodou aktivních balancerů je vyšší obvodová složitost a z toho plynoucí vyšší nároky na kvalitu návrhu a vyšší cena. Základem aktivního balanceru je obvykle spínaný DC/DC měnič, nebo v případě menších výkonů nábojová pumpa, které umožňují „přelévání“ energie mezi články. V obou případech jde o obvody, kde se obvykle vyskytují rychlé změny napětí a proudů, což může u nekvalitního návrhu vést např. k problémům s EMC.



Obrázek č. 5.10: Blokové schéma zapojení baterie s aktivními balancery

6. CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je, na základě teoretických poznatků z předchozích kapitol, navrhnout a sestavit funkční prototyp modulárního BMS systému. Na každý modul jsou kladeny odlišné požadavky, proto byly vytvořeny dílčí cíle pro jednotlivé moduly zvlášť. Tyto cíle jsou shrnuty v bodovém seznamu níže.

Modul pro měření proudu

- navrhnout obvodové schéma a PCB proudového modulu pro všechny varianty
- napsat firmware pro všechny varianty
- osadit alespoň jednu variantu a ověřit její funkčnost
- změřit velikost ohřevu při maximální velikosti proudu
- změřit velikost nesymetrie měření proudu pomocí Hallova senzoru ACS758

Modul pro balancování

- navrhnout obvodové schéma a PCB pasivního balanceru pro všechny varianty
- napsat firmware pro všechny varianty
- osadit několik kusů a ověřit přesnost měření napětí, teploty, změřit odchylky mezi jednotlivými kusy
- změřit ohřev výkonových prvků při maximálním balancovacím proudu
- otestovat odolnost proti přepětí na napájecí lince

Modul pro odpojení baterie

- na základě simulací optimalizovat spínání velkých kapacitních zátěží
- navrhnout obvodové schéma a PCB modulu pro odpojení baterie
- napsat firmware pro všechny varianty
- osadit alespoň jednu variantu a ověřit spínání kapacitní zátěže na 48 V baterii
- změřit velikost ohřevu při maximální velikosti proudu

7. NÁVRH INTELIGENTNÍ BMS PRO FV SYSTÉMY

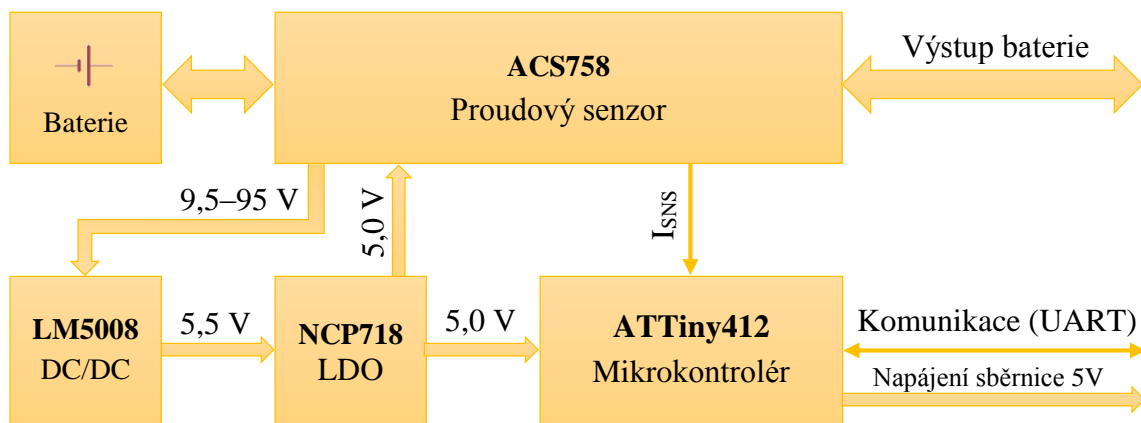
V této kapitole je popsán návrh jednotlivých modulů, ze kterých bude BMS složena. Součástí jsou i blokové schéma popisující princip zapojení.

7.1 Modul pro měření proudu

Modul pro měření proudu bude zhotoven ve dvou velikostech (S, M). Obě velikosti bude možné osadit proudovým senzorem pro 3 různé proudové rozsahy. Důraz byl kladen na co nejnižší odpor proudové cesty, aby na modulu nevznikaly zbytečně velké ztráty. Samozřejmostí je i široký rozsah napájecího napětí. V tabulce níže jsou sepsány parametry, kterých by mělo být s použitím vybraných součástek dosaženo.

Tabulka č. 7.1: Modul pro měření proudu, očekávané parametry

Varianta	S, M		
Maximální měřený proud	±50 A	±100 A	±200 A
Rozlišení měření proudu	100 mA	200 mA	400 mA
Napájecí napětí	10–60 V		
Vlastní spotřeba	<200 mW		



Obrázek č. 7.1: Modul pro měření proudu, blokové schéma

Proudový senzor ACS758 od firmy Allegro pracuje na principu Hallova jevu. V jednom pouzdře je umístěn vodič, kterým protéká měřený proud, Hallův senzor a elektronika pro zesílení měřené hodnoty. Pro potřeby BMS bude možné použít následující varianty:

Tabulka č. 7.2: Přehled vhodných variant senzoru ACS758

Proudový rozsah	Rozlišení
±50 A	40 mV/A
±100 A	20 mV/A
±200 A	10 mV/A

Protože uvnitř senzoru není žádný snímací odpor, umožňuje senzor měření s velmi malými ztrátami. Výrobce udává hodnotu odporu vnitřního vodiče **100 $\mu\Omega$** . Celkový odpor proudové cesty však bude o něco vyšší, je třeba počítat i s odporem přívodů k senzoru na plošném spoji. Silný měděný vodič uvnitř senzoru by měl vydržet i velké proudové pulzy. Za předpokladu správně fungujícího jištění by tak nemělo hrozit poškození senzoru ani při zkratu baterie. Výrobce dále slibuje **nízký offset**, což je zásadní parametr pro počítání náboje uloženého v baterii. Je však důležité zajistit stabilní napájecí napětí. Výstupní napětí při nulovém proudu je rovno $U_{CC}/2$. Kdyby bylo napájecí napětí nestabilní, projevila by se tato nestabilita i na výstupu proudového senzoru. [15]

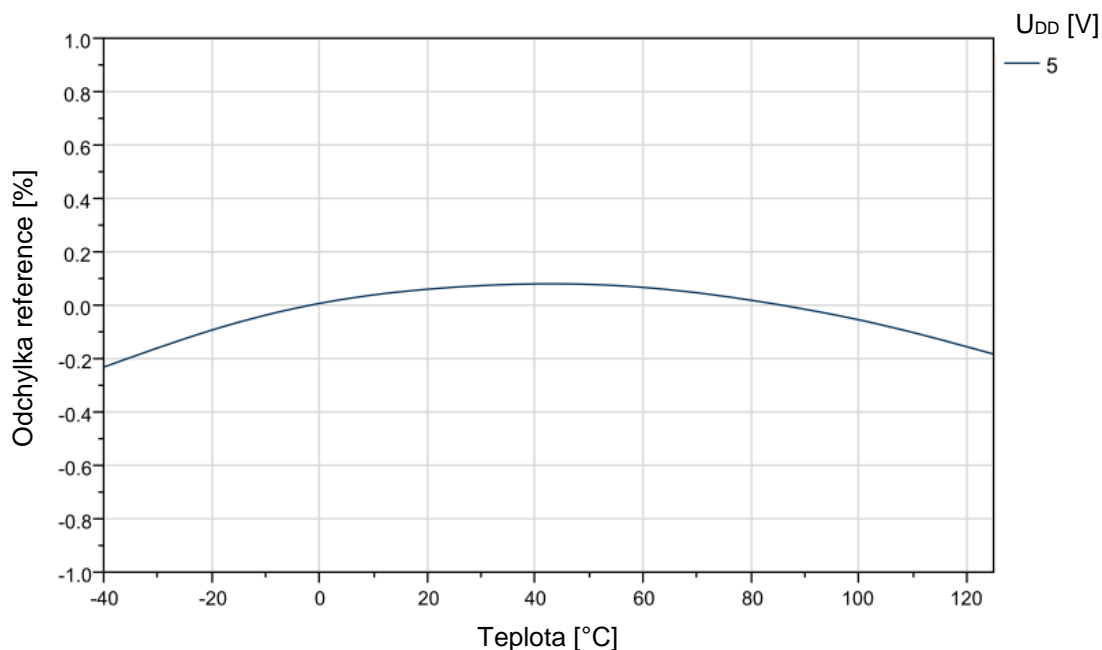


Obrázek č. 7.2: Provedení senzoru ACS758, zdroj [15]

Pro napájení byl zvolen snižující DC/DC měnič s řídicím obvodem LM5008 od firmy Texas Instruments. Tento obvod byl vybrán především kvůli vysokému rozsahu vstupního napětí, které činí **9,5–95 V**. Proudový modul tak bude možné napájet i z baterie o nominálním napětí 48 V s dostatečnou napěťovou rezervou. Maximální výstupní proud udává výrobce 350 mA, což bude pro napájení proudového senzoru i procesoru stačit opět s velkou rezervou. Spínací frekvence činí 600 kHz, všechny pasivní prvky by tak neměly zabrat příliš velkou plochu. [16]

Za měničem bude zařazen LDO regulátor NCP718 firmy ON Semiconductor zajišťující stabilní velikosti napájecího napětí 5 V, která je důležitá především pro proudový senzor. Výrobce garantuje toleranci výstupního napětí $\pm 2\%$ v teplotním rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dá se tak očekávat, že v provozních podmínkách, které budou v mnohem užším teplotním rozsahu, bude přesnost ještě mnohem lepší. Zároveň by měl tento regulátor zajistit i potlačení zvlnění výstupního napětí za spínaným zdrojem. Maximální velikost výstupního proudu je 300 mA, tedy podobně jako maximální proud spínaného zdroje. [17]

Jako mikroprocesor byl vybrán kus z nové řady ATTiny od firmy Microchip. Konkrétně typ ATTiny402. Tento mikroprocesor se prodává v 8 pinovém pouzdře SOIC8, z toho 6 pinů lze použít jako IO. Mikroprocesor obsahuje 10 bitový AD převodník, pomocí kterého bude měřena hodnota proudového senzoru. Samozřejmě je i hardwarová podpora rozhraní UART, které bude použito pro komunikaci. Hlavním důvodem pro volbu tohoto mikroprocesoru je teplotně stabilní interní reference 4,3 V. Dle charakteristiky v katalogovém listu pro rozsah teplot od 40 °C do 125 °C nepřesahuje odchylka reference hodnotu $\pm 0,2\%$. [18]



Obrázek č. 7.3: Teplotní charakteristika interní reference ATTiny402, zdroj [18]

Oproti starší řadě ATTiny už programování neprobíhá přes rozhraní SPI, ale je zde použito moderní rozhraní UPDI, které umožňuje programování pouze po jednom vodiči. To by mělo značně usnadnit zapojení programovacího konektoru.

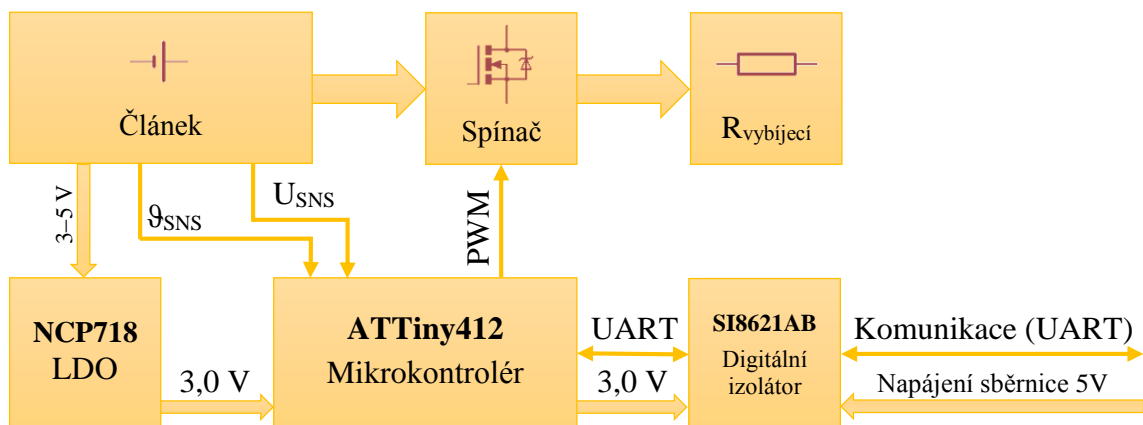
7.2 Modul pro balancování

Návrh celé BMS je směřován pro použití ve FV systémech, kde se očekává použití článků v dobré kondici. Zároveň se zde neočekávají vysoké nabíjecí ani vybíjecí proudy vzhledem ke kapacitě baterie. Zkušenosti z provozu baterií ve vlastní FVE ukazují, že takto provozované články není nutné balancovat příliš často. Maximálně několikrát do roka. Proto byl zvolen **pasivní** typ balancerů.

Podobně jako u proudového modulu, i zde se očekává návrh několika variant pro různé velikosti článků. V první řadě půjde o velikost přizpůsobenou článkům Winston 60 Ah a Winston 100 Ah pro potřeby vlastní FVE. Dále univerzální varianta, kterou bude možné montovat na téměř libovolné Li-Ion, Li-Po či LiFePO₄ články.

Tabulka č. 7.3: Modul pro balancování, očekávané parametry

Varianta	S (Winston 60 Ah)	M (Winston 100 Ah)	U (univerzální)
Max. balancovací proud	1 A	2 A	2 A
Max. měřené napětí	5 V		
Rozlišení měření napětí	5 mV		
Rozsah měření teploty	0–100 °C		
Přesnost měření teploty	±5 °C		
Napájecí napětí	3–5 V krátkodobě až 24 V		
Vlastní spotřeba	<25 mW		

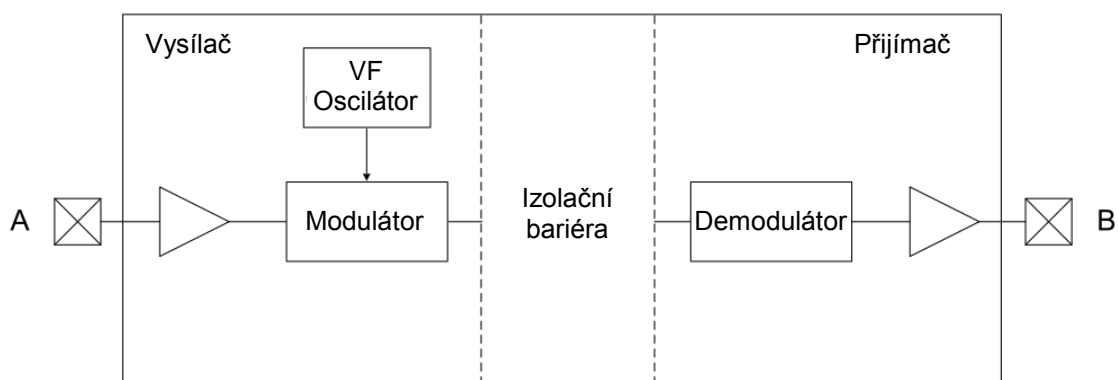


Obrázek č. 7.4: Modul pro balancování, blokové schéma

Pro zajištění stabilního napájecího napětí byl vybrán stejný typ LDO regulátoru, jako u proudového modulu. Jde pouze o jinou napěťovou variantu, konkrétně **3,0 V**. Maximální vstupní napětí regulátoru je 24 V, tedy cca 6× vyšší než provozní napětí modulu, které se bude pohybovat maximálně kolem hodnoty 4 V. Měla by tak být zajištěna dostatečná odolnost celého modulu proti napěťovým špičkám. Výhodou je i nízký dropout (minimální úbytek napětí na regulátoru). Předpokládaný odběr celého modulu je pod 10 mA, což vychází na dropout do **100 mV** [17]. Při minimálním napájecím napětí 3 V se tak dá očekávat pokles U_{out} na cca 2,9 V. Tento pokles by ještě neměl způsobovat žádné problémy, všechny vybrané součástky mají minimální napájecí napětí alespoň 2,7 V.

Řízení obstarává podobný typ mikrokontroléru jako u proudového modulu. V tomto případě jde o typ ATtiny412. Stejně je pouzdro (SOIC8) i většina periférií. Jednou z výhod tohoto mikrokontroléru je přítomnost pokročilého časovače pro generování PWM [19], což umožní lepší regulaci balancovacího proudu. Dále pak integrovaný teplotní senzor, který umožní monitorování teploty článku.

Protože každý balancovací modul bude napájen z jiného článku, není možné kvůli rozdílnému zemnímu potenciálu moduly jednoduše spojit společnou datovou sběrnicí. Pro oddělení sběrnice byl vybrán obousměrný digitální izolátor SI8621AB od firmy Skyworks. Použití je podobné, jako u klasického optočlenu. Datový signál zde však není přenášén pomocí světla, ale přes kapacitní vazbu. Obvod je dodáván v pouzdře SOIC8. Výrobce slibuje izolační pevnost **2,5 kV** a přenosovou rychlost **1 Mbps** [20], což by měly být pro účely BMS naprosto dostačující hodnoty.



Obrázek č. 7.5: Princip funkce digitálního izolátoru, zdroj [20]

Jako odporová zátěž byly zvoleny rezistory s maximálním ztrátovým výkonem $P_{MAX} = 2 \text{ W}$ o hodnotě $R = 10 \text{ } \Omega$. Tyto rezistory budou následně osazeny v adekvátním množství, aby bylo možné dosáhnout požadovaného balancovacího proudu. Maximální ztrátový výkon jednoho rezistoru můžeme určit snadno, pokud známe U_{MAX} , které v případě Li-Ion článků činí $U_{MAX, LiIon} = 4,2 \text{ V}$. Pro LiFePO₄ je maximální napětí nižší, obvykle se volí hodnota $U_{MAX, LiFePO} = 3,6 \text{ V}$.

Maximální proud rezistorem bude dle ohmova zákona roven:

$$I_{RMAX,LiIon} = \frac{U_{MAX,LiIon}}{R} = \frac{4,2}{10} = \mathbf{420\ mA} \quad (7.1)$$

$$I_{RMAX,LiFePO} = \frac{U_{MAX,LiFePO}}{R} = \frac{3,6}{10} = \mathbf{360\ mA} \quad (7.2)$$

Ztrátový výkon rezistoru pak spočítáme dle rovnice:

$$P_{MAX,LiIon} = I_{RMAX,LiIon} \cdot U_{MAX,LiIon} = 0,42 \cdot 4,2 = \mathbf{1,8\ W} \quad (7.3)$$

$$P_{MAX,LiFePO} = I_{RMAX,LiFePO} \cdot U_{MAX,LiFePO} = 0,36 \cdot 3,6 = \mathbf{1,3\ W} \quad (7.4)$$

Rezistory o povoleném výkonu $P_{MAX} = 2W$ tak nebudou ani v nejhorším možném případě přetěžovány.

Dále bylo zvoleno množství rezistorů pro jednotlivé varianty. Rezistory budou spínány dvojicí tranzistorů, proto byly vypočítané hodnoty vždy zaokrouhleny na sudý počet.

Výpočet pro variantu S, kde je očekáván balancovací proud kolem $I_{BAL,S} = 1\ A$:

$$n_S = \frac{I_{BAL,S}}{I_{MAX,LiFePO}} = \frac{1}{0,36} = 2,7 \doteq \mathbf{2} \quad (7.5)$$

Protože bylo zaokrouhlováno dolů, dosažené balancovací proudy budou o něco nižší. Skutečná velikost balancovacího proudu bude rovna:

$$I_{BAL,S,LiIon} = n_S \cdot I_{RMAX,LiIon} = 2 \cdot 0,42 = \mathbf{0,84\ A} \quad (7.6)$$

$$I_{BAL,S,LiFePO} = n_S \cdot I_{RMAX,LiFePO} = 2 \cdot 0,36 = \mathbf{0,72\ A} \quad (7.7)$$

Stejně pak pro varianty M, U s balancovacím proudem $I_{BAL,M,U} = 2\ A$:

$$n_{M,U} = \frac{I_{BAL,M,U}}{I_{MAX,LiFePO}} = \frac{2}{0,36} = 5,6 \doteq \mathbf{6} \quad (7.8)$$

$$I_{BAL,M,U,LiIon} = n_{M,U} \cdot I_{RMAX,LiIon} = 6 \cdot 0,42 = \mathbf{2,5\ A} \quad (7.9)$$

$$I_{BAL,M,U,LiFePO} = n_{M,U} \cdot I_{RMAX,LiFePO} = 6 \cdot 0,36 = \mathbf{2,2\ A} \quad (7.10)$$

Na základě výpočtů maximálních proudů byly zvoleny spínací tranzistory typu N-MOS. Rezistory budou spínány dvojicí tranzistorů, proto bude maximální proud drainem roven v nejhroším případě:

$$I_{D,MAX} = \frac{1}{2} \cdot I_{BAL,M,U,Lilon} = \frac{1}{2} \cdot 2,5 = \mathbf{1,25\ A} \quad (7.11)$$

Tranzistory bylo nutné volit i s ohledem na nízké U_{GS} , které je omezeno maximální velikostí napájecího napětí $U_{DD} = 3,0\ V$. Byly zvoleny tranzistory typu **BSS806** v pouzdře SOT-23 s následujícími parametry:

Tabulka 7.1: Přehled vybraných parametrů tranzistoru BSS806, zdroj [22]

Max. napětí mezi Drain-Source	U_{DS}	20	V
Max. proud Drainem	I_D	2,3	A
Max. odpor mezi Drain-Source v sepnutém stavu	$R_{DS(on),max} @ V_{GS} = 2,5\ V$	57	m Ω
Tepelný odpor při minimálním footprintu	R_{thJA}	250	°C/W

Z parametrů uvedených v tabulce můžeme dopočítat maximální výkonovou ztrátu a ohřev tranzistorů. Výkonová ztráta je tvořena spínacími a vodivostními ztrátami. Tranzistory budou řízeny PWM modulací, bude zde existovat i určitá spínací ztráta. Počítá se však s nízkou frekvencí PWM a nízkým U_{DS} , proto je možné spínací ztráty zanedbat. Vodivostní ztráty pak spočítáme jako:

$$P_{D,MAX} = I_{D,MAX}^2 \cdot R_{DS(on),max} = 1,25^2 \cdot 0,057 = \mathbf{89\ mW} \quad (7.12)$$

Při znalosti tepelného odporu lze dopočítat i maximální ohřev tranzistorů. Oproti vypočítaným hodnotám bude reálný ohřev pravděpodobně menší. Tepelný odpor uvedený v katalogovém listu je pro minimální velikost plochy pro odvod tepla. Při návrhu plošného spoje však bude snaha o dosažení co největší chladicí plochy.

$$\Delta\theta = P_{D,MAX} \cdot R_{thJA} = 0,089 \cdot 250 = \mathbf{22^\circ C} \quad (7.13)$$

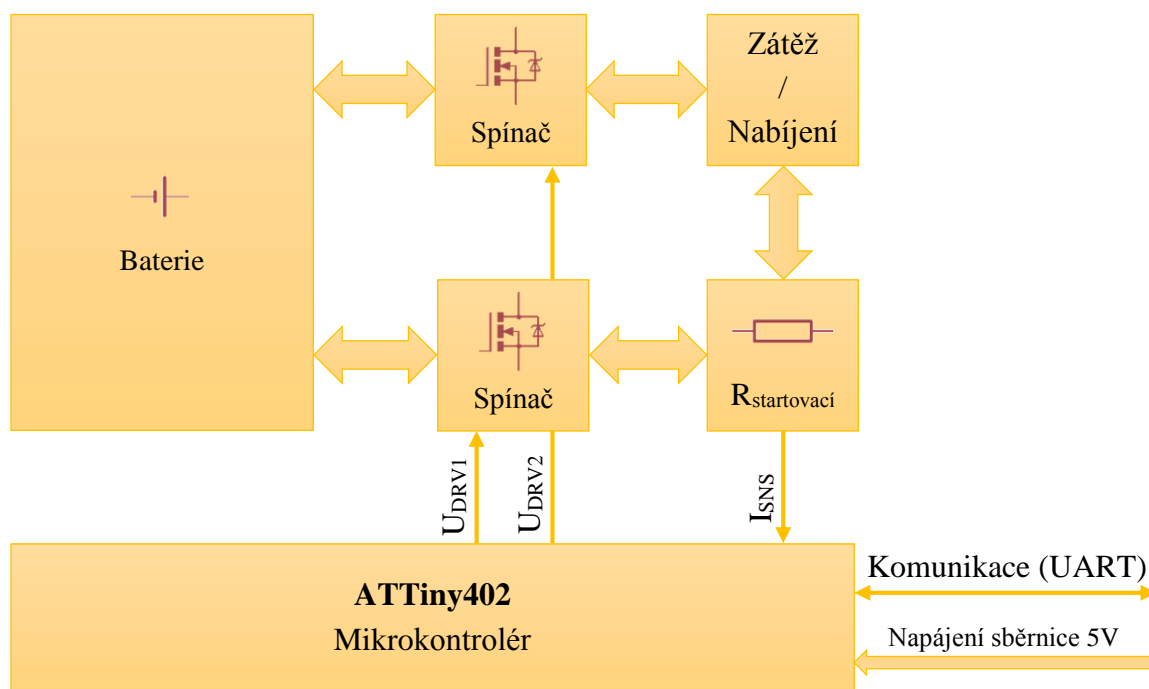
Jak vyplývá z výpočtu, ohřev tranzistorů by měl být naprosto minimální, neměl by tak být problém s provozem balanceru ani při vyšší teplotě okolí.

7.3 Modul pro odpojení baterie

V případě, že by některý z měřených parametrů (napětí, proud, teplota), dosáhl kritické hodnoty, je nutné baterii odpojit od zdroje poruchy. Někdy však může být nežádoucí odpojovat baterii od veškerých zařízení. Např. při hlubokém vybití baterie se může hodit odpojit pouze zátěž, ale nechat připojený solární regulátor, aby byla baterie co nejrychleji znovu nabita. Tím může vzniknout potřeba mít odpojovačů více. Proto je Bateriový odpojovač navrhován jako samostatný modul. Počítá se s tím, že u každého modulu bude možnost nastavení podmínek, za jakých dojde k odpojení baterie. Uživatel si pak do svého systému osadí počet modulů dle svých potřeb.

Tabulka č. 7.4: Modul pro odpojení baterie, očekávané parametry

Varianta	S	M	L
Max. trvalý proud	50 A	100 A	200 A
Max. spínané napětí	60 V		
Max. měřené napětí	60 V		
Rozlišení měření napětí	100 mV		
Vlastní spotřeba	<25 mW		



Obrázek č. 7.6: Modul pro odpojení baterie, blokové schéma

Pro řídicí mikrokontrolér nejsou u tohoto modulu kladeny žádné speciální nároky. Byl proto zvolen stejný typ jako u proudového modulu, ATTiny402. Jediným úkolem mikrokontroléru bude sepnutí/rozepnutí výkonového spínače na základě naměřených dat z proudového modulu a balancovacích modulů. Vzhledem k tomu, že po většinu času nebude mikrokontrolér měřit žádné analogové hodnoty, nejsou zde kladeny velké nároky na kvalitu napájecího napětí. Počítá se tak s použitím napájení přímo z UART sběrnice.

Součástí fotovoltaických systémů bývají DC/AC střídače, které se často vyznačují svou vysokou vstupní kapacitou. Proto se pro omezení nárazových proudů počítá se startem nejdříve přes startovací rezistor R_{START} . Startovací rezistor může sloužit rovněž jako snímač proudu při startu. Během startu tak může řídicí mikrokontrolér snadno a bezpečně ověřit, zda na výstupu není např. zkrat.

Jako spínače byly vybrány tranzistory s označením NTMFS5C604NL. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 7.2: Přehled vybraných parametrů tranzistoru NTMFS5C604NL, zdroj [21]

Max. napětí mezi Drain-Source	U_{DS}	60	V
Max. proud Drainem	$I_D @ T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	287	A
Max. odpor mezi Drain-Source v sepnutém stavu	$R_{DS(on),max} @ V_{GS} = 4,5\text{ V}$	1,7	m Ω
	$R_{DS(on),max} @ V_{GS} = 10\text{ V}$	1,2	m Ω
Tepelný odpor při minimálním footprintu (650 mm ² , měď 75 μ m)	$R_{\theta JA}$	39	$^\circ\text{C/W}$
Maximální energie pulzu	E_{AS}	776	mJ

U modulu o velikosti S, který je navrhován na $I_{MAX} = 50\text{ A}$, se počítá s použitím dvou paralelních větví tranzistorů. Proud jedním tranzistorem tak bude roven $I_{D,MAX} = 25\text{ A}$. Vzhledem k tomu, že jde o spínač, který bude prakticky trvale sepnutý, opět můžeme uvažovat pouze vodivostní ztráty.

Modul bude napájen z UART sběrnice, která poskytuje napájení $U_{DD} = 5\text{ V}$, pro snížení vodivostních ztrát byla do obvodu vložena nábojová pumpa s obvodem LM2766, která umožňuje napájecí napětí zdvojnásobit a poskytnout tak $U_{DD} = 10\text{ V}$. Pro buzení tranzistorů byly vybrány budiče MCP1415.

Pro výpočet vodivostní ztráty a ohřevu použijeme stejné rovnice, jako v předchozí podkapitole:

$$P_{D_{MAX}} = I_{D,MAX}^2 \cdot R_{DS(on),max} = 25^2 \cdot 0,0012 = \mathbf{750\ mW} \quad (7.14)$$

$$\Delta\vartheta = P_{D_{MAX}} \cdot R_{thJA} = 0,75 \cdot 39 = \mathbf{29^\circ C} \quad (7.15)$$

Skutečná velikost ohřevu bude oproti výpočtu pravděpodobně o něco vyšší, protože při návrhu plošného spoje pravděpodobně nebude dosaženo chladicí plochy, se kterou počítá katalogový list. V případě, že by byla skutečná velikost ohřevu příliš velká, počítá se s použitím nalepovacího chladiče pro lepší odvod tepla.

Aby byl spínač schopen rozepínat proud v obou směrech, musí být použita antisériová dvojice tranzistorů. Celkově tak modul bude obsahovat 4 kusy tranzistorů. Celková výkonová ztráta modulu tak bude činit při maximálním proudu:

$$P_{CELK} = n \cdot P_{D_{MAX}} = 4 \cdot 0,75 = \mathbf{3\ W} \quad (7.16)$$

Další výkonová ztráta pak bude vznikat vlivem úbytků na samotném plošném spoji a na přechodových odporech. Ohřev způsobený těmito vlivy bude ověřen až při měření.

Hodnota startovacího rezistoru byla zvolena jako $R_{START} = 1\ \Omega$. To vychází na maximální startovací proud $I_{START} = 50\ A$ při napětí baterie $U_{BAT} = 50\ V$. Při startu bude na rezistoru velmi velká výkonová ztráta, pro uvedené hodnoty až $P_{START} = 2500\ W$. Je však nutné podotknout, že takhle velký výkon bude na rezistoru pouze jednotky ms. Více než okamžitá hodnota výkonu je pro nás tak důležitá spíš velikost energie, kterou bude rezistor muset během startu pohltit. Energie, která bude při startu vyzářena, je dána rovnicí:

$$E_{START} = \int_0^{T_1} p(t) dt = \int_0^{T_1} \frac{u_R^2}{R} (t) dt \quad (7.17)$$

Je uvažováno spínání kapacitní zátěže o maximální velikosti $C_{MAX} = 20\ mF$. Z toho vychází časová konstanta $RC = \tau = 20\ ms$. Maximální čas startu je zvolen jako $2,5\tau$, tedy $T_1 = 50\ ms$. Napětí na rezistoru bude rovno:

$$u_R(t) = U_{BAT} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 50 \cdot e^{-\frac{t}{20m}} \quad (7.18)$$

Po dosazení tak dostáváme výsledný výpočet:

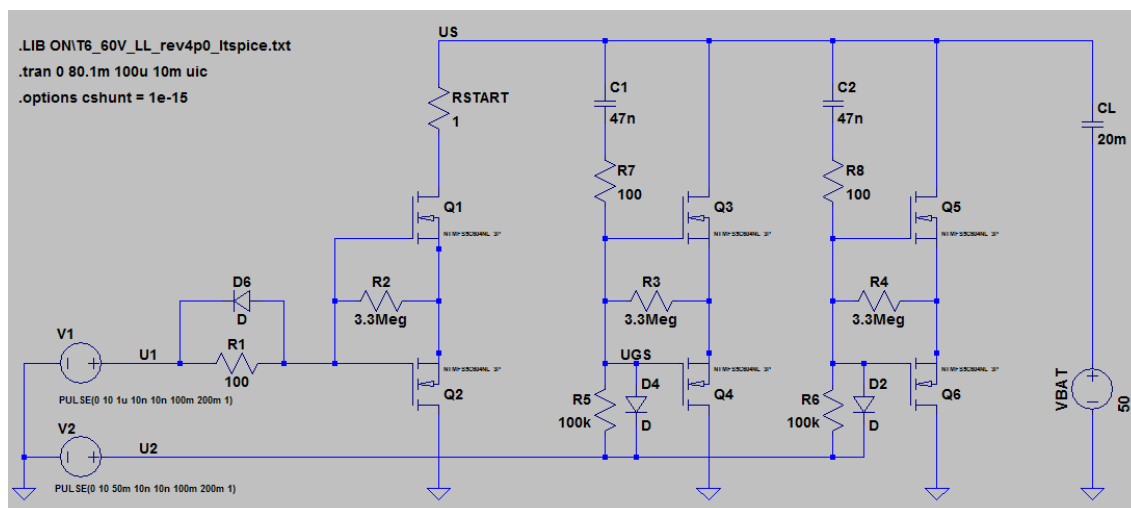
$$E_{START1} = \int_0^{50} \frac{\left(50 \cdot e^{-\frac{t}{20}}\right)^2}{1} dt = \mathbf{24,8\ J} \quad (7.19)$$

Z výpočtu je patrné, proč je nutné použití startovacího rezistoru a nebylo by možné provést měkký start pomocí samotných tranzistorů, které by byly spínány pomalu. Použité tranzistory mají uváděnou maximální energii, kterou je čip schopen pohltit, jako $E_{AS} = 776 \text{ mJ}$, což je cca 32x nižší hodnota, než vypočítaná $E_{START1} = 24,8 \text{ J}$. Pokud bychom chtěli měkký start realizovat pouze pomocí tranzistorů, potřebovali bychom tak minimálně 32 ks takových tranzistorů a stejně bychom se pohybovali na hranici, kterou dovoluje katalogový list.

Rezistor je v tomto směru mnohem odolnější součástka. Vybrán byl drátový rezistor dimenzovaný na trvalou výkonovou ztrátu $P_{DIS} = 10 \text{ W}$. Hodnotu maximální energie, kterou je rezistor schopen absorbovat katalogový list bohužel neuvádí. Pro zajímavost můžeme spočítat alespoň teoretický ohřev keramického tělesa, na kterém je rezistor navinut. Zajímavější by bylo zjistit ohřev samotného drátu. Během přechodového jevu totiž pravděpodobně ani nestihne dojít k přenosu tepla z drátu do keramiky. Hmotnost samotného drátu je však neznámá. Hmotnost rezistoru činí cca $M = 10 \text{ g}$ a budeme předpokládat, že většinu hmotnosti tvoří právě keramické tělísko. Měrná tepelná kapacita keramiky se pohybuje kolem $c = 0,32 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Dosazením do vztahu definujícím měrnou tepelnou kapacitu pak dostáváme:

$$\Delta\vartheta_{START} = \frac{E_{START}}{M \cdot c} = \frac{24,8}{10 \cdot 0,32} = 7,8^{\circ}\text{C} \quad (7.20)$$

Dále bylo nakresleno schéma pro simulaci startovacího průběhu v programu LTSpice:



Obrázek č. 7.7: Schéma pro simulaci měkkého startu v programu LTSpice

O sepnutí startovacího rezistoru se stará dvojice tranzistorů Q_1 a Q_2 . Pro zjednodušení byly zvoleny stejné typy tranzistorů, jako pro hlavní spínač, tedy typ NTMFS5C604NL. Tyto tranzistory jsou však zatěžovány jen krátkodobě, proto by bylo možné použít i typ na menší proudy.

Jako hlavní spínač slouží čtveřice tranzistorů Q₃–Q₆. Přestože je v obvodu použitý startovací rezistor, nebylo by moudré tyto tranzistory spínat „natvrdo“. Po uplynutí doby startu T_{START} = 50 ms bude napětí na spínači rovno dle rovnice 7.18:

$$u_R(50ms) = U_{BAT} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 50 \cdot e^{-\frac{50m}{20m}} = 4,1 \text{ V} \quad (7.18)$$

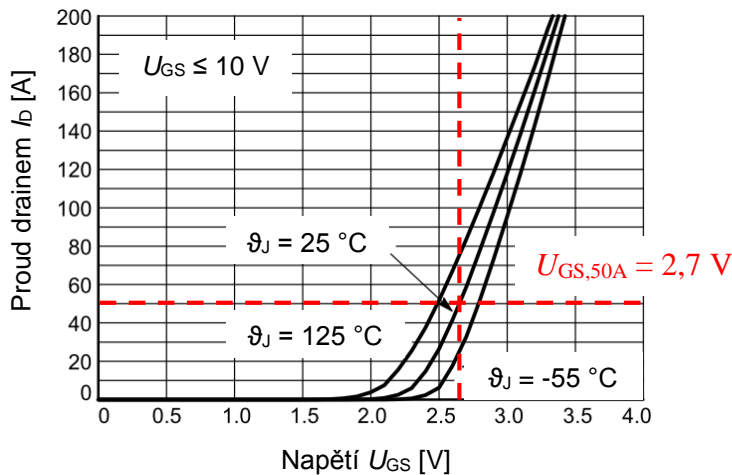
Ačkoli se zdá, že jde o nízké napětí, které už by bylo možné sepnout „natvrdo“, za předpokladu odporů v obvodu v řádu desítek mΩ by mohl být nárazový proud stále v řádu stovek ampér. Měkké sepnutí dvojice tranzistorů Q₃ a Q₄ zajišťuje zpětná vazba tvořená dvojicí C₁ a R₅. Rezistor R₇ a dioda D₄ pak zajišťují, že nedojde k nechtěnému sepnutí tranzistorů při prudkém nárůstu napětí baterie. Stejným způsobem je zapojená i zpětná vazba pro tranzistory Q₅ a Q₆.

Kombinace C₁ a R₅ určuje maximální velikost dU/dt, která při spínání vznikne. Na začátku tedy musíme spočítat maximální dU/dt, které může při spínání vzniknout, aby nebyl překročen proud 50 A. Vyjdeme ze známého vztahu pro proud kondenzátorem:

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (7.21)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I}{C} = \frac{50}{20m} = 2,5 \frac{kV}{s} = 2,5 \frac{mV}{\mu s} \quad (7.22)$$

Dále potřebujeme zjistit velikost U_{GS}, tedy napětí na rezistoru R₅ při startu. Tuto hodnotu můžeme odečíst z přenosové charakteristiky tranzistoru:



Obrázek č. 7.8: Odečet U_{GS} z přenosové charakteristiky tranzistoru NTMFS5C604NL, zdroj [21]

Z charakteristiky bylo odečteno $U_{GS,50A} = 2,7$ V, dále známe budící napětí (zdroj V_2), které činí $U_{BUD} = 10$ V. Úbytek na rezistoru R_5 pak bude rozdíl těchto dvou napětí, tedy $U_5 = 7,3$ V. Byla zvolena velikost $R_5 = 100$ k Ω , což znamená proud $I_5 = 73$ μ A. Při znalosti proudu I_5 pak dokážeme spočítat velikost kondenzátoru C_1 . Vztah můžeme opět získat úpravou rovnice pro kondenzátor:

$$C_1 = I_5 \cdot \frac{dt}{dU} = 73\mu \cdot \frac{1\mu}{2,5m} = \mathbf{29\ nF} \quad (7.23)$$

Nebude na škodu, když bude proud tranzistorů o něco nižší, proto byla zvolena hodnota $C_1 = \mathbf{47\ nF}$. S touto hodnotou by měl proud tranzistorů vyjít na cca $I_{D,START} = \mathbf{30\ A}$.

Velikost rezistoru R_7 musí být dostatečně velká, aby ani při velmi rychlé změně napětí baterie nemohlo dojít k nechtěnému sepnutí spínače. Zároveň musí být výrazně menší než velikost R_5 , aby neovlivňovala měkký start. Byla zvolena hodnota $R_7 = 100$ Ω , což je 1000x méně, než hodnota R_5 . Pokud by došlo k nekonečně rychlému nárůstu U_{BAT} z 0 V na 50 V, bude kondenzátor C_1 působit prakticky jako zkrat, na rezistoru R_1 tak bude $U_1 = 50$ V. Pokud chceme udržet tranzistorů zavřené, musí být budič tranzistorů schopen veškerý proud tekoucí přes R_7 svést do země. Kromě proudu rezistorem R_7 musí budič odvést i proud tekoucí rezistorem R_8 v paralelní větvi. Celkový proud budičem tak bude $I_{BUD} = I_7 + I_8 = 500 + 500 = 1000$ mA. Maximální proud budiče MCP1415 je $I_{BUD,MAX} = 15000$ mA [23], tranzistorů by tedy měly být spolehlivě uzavřeny i při nekonečně rychlém napěťovém skoku U_{BAT} . Reálně bude však proud budičem při tomto jevu mnohem menší, protože napěťový skok U_{BAT} nebude nikdy nekonečně rychlý.

V poslední části návrhu bychom měli ověřit, zda nedojde při spínání k překročení E_{AS} zvolených tranzistorů. Při zvolené kapacitě C_1 , $C_2 = 47$ nF bude napětí na spínači klesat se strmostí:

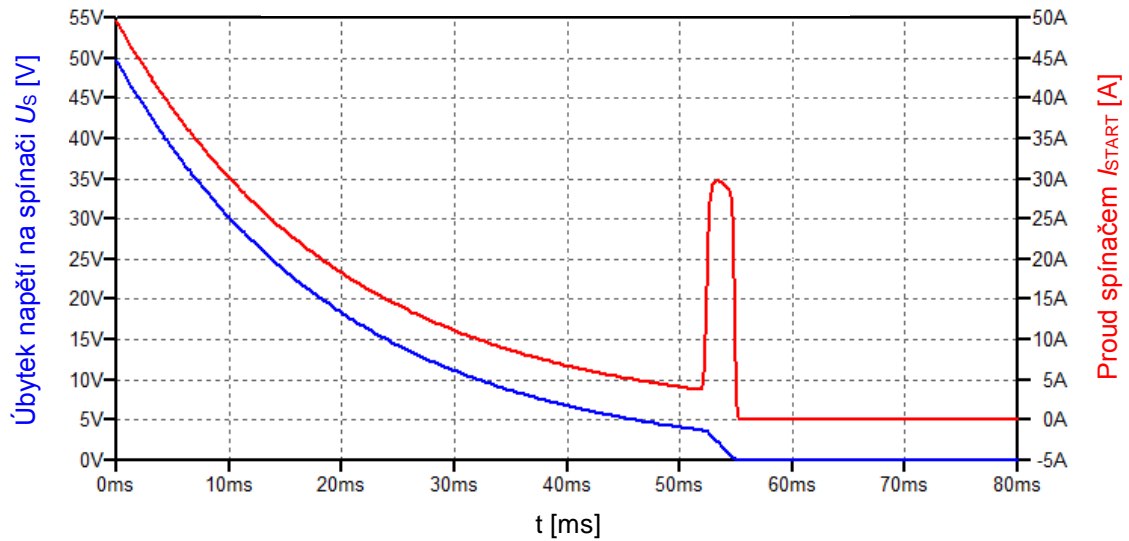
$$\frac{dU}{dt} = \frac{I_5}{C_1} = \frac{73\mu}{47n} = 1,6 \frac{kV}{s} = \mathbf{1,6 \frac{mV}{\mu s}} \quad (7.24)$$

Napětí na spínači v okamžik sepnutí bylo vypočítáno jako $u_R(50ms) = 4,1$ V. Z toho plyne, že na hodnotu 0 V při strmosti 1,6 mV/s bude přechodový jev trvat $T_2 = 2,6$ ms. energii pak spočítáme snadno jako:

$$\begin{aligned} E_{START2} &= \int_0^{T_2} p(t) dt = \int_0^{T_2} u(t) \cdot I_{D,START} dt = \frac{1}{2} u_R(50ms) \cdot I_{D,START} \cdot T_2 = \\ &= \frac{1}{2} \cdot 4,1 \cdot 30 \cdot 2,6m = \mathbf{160\ mJ} \end{aligned} \quad (7.25)$$

Energie se navíc rozloží mezi dvojici tranzistorů, takže každý tranzistor během sepnutí pohltí energii $E_{AS} = 80$ mJ, což je hluboko pod hranicí, kterou dovoluje katalogový list ($E_{AS} = 776$ mJ).

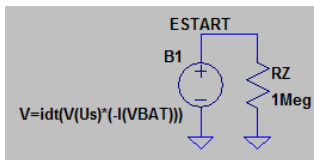
Pro ověření vypočtených výsledků byla provedena tranzientní analýza.



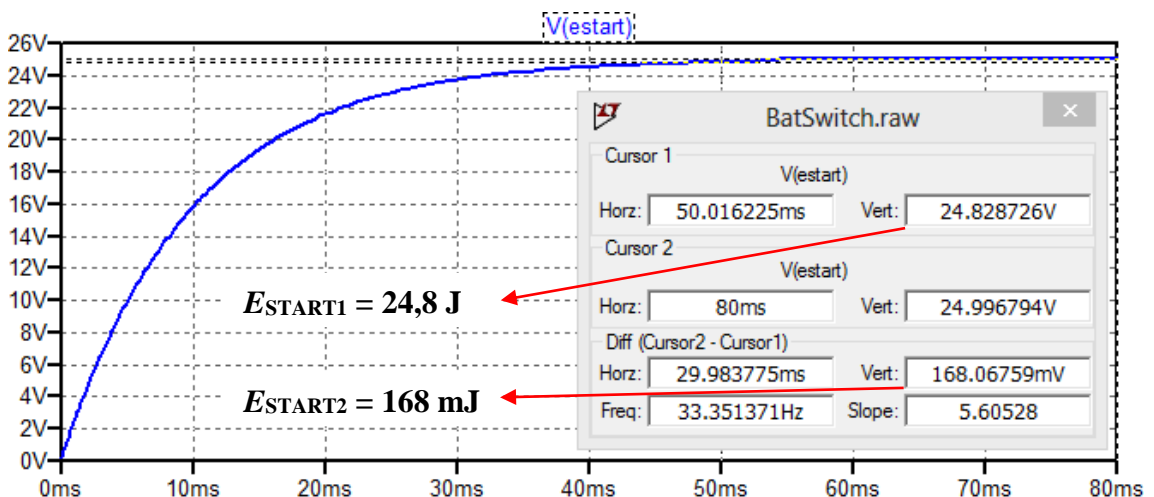
Obrázek č. 7.9: Tranzientní analýza, průběhy napětí a proudů na výstupu spínače

Na výstupu tranzientní analýzy můžeme pozorovat, že na začátku velikost proudu dosahuje hodnoty $I_{START1} = 50 \text{ A}$, následně proud exponenciálně klesá až do okamžiku sepnutí zbylých spínačů, kdy znovu naroste na očekávanou hodnotu $I_{START2} = 30 \text{ A}$.

Pro ověření výpočtů maximální vyzářené energie byl do schématu přidán napěťový zdroj, jehož výstupní napětí odpovídá velikosti vyzářené energie.



Obrázek č. 7.10: Model pro ověření vyzářené energie spínače



Obrázek č. 7.11: Ověření výpočtu vyzářené energie spínače

Výsledky na obrázku č. 7.11 odpovídají vypočteným hodnotám.

8. REALIZACE ZAŘÍZENÍ

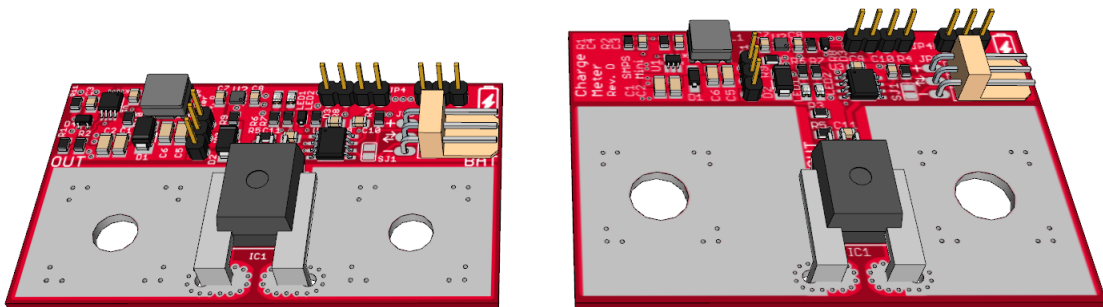
Všechny moduly byly navrženy s ohledem na nízkou výrobní cenu a vysokou spolehlivost. U modulů pro balancování, kde se počítá s výrobou v největších objemech, byl kladen důraz i na snadné osazení součástek. Tato kapitola stručně popisuje postup osazení jednotlivých modulů a shrnuje jejich základní konstrukční parametry. Na závěr je pak obsažena přibližná cenová kalkulace.

8.1 Modul pro měření proudu

Modul pro měření proudu byl navržen ve dvou velikostních variantách S a M, aby byla zajištěna optimální montáž jak na menší, tak na středně velké články. Parametry jednotlivých variant shrnuje následující tabulka:

Tabulka č. 8.1: Modul pro měření proudu – konstrukční parametry

Velikost, Proud	S	M
Rozměry [mm]	64x37,5x1,6	69x48x1,6
Rozteč vývodů [mm]	40	45
Montáž	2x šrouby M6	2x šrouby M8



Obrázek č. 8.1: Modul pro měření proudu – 3D vizualizace, velikost S vlevo, velikost M vpravo

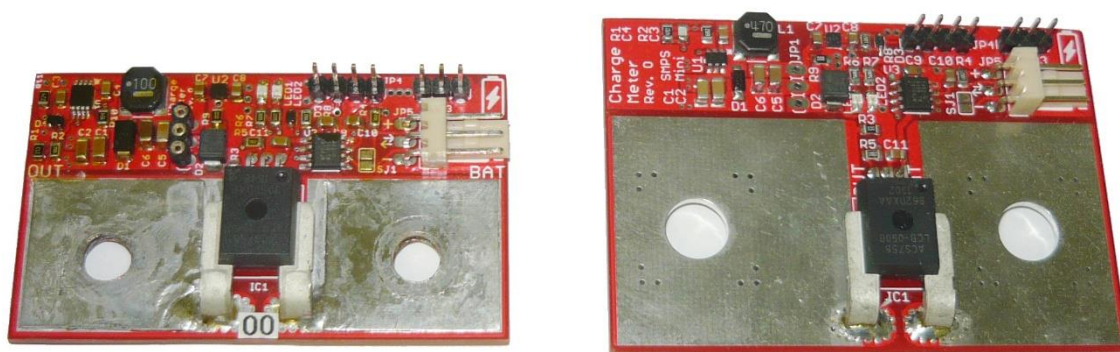
Obě velikostní varianty byly navrženy pro výrobu na 2 vrstvé desce plošných spojů o standardní tloušťce 1,6 mm. Součástky jsou však osazeny pouze z jedné strany. Jak bylo zmíněno v kapitole zabývající se návrhem, použitý proudový senzor je možné osadit pro proudové rozsahy ± 50 A, ± 100 A, ± 200 A.

Aby bylo dosaženo lepší vodivosti plošného spoje, jsou všechny výkonové měděné plochy odmaskovány. Díky tomu je možné na tyto plochy připájet další vrstvu měděné fólie o požadované tloušťce. Výhodou tohoto řešení je značné snížení výrobních nákladů, protože pro výrobu samotné DPS může být použita měděná fólie o standardní tloušťce, např. 35 μ m. Nižší výrobní cena je však vykoupena vyšší časovou náročností při osazování. Přídavnou měděnou fólii je třeba nastříhat, pocínovat, zapájet a následně vyvrtat. Tento způsob je tedy výhodný především pro kusovou výrobu. V případě sériové

výroby by bylo pravděpodobně výhodnější nechat vyrobit DPS se silnější měděnou fólií, případně použít vícevrstvou DPS a zapojit jednotlivé vrstvy paralelně.

Prototypové desky plošných spojů byly vyrobeny se standardní tloušťkou laminátu 1,6 mm a standardní tloušťkou měděné fólie 35 μm . Součástky typu SMT byly zapájeny přetavením, součástky typu THT pomocí mikropájky. Na velikosti S byly proudové spoje posíleny dvojitou vrstvou měděné fólie o tloušťce 0,3 mm. Verze M byla ponechána pouze se základní 35 μm fólií, aby bylo možné porovnat vliv měděné fólie na ohřev spojů při vyšších proudech.

Z důvodu polovodičové krize, která probíhala v době psaní práce, se podařilo sehnat pouze 1 ks originálu proudového senzoru ACS758. Tento kus byl osazen na modul o velikosti S. Druhý kus proudového senzoru se podařilo zakoupit na portálu eBay. Nevýhodou je, že u součástek z neoficiální distribuce nelze jednoduše ověřit pravý původ. Vždy hrozí, že může jít např. o kusy s výrobní vadou, které výrobce vyřadil. Zde nebyla jiná možnost, než senzor z neoficiální distribuce vyzkoušet. Pro jistotu byl tento kus osazen na velikost M, která by měla v blízké době sloužit pouze pro demonstrační účely.



Obrázek č. 8.2: Moduly pro měření proudu – osazené kusy, zleva velikosti S, M

Cena modulu pro měření proudu je tvořena zejména cenou spínaného zdroje pro napájení a cenou proudového senzoru. V následující tabulce jsou shrnuty ceny komponent platné v době realizace práce.

Tabulka č. 8.2: Modul pro měření proudu – přibližná cena za 1 ks

Položka	Cena vč. DPH
Součástky	400,- Kč
Plošný spoj	20,- Kč
Celkem	420,- Kč

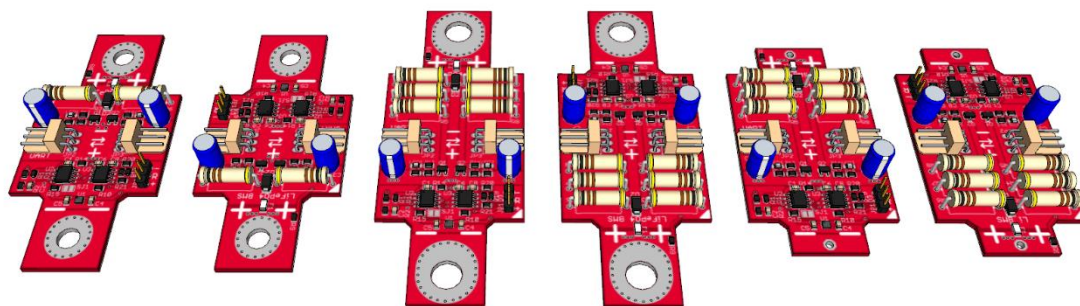
Již v době psaní práce se začaly objevovat problémy s dostupností proudového senzoru. Cena se ale i přes špatnou dostupnost držela na stále stejné úrovni. U proudového modulu se neočekává výroba velkých sérií (jeden modul vystačí pro celou baterii), což by mohlo výslednou cenu mírně snížit. Cena uvedená v tabulce by tak mohla být i do budoucna poměrně aktuální. Bude však nutné počkat na obnovení dodávek proudových senzorů.

8.2 Modul pro balancování

Modul pro balancování byl navržen ve třech variantách, označených jako S, M, U. Parametry jsou srovnány v tabulce:

Tabulka č. 8.3: Modul pro balancování – konstrukční parametry

Velikost	S	M	U
Rozměry [mm]	40x80x1,6	40x100x1,6	40x70x1,6
Rozteč vývodů [mm]	81	61	Univerzální
Montáž	2x šrouby M6	2x šrouby M8	2x otvory pro pájení Ø = 2 mm



Obrázek č. 8.3: Moduly pro balancování – 3D vizualizace, zleva velikosti S, M, U

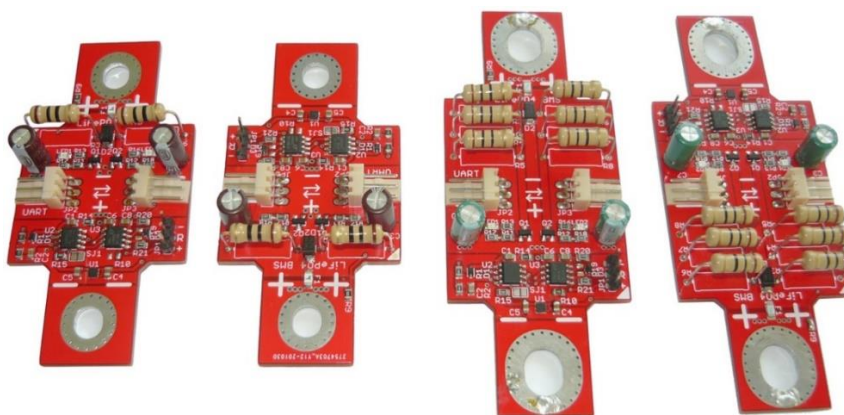
Všechny varianty byly navrženy na 2 vrstvé desky plošných spojů. Součástky jsou osazeny pouze z jedné strany. Velikost S je svými rozměry určena především pro články Winston o kapacitě 60 Ah. Velikost M pak pro články Winston 100 Ah. Velikost U je možné použít pro prakticky jakýkoli typ článku o kapacitě do 200 Ah. Pro větší články by bylo vhodné navrhnout verzi s větším balancovacím proudem. Do připravených otvorů je možné zapájet vodiče o průměru až 2 mm, pro přivedení k vývodům článku. Vodiče by však měly být co nejkratší, aby na nich nevznikal zbytečně velký úbytek napětí při balancování. Tento úbytek by se projevil i na měřené hodnotě a vedl by k pomalejšímu průběhu balancování.

Všechny velikosti byly navrženy pro výrobu v párech, kdy jeden modul je sudý a druhý lichý. Rozdíl mezi lichými a sudými moduly je v opačném zapojení konektoru UART sběrnice. Počítá se, že sériově zapojené články budou skládány vedle sebe se střídáním polarity. Pokud by byl konektor pro UART zapojený na každém modulu stejně, bylo by nutné sběrnici u každého článku křížit. Patrné je to z obrázku 8.3, kde konektory pro UART sběrnici jsou umístěny uprostřed modulu.

Jako prototypy byly vyrobeny prozatím pouze varianty S a M. Tloušťka laminátu byla zvolena stejně jako u modulů pro měření proudu, tedy standardních 1,6 mm.

Vzhledem k tomu, že balancovací proudy se budou pohybovat maximálně v jednotkách ampérů, bylo možné použít i standardní tloušťku měděné fólie 35 μm bez potřeby dalšího posilování spojů.

SMD součástky byly zapájeny přetavením, THT pak pomocí mikropájkky. Výhodou variant S a M je jejich poměrně rychlé a nenáročné osazování. To je u tohoto modulu poměrně důležitý požadavek, protože např. 48 V LiFePO₄ baterie obsahuje 16 článků, což znamená osazení 16 ks modulů. Osazování varianty U zabere pravděpodobně více času, kvůli potřebě nastříhání a zapájení přídatných vodičů potřebné délky. Proto by mohlo být výhodné navrhnout do budoucna i varianty určené speciálně pro montáž na další typy článků.



Obrázek č. 8.4: Moduly pro balancování – osazené kusy, zleva velikosti S, M

Následující tabulka obsahuje informace o ceně, za kterou byl sestaven 1 ks modulu v době realizace práce. Jednotlivé varianty se od sebe liší pouze rozdílem ve velikosti plošného spoje a počtu rezistorů. Cenový rozdíl mezi jednotlivými variantami se tak pohybuje v jednotkách korun, což je vzhledem k dalším vlivům na velikost ceny naprosto zanedbatelné.

Tabulka č. 8.4: Modul pro balancování – přibližná cena za 1 ks

Položka	Cena vč. DPH
Součástky	130,- Kč
Plošný spoj	20,- Kč
Celkem	150,- Kč

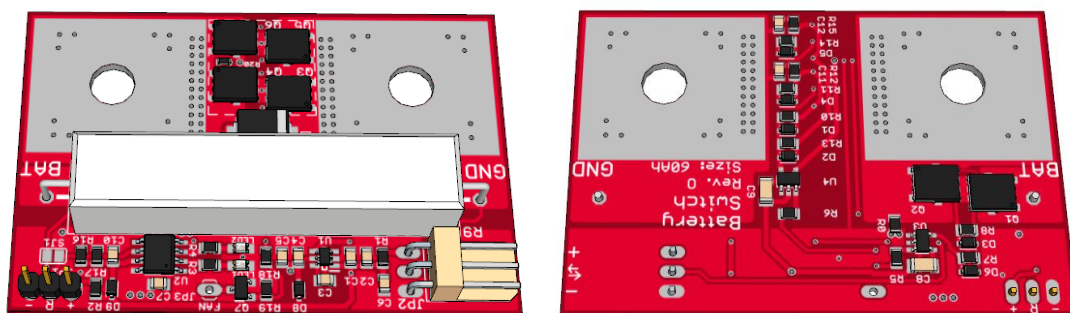
U modulů pro balancování se očekává výroba ve větším množství, protože je nutný 1 ks modulu pro každý článek. Od vyrobeného počtu kusů se pak odvíjí i cena součástek a plošného spoje. Vzhledem k probíhající polovodičové krizi v době psaní práce je také pozorovatelný nárůst cen polovodičů. Možná je i dočasná nedostupnost některých komponent v blízké době. Výsledná cena za jeden modul se tak může pohybovat v rozmezí cca **100–400,- Kč** v závislosti na vývoji ceny součástek a vyrobeném množství.

8.3 Modul pro odpojení baterie

Modul pro odpojení baterie byl navržen prozatím pouze v nejmenší velikostní a proudové variantě S, která je určena pro proudy do 50 A. S návrhem dalších variant se počítá později, až dlouhodobé testování ve fotovoltaickém systému ukáže, zda nebude nutné provést dodatečné úpravy současného zapojení.

Tabulka č. 8.5: Modul pro odpojení baterie – konstrukční parametry

Velikost	S
Rozměry [mm]	40x80x1,6
Rozteč vývodů [mm]	81
Montáž	2x šrouby M6

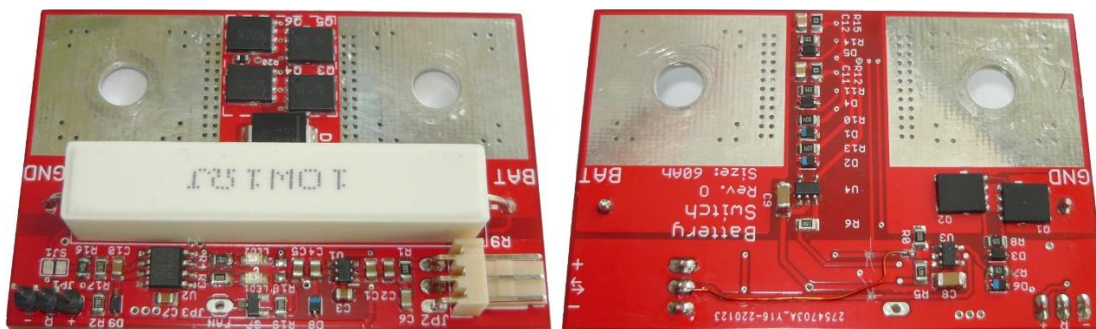


Obrázek 8.1: Modul pro odpojení baterie – 3D vizualizace, velikost S, zleva osazení součástek z horní a spodní strany

Modul pro odpojení baterie je stejně jako předchozí moduly navržen pro 2 vrstvou desku plošných spojů. Oproti ostatním modulům zde bylo nutné přistoupit k montáži součástek z obou stran, aby byly zachovány rozměry vhodné pro montáž přímo na samotný článek.

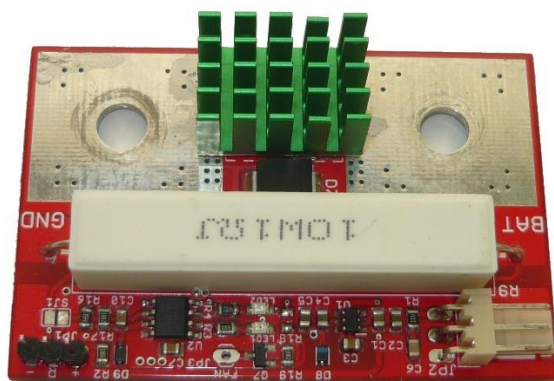
Stejně jako v případě modulu pro měření proudu je možné v případě potřeby na odmaskované plochy aplikovat přídatnou měděnou fólii. Prototypová verze byla ponechána pouze se základní fólií tloušťky 35 μm . Dále je počítáno s možností montáže chladiče na čtveřici spínacích tranzistorů, které jsou umístěny z horní strany.

Osazení probíhalo stejně jako u předchozích modulů. Pouze u první verze plošného spoje byla zjištěna chyba v zapojení, kdy byly prohozeny dva vývody mikrokontroléru. Chybně zapojený spoj byl přerézán pomocí skalpelu. Nový spoj byl zapojen pomocí smaltovaného drátu. Oprava je vidět při pohledu na spodní stranu DPS na obrázku 8.2. Příložená schémata i soubory k výrobě plošného spoje už mají tuto chybu opravenou.



Obrázek 8.2: Modul pro odpojení baterie – osazený kus, velikost S, zleva osazení součástek z horní a spodní strany

Pro lepší odvod tepla byl modul osazen chladičem, který byl přilepen na spínací tranzistory osazené z horní strany. Na spodní straně DPS se nachází tranzistory, které vedou proud pouze při měkkém startu. Jejich zatížení je tedy pouze krátkodobé a žádné přídavné chlazení tak není třeba.



Obrázek 8.3: Modul pro odpojení baterie – osazení chladiče

Modul pro odpojení baterie je ze všech modulů nejdražším kusem. Někteří uživatelé mohou preferovat i jiné způsoby ochrany baterie. Např. přímou komunikaci BMS se spotřebiči a nabíječem. V takovém případě je možné tento modul z celé sestavy vynechat.

Tabulka č. 8.6: Modul pro odpojení baterie – přibližná cena za 1 ks verze S (50 A)

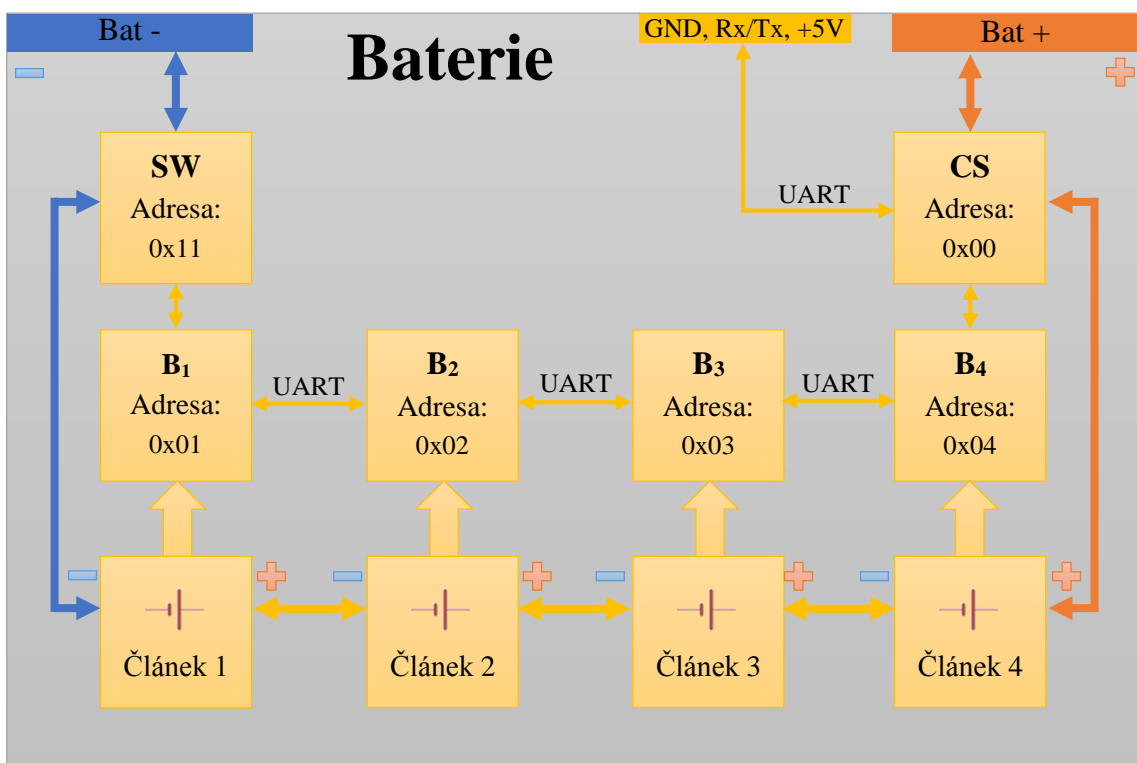
Položka	Cena vč. DPH
Součástky	1350,- Kč
Chladič	20,- Kč
Plošný spoj	20,- Kč
Celkem	1390,- Kč

Cena v tabulce je pouze pro variantu S umožňující max trvalý proud $I_{MAX} = 50$ A. Výsledná cena je tvořena zejména použitými tranzistory pro vysoké proudy, kterých je osazeno celkem 6 ks. Stejný počet tranzistorů by vystačil i pro varianty 100 A a 200 A při použití aktivního chlazení. V případě požadavku na čistě pasivní chlazení by bylo nutné počet tranzistorů navýšit a cena výkonnějších variant by dále výrazně vystoupala.

9. DIGITÁLNÍ KOMUNIKACE A ŘÍDÍCÍ PROGRAM

Řídicí program má za úkol zajistit správnou funkci všech modulů a jejich komunikaci s hlavní řídicí jednotkou. Jako hlavní řídicí jednotka může posloužit libovolná vývojová deska s možností UART komunikace. Uživatel má tak naprostou volnost ve volbě ovládání (webové rozhraní, bluetooth, apod.), nastavení podmínek pro balancování a odpojování baterie.

Všechny moduly komunikují po společné UART sběrnici, která je zapojená jako half-duplex. V jednom okamžiku je tedy možná komunikace pouze jedním směrem a pouze s jedním modulem. Příklad zapojení baterie včetně BMS je znázorněn na blokovém schématu 9.1.



Obrázek č. 9.1: Implementace BMS do baterie

Kde *B* označuje modul balancování, *SW* modul pro odpojení baterie, *CS* modul pro měření proudu. Zem UART sběrnice označená jako *GND* je spojena s minus pólem článku 1.

UART sběrnice používá standardní napěťové úrovně TTL. V případě komunikace na delší vzdálenosti je možné použití běžně dostupných převodníků TTL na RS-485.

Parametry pro nastavení samotné UART komunikace jsou shrnuty v následující tabulce:

Tabulka č. 9.1: Nastavení UART komunikace

Rychlost	19200 Bd
Režim	Asynchronní
Počet stop bitů	1 stop bit
Parita	Žádná
Délka slova	9 bitů, první se vysílá MSB

Rychlost komunikace 19200 Bd byla zvolena s ohledem na očekávané množství dat. Při této rychlosti by neměl být problém vyčítat data z BMS pro 16 článků cca 4x za sekundu, včetně dostatečné rezervy na přenos dodatečných příkazů.

Paritní bit zde není využíván, protože jde o poměrně slabý způsob ochrany dat proti chybám. Bylo rozhodnuto řešit ochranu proti chybám raději programově, pomocí cyklicky redundantního součtu (CRC).

Dále byla zvolena 9 bitová délka slova, která je výhodná pro komunikaci většího množství mikrokontrolérů po společné sběrnici. Mnoho mikrokontrolérů umožňuje nastavit komunikaci na tzv. multi-processor mód. Jeden rámeček tak obsahuje 8 bitové slovo + bit určující, zda jde o data (bit8 = 0) či adresu (bit8 = 1). Všechny kontroléry na sběrnici za běžných okolností kontrolují pouze slova obsahující adresu. Pokud adresa odpovídá, začne kontrolér přijímat i data. Po skončení komunikace se mikrokontrolér přepne zpět do režimu, kdy přijímá pouze adresy. Díky tomu je ušetřena část výpočetního výkonu, protože jinak by každý mikrokontrolér musel číst i data určená pro ostatní moduly.

Celá zpráva se pak skládá z pěti nebo sedmi slov. Obě varianty jsou popsány v tabulkách 9.2 a 9.3. Písmena L označují spodní byte, písmena M označují horní byte 16-bitových slov.

Tabulka č. 9.2: Struktura 5 slov dlouhé zprávy (Délka zprávy = 5)

bit 8	1	0	0	0	0
bit 0–7	Adresa	Délka zprávy	Kód funkce	CRC L	CRC H

Tabulka č. 9.3: Struktura 7 slov dlouhé zprávy (Délka zprávy = 7)

bit 8	1	0	0	0	0	0	0
bit 0–7	Adresa	Délka zprávy	Kód funkce	Data L	Data H	CRC L	CRC H

Struktury zpráv uvedené v tabulkách 9.2 a 9.3 platí jak pro zprávy odeslané řídicí jednotkou, tak pro odpovědi z jednotlivých modulů. Jediný rozdíl je pouze ve slově, které obsahuje adresu. Řídicí jednotka nastavuje při odesílání adresy bit 8 do log1, což je signál pro všechny moduly, aby adresu přečetly. Jako odpověď pak modul na začátku zprávy vysílá svou adresu, aby si mohla řídicí jednotka ověřit, že odpověď dorazila ze správného modulu. Při odpovídání již však modul nechává bit 8 na úrovni log0. Vzhledem k tomu, že odpověď je určena pouze řídicí jednotce, je zbytečné, aby adresu kontrolovaly ostatní moduly. Výchozí přiřazení jednotlivých adres je vypsáno v tabulce 9.4. Adresy jsou uloženy v paměti EEPROM každého modulu a na přání uživatele je možné adresování snadno změnit.

Tabulka č. 9.4: Adresování jednotlivých modulů

Adresa		Modul	Adresa		Modul
DEC	HEX		DEC	HEX	
0	0x00	Modul pro měření proudu	10	0x1A	Balancer pro článek 10
1	0x01	Balancer pro článek 1	11	0x1B	Balancer pro článek 11
2	0x02	Balancer pro článek 2	12	0x1C	Balancer pro článek 12
3	0x03	Balancer pro článek 3	13	0x1D	Balancer pro článek 13
4	0x04	Balancer pro článek 4	14	0x1E	Balancer pro článek 14
5	0x05	Balancer pro článek 5	15	0x1F	Balancer pro článek 15
6	0x06	Balancer pro článek 6	16	0x10	Balancer pro článek 16
7	0x07	Balancer pro článek 7	17	0x11	Modul pro odpojení baterie
8	0x08	Balancer pro článek 8	18	0x12	Nevyužito
9	0x09	Balancer pro článek 9	31	0x1F	Adresa pro všechny balancery

Poslední adresa 0x1F umožňuje odeslat data všem balancerům současně. Tato adresa je však možná pouze pro příkazy, které nevyžadují žádnou odpověď. Kódy všech dostupných příkazů jsou shrnuty v tabulkách 9.5, 9.6 a 9.7.

Tabulka č. 9.5: Modul pro měření proudu – přehled dostupných příkazů

Kód příkazu		Délka zprávy	Délka odpovědi	Popis příkazu	Jednotka
Dec	Hex				
0	0x00	5	7	Přečte aktuální hodnotu proudu	$A \times 100$
1	0x01	5	7	Přečte nastavenou hodnotu offsetu	-
2	0x02	5	0	Překalibruje hodnotu offsetu	-

Aktuální hodnota proudu je vrácena jako 16-bitové celé číslo se znaménkovým bitem. Změřit hodnotu offsetu si dokáže modul automaticky. Před spuštěním kalibrace (příkaz 0x02) je však nutné zajistit, aby baterií tekl nulový proud.

Tabulka č. 9.6: Modul pro balancování – přehled dostupných příkazů

Kód příkazu		Délka zprávy	Délka odpovědi	Popis příkazu	Jednotka
Dec	Hex				
0	0x00	5	0	Změří a uloží aktuální hodnotu napětí	mV
1	0x01	5	7	Přečte uloženou hodnotu napětí	mV
2	0x02	5	7	Přečte aktuální hodnotu napětí	mV
3	0x03	5	7	Přečte nastavené balancovací napětí	mV
4	0x04	7	0	Nastaví úroveň balancovací napětí	mV
5	0x05	5	7	Přečte aktuální teplotu	°C × 100

Příkaz pro uložení aktuální hodnoty napětí (0x00) je možné volat na společné adrese 0x1F. Měřenou hodnotu tak pořídí všechny balancery ve stejný čas. Změřené hodnoty je pak možné postupně vyčítat pomocí příkazu 0x01.

Příkaz pro nastavení balancovacího napětí je možné rovněž volat na společné adrese 0x1F a nastavit tak stejnou hodnotu napětí u všech balancerů pomocí jednoho příkazu.

Tabulka č. 9.7: Modul pro odpojení baterie – přehled dostupných příkazů

Kód příkazu		Délka zprávy	Délka odpovědi	Popis příkazu	Jednotka
Dec	Hex				
0	0x00	5	0	Odpojí baterii	-
1	0x01	5	0	Připojí baterii	-
2	0x02	5	7	Přečte úbytek napětí na spínači	mV
3	0x03	5	7	Přečte stav spínače 0 – Baterie připojena 1 – Probíhá měkký start 2 – Baterie odpojena 3 – Baterie odpojona, detekován zkrat	-

Modul pro odpojení baterie umožňuje mimo jiné i přečtení velikosti úbytku napětí na spínači. Při znalosti odporu spínače lze tak velmi hrubě odhadnout protékající proud. Jde však pouze o doplňující funkci a lze měřit pouze kladnou hodnotu úbytku, která je vyvolána proudem tekoucím směrem z baterie.

Pro kontrolu dat je využíván cyklicky redundantní součet, konkrétně algoritmus CRC-16/MODBUS. Komunikační protokol, který používá BMS, je protokolu Modbus velmi podobný. Tento protokol navíc využívá i mnoho běžně prodávaných fotovoltaických regulátorů. Proto byl zvolen i stejný klíč a postup výpočtu, jako v případě Modbus protokolu.

Příklady komunikace:

Přečtení měřené hodnoty z modulu pro měření proudu:

Zpráva z řídicí jednotky:

0x00, 0x05, 0x00, 0x72, 0x90

0x00 – Adresa zařízení 0

0x05 – Délka zprávy 5 slov

0x00 – Kód příkazu 0 = čtení aktuální hodnoty proudu

0x72 – CRC16 spodní byte

0x90 – CRC16 horní byte

Odpověď modulu:

0x00, 0x07, 0x00, 0xC4, 0x09, 0xB0, 0x76

0x00 – Adresa zařízení 0

0x05 – Délka zprávy 7 slov

0x00 – Kód příkazu 0 = čtení aktuální hodnoty proudu

0xC4 – Měřený proud spodní byte

0x09 – Měřený proud horní byte

0xB0 – CRC16 spodní byte

0x76 – CRC16 horní byte

Měřená hodnota proudu v příkladu činila $(0x9C4)_{16} = (2500)_{10} = + 25 \text{ A}$.

Nastavení balancovací napětí 3,6 V pro všechny balancery:

Zpráva z řídicí jednotky:

0x1F, 0x04, 0x07, 0x10, 0x0E, 0x45, 0xCD

0x00 – Adresa zařízení 1F = společná adresa pro všechny balancery

0x05 – Délka zprávy 7 slov

0x00 – Kód příkazu 4 = nastavení balancovacího napětí

0x10 – Balancovací napětí spodní byte

0x0E – Balancovací napětí horní byte

0x45 – CRC16 spodní byte

0xCD – CRC16 horní byte

Odpověď modulu:

-

Požadovaná hodnota 3,6 V = 3600 mV = $(3600)_{10} = (0xE10)_{16}$

9.1 Modul pro měření proudu

Hlavním úkolem tohoto modulu je měření proudu. K tomu je využíván proudový snímač ACS758. Analogový výstup snímače je měřen pomocí integrovaného 10 bitového AD převodníku. Dále je použita vnitřní reference o hodnotě $U_{REF} = 4,34$ V. Můžeme tak snadno vypočítat rozlišení AD převodníku:

$$U_{DIV1} = \frac{U_{REF}}{2^N} = \frac{4340}{2^{10}} = 4,24 \text{ mV} \quad (9.1)$$

Samotný AD převodník pak umožňuje rozlišení navýšit, pomocí průměrování více vzorků, které jsou pořízeny rychle za sebou v pseudonáhodných intervalech. Bylo zvoleno průměrování 8 vzorků, což by mělo teoreticky znamenat zvýšení rozlišení AD převodníku o 1,5 bitu, zdroj [25].

$$U_{DIV8} = \frac{U_{REF}}{2^N} = \frac{4340m}{2^{11,5}} = 1,5 \text{ mV} \quad (9.2)$$

To však pouze za předpokladu, že je při vzorkování splněn Nyquistův vzorkovací teorém, tedy že vzorkovací kmitočet bude větší, než dvojnásobek nejvyššího kmitočtu v měřeném signálu, tedy $f_{vz} > 2f_{max}$. Vzorkovací frekvence AD převodníku $f_{vz} = 5,2$ kHz. Pro splnění podmínky byl před vstup převodníku vložen RC filtr s hodnotami $R = 10$ k Ω a $C = 100$ nF, který tvoří dolní propust 1. řádu. Mezní kmitočet tohoto filtru vychází:

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10k \cdot 100n} = 160 \text{ Hz} \quad (9.3)$$

Z kapitoly 7 známe rozlišení jednotlivých variant proudových senzorů, můžeme tedy dopočítat rozlišení měření proudu.

$$I_{DIV,50A} = \frac{U_{DIV8}}{Res} = \frac{1,5m}{40m} = 37,5 \text{ mA} \quad (9.4)$$

Tabulka č. 9.8: Vypočítané rozlišení měření proudu pro jednotlivé varianty modulů

Rozsah senzoru [A]	±50 A	±100 A	±200 A
Rozlišení senzoru [mV/A]	40	20	10
Rozlišení ADC [mA]	37,5	75	150

Díky průměrování se tak povedlo dosáhnout výrazně lepšího rozlišení oproti odhadu z kapitoly 7. Ten počítal s rozlišením kolem 100 mA pro 50 A verzi.

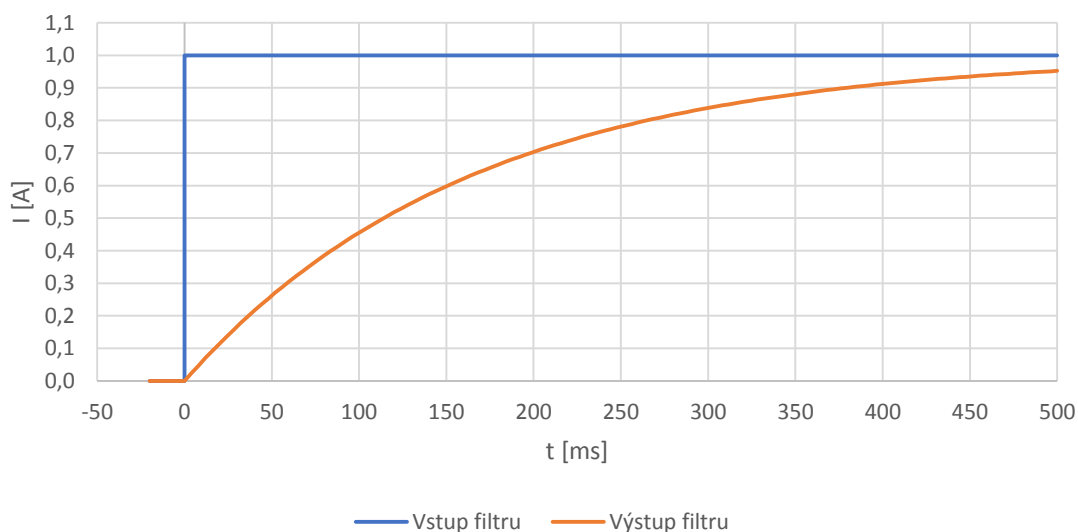
Testování ukázalo, že vstupní RC filtr je dostatečný pro zajištění správné funkce průměrování. Ukázalo se však, že už nestačí pro dostatečnou filtraci zvlnění proudů např. do DC/AC střídačů. Tyto střídače na svém výstupu vytváří síťové napětí 230V/50 Hz a jejich vstupní proud je značně zvlněný. Aby modul pro měření proudu vrátil stabilní hodnoty i při používání DC/AC střídačů, bylo nutné zařazení dalšího filtru.

Osazovat další filtr přímo na desku by bylo nepraktické. Nabízelo se proto řešení v podobě digitálního filtru, jehož vlastnosti bude možné v případě potřeby kdykoli do budoucna změnit. Byl zvolen jednoduchý IIR filtr, který lze matematicky vyjádřit jako:

$$y_n = ax_n + (1 - a)y_{n-1} \quad (9.5)$$

Zdroj: [26]

Hodnota koeficientu a byla zvolena experimentálně, $a = 0,976$, kdy perioda pořízení jednoho zprůměrovaného vzorku činí $T = 4$ ms. Při tomto nastavení již měřená hodnota kolísala i při maximální zátěži střídače ($I = 50$ A) jen v řádu stovek mA. V programu MS Excel byla dále vypočítána odezva filtru na jednotkový skok, pro lepší představu o době ustálení měřené hodnoty.



Obrázek č. 9.2: Odezva použitého digitálního filtru na jednotkový skok

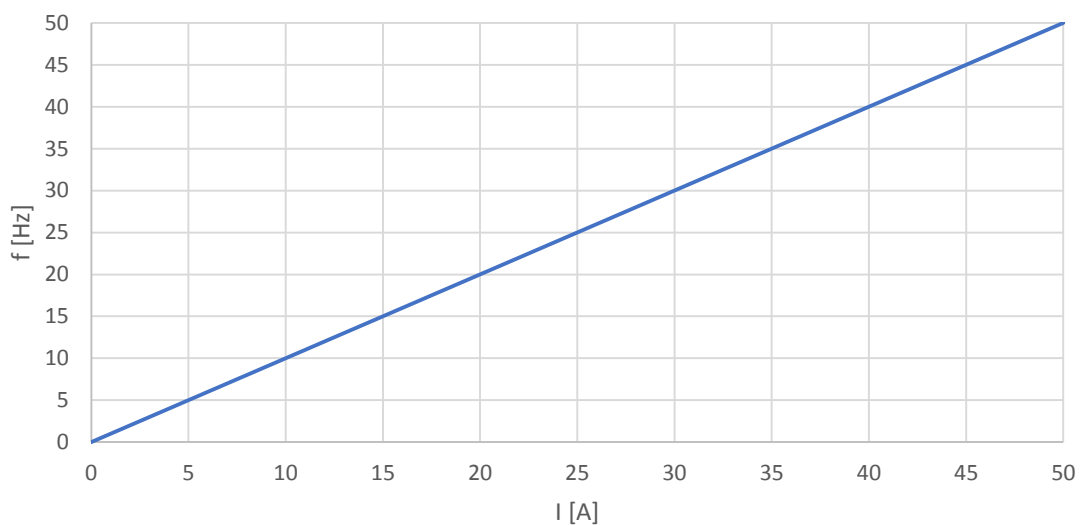
Pokud by byla doba ustálení příliš dlouhá, bylo by vhodnější zvolit filtr vyššího řádu. Graf však ukázal, že se výstup filtru ustálí za cca $t = 500$ ms, což je přijatelná hodnota.

Další funkcí programu je indikace procházejícího proudu pomocí LED diod. Proud tekoucí směrem do baterie je indikován blikáním červené LED diody, proud tekoucí směrem z baterie signalizuje blikání zelené LED.



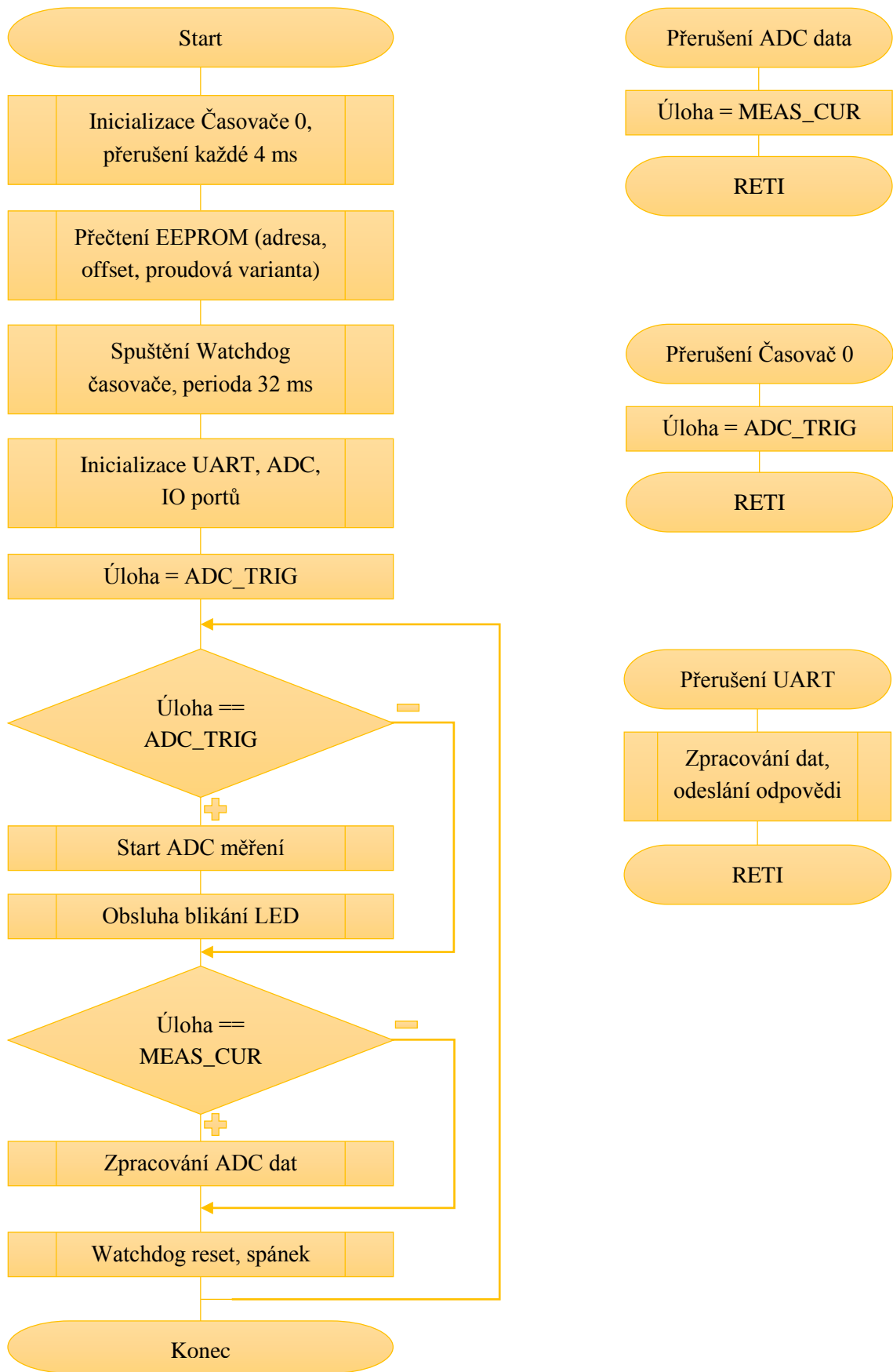
Obrázek č. 9.3: Signalizace nabíjení vlevo, signalizace vybíjení vpravo

Doba bliknutí LED diody je nastavena na $t_{on} = 8$ ms. Frekvence blikání je pak přímo úměrná velikosti protékajícího proudu. Při $I = 0$ A je frekvence blikání $f = 0$ Hz, obě LED jsou zhasnuté. Při I_{MAX} je frekvence blikání $f = 50$ Hz, což je frekvence, kdy už lidské oko vnímá blikání jako trvalý svit. Závislost frekvence na protékajícím proudu pro verzi do $I_{MAX} = 50$ A ukazuje obrázek 9.4.



Obrázek č. 9.4: Závislost frekvence blikání na protékajícím proudu pro $I_{MAX} = 50$ A

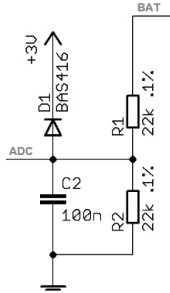
Výsledný průběh hlavního programu je zobrazen na vývojovém diagramu, který následuje na další straně.



Obrázek č. 9.5: Modul pro měření proudu – Vývojový diagram programu

9.2 Modul pro balancování

Modul pro balancování po většinu času pouze měří napětí a teplotu článku. Pro měření teploty je využíváno interního teplotního senzoru. Napětí článku je snímáno pomocí 10 bitového AD převodníku s použitím interní reference 2,5 V. Vstupní dělič pak umožňuje měření v rozsahu 0–5V.



Obrázek č. 9.6: Modul pro balancování – zapojení vstupního děliče

Rozlišení měření můžeme spočítat podobně jako v předchozí podkapitole, přidáme navíc akorát vliv děliče:

$$U_{DIV1} = \frac{R_1+R_2}{R_2} \cdot \frac{U_{REF}}{2^N} = \frac{22k+22k}{22k} \cdot \frac{2500m}{2^{10}} = 2 \cdot \frac{2500m}{2^{10}} = 4,88 \text{ mV} \quad (9.5)$$

Rozlišení je dále navýšeno průměrováním, které by mělo teoreticky zvedat rozlišení stejně jako v případě proudového modulu na 11,5 bitů:

$$U_{DIV8} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot \frac{U_{REF}}{2^N} = \frac{22k+22k}{22k} \cdot \frac{2500m}{2^{11,5}} = 0,5 \cdot \frac{2500m}{2^{11,5}} = 1,72 \text{ mV} \quad (9.6)$$

Pro potlačení rušivých kmitočtů je na vstupu filtr typu dolní propust. Impedance celého děliče je tvořena paralelní kombinací rezistorů R_1 a R_2 a tvoří tedy $R = 11 \text{ k}\Omega$. Mezní kmitočet tak vychází:

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 11k \cdot 100n} = 145 \text{ Hz} \quad (9.7)$$

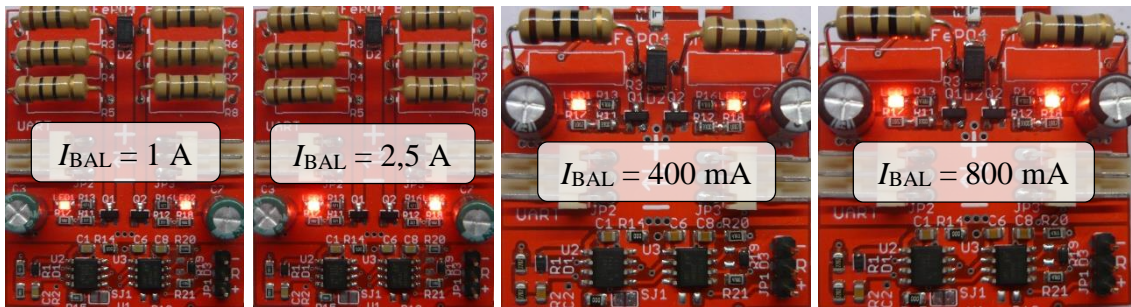
Za tímto analogovým filtrem je zařazen stejný digitální filtr, jako byl použitý u proudového modulu.

Regulace balancovacího proudu je prováděna pomocí PWM modulace s 8 bitovým rozlišením. Od toho se pak odvíjí rozlišení regulace pro jednotlivé varianty. Maximální balancovací proud pro variantu S byl v předchozí kapitole vypočítán jako $I_{BAL,S} = 0,84 \text{ A}$, a pro variantu M $I_{BAL,M} = 2,5 \text{ A}$

$$I_{BAL,S,DIV} = \frac{I_{BAL,S}}{2^N} = \frac{840m}{2^8} = 3,28 \text{ mA} \quad (9.8)$$

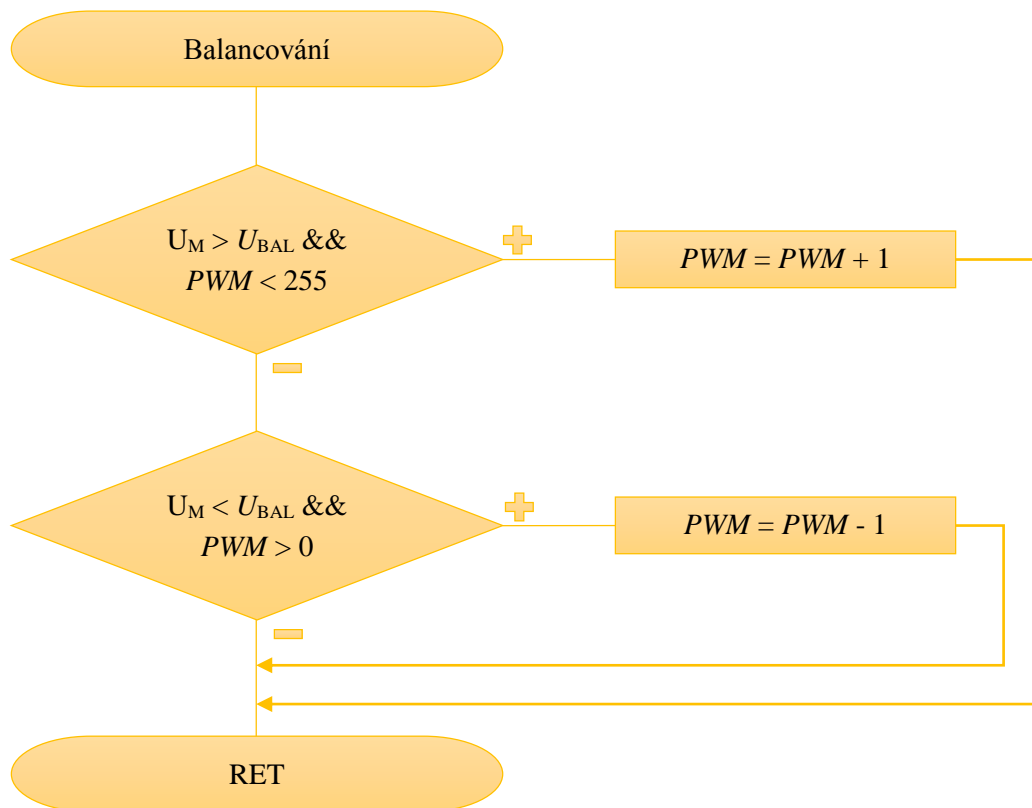
$$I_{BAL,M,DIV} = \frac{I_{BAL,M}}{2^N} = \frac{2500m}{2^8} = 9,76 \text{ mA} \quad (9.9)$$

Probíhající balancování je indikován dvojicí červených LED. Tyto diody jsou buzeny stejným PWM signálem, jako výkonové tranzistory pro spínání odporové zátěže. Jas LED je tak přímo úměrný balancovacímu proudu.

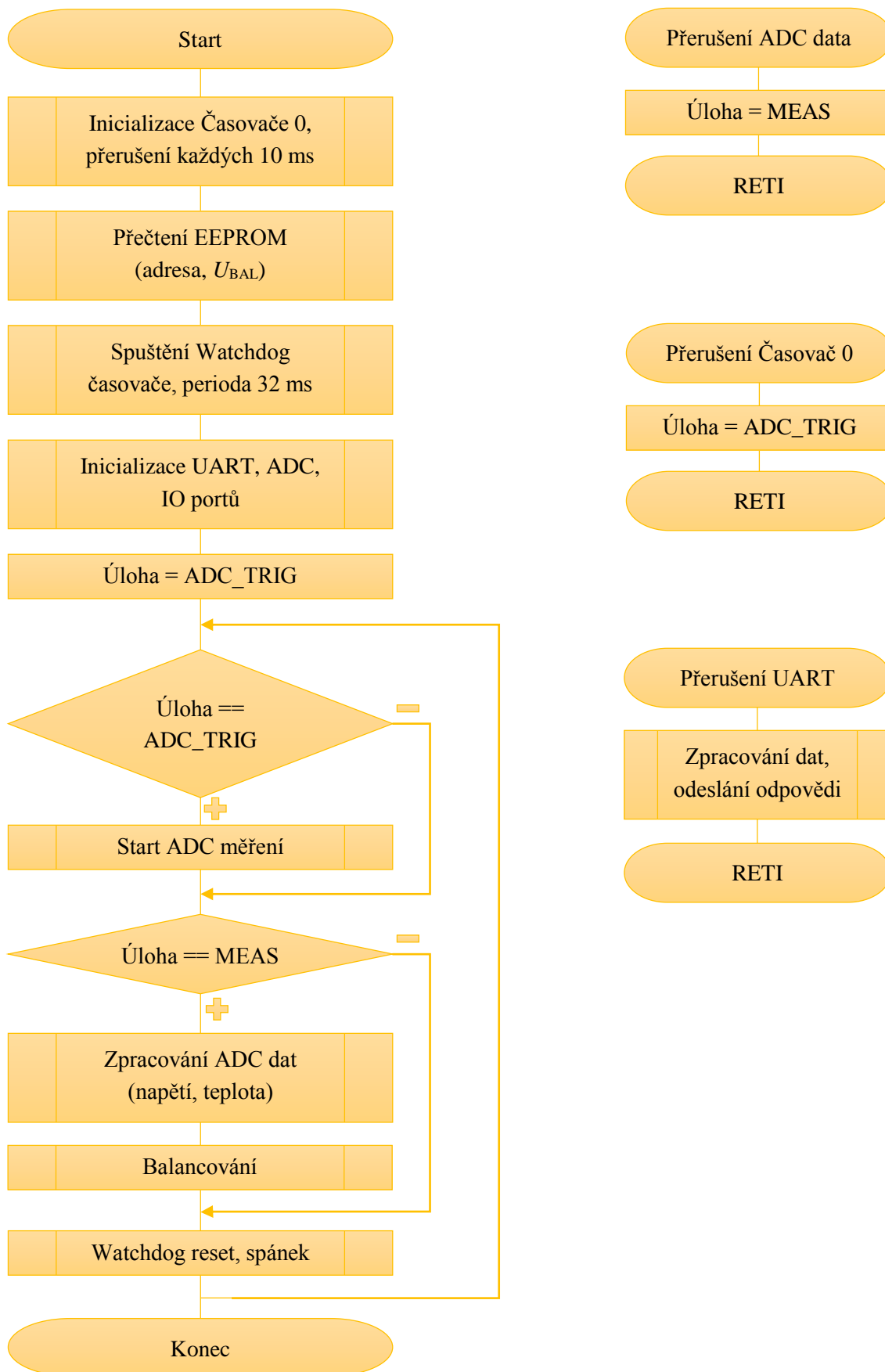


Obrázek č. 9.7: Indikace balancování, zleva velikost M, S

Algoritmus pro řízení balancování je velmi jednoduchý. Pokud měřená hodnota napětí U_M přesáhne nastavené maximum U_{BAL} , zvedne se v každém cyklu hodnota PWM registru o jeden krok, což znamená zvýšení balancovacího proudu o hodnotu $I_{BAL, DIV}$. Hodnota tohoto registru se pohybuje v rozsahu 0–255. Jakmile začne napětí klesat, dochází stejným způsobem ke snižování proudu. Názorně je tento algoritmus naznačen na obrázku 9.8. Následující obrázek 9.9 pak ukazuje průběh celého programu.



Obrázek č. 9.8: Modul pro balancování – vývojový diagram balancovací funkce



Obrázek č. 9.9: Modul pro balancování – Vývojový diagram programu

9.3 Modul pro odpojení baterie

Modul pro odpojení baterie měří neustále úbytek napětí mezi vstupem a výstupem. Tato hodnota je důležitá zejména během měkkého startu. V ostatních případech slouží jen jako dodatečná informace o tom, že zařízení pracuje správně. Vstupní dělič umožňuje s použitím reference $U_{REF1} = 4,34 \text{ V}$ měření až do hodnoty $U_{DROP,MAX1} = 69,4 \text{ V}$. Po sepnutí spínače, kdy jsou očekávány hodnoty napětí kolem nuly, se přepíná velikost referenčního napětí na $U_{REF2} = 0,55 \text{ V}$, což omezuje měření do hodnoty $U_{DROP,MAX2} = 8,8 \text{ V}$. Rozlišení AD převodníku bylo pomocí průměrování stejně jako u ostatních modulů rozšířeno na teoretických 11,5 bitů.

Pro první rozsah tak vychází rozlišení měření úbytku napětí na:

$$U_{DIV1,8} = \frac{R_{16}+R_{17}}{R_{17}} \cdot \frac{U_{REF1}}{2^N} = \frac{150k+10k}{10k} \cdot \frac{4340m}{2^{11,5}} = 16 \cdot \frac{4340m}{2^{11,5}} = \mathbf{24 \text{ mV}} \quad (9.10)$$

Rozlišení pro druhý rozsah:

$$U_{DIV1,8} = \frac{R_{16}+R_{17}}{R_{17}} \cdot \frac{U_{REF1}}{2^N} = \frac{150k+10k}{10k} \cdot \frac{550m}{2^{11,5}} = 16 \cdot \frac{550m}{2^{11,5}} = \mathbf{3 \text{ mV}} \quad (9.11)$$

Pro potlačení rušivých kmitočtů je na vstupu filtr typu dolní propust. Impedance celého děliče je tvořena paralelní kombinací rezistorů R_{16} a R_{17} a tvoří tedy $R = 9,4 \text{ k}\Omega$. Mezní kmitočet tak vychází:

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 9,4k \cdot 100n} = \mathbf{169 \text{ Hz}} \quad (9.12)$$

Za analogovým filtrem již není zařazen žádný další digitální filtr jako je tomu u proudového modulu a balanceru, protože tento modul měří rychlejší děje.

Při startu je zátěž připojena přes startovací rezistor $R_S = 1 \Omega$. Spínač je dimenzovaný pro spínání kapacitní zátěže o velikosti maximální $C_{L,MAX} = 20 \text{ mF}$. Z toho vyplývá, že časová konstanta R_S a C_L může být maximální $RC_{MAX} = 20 \text{ ms}$. Okamžitá hodnota úbytku napětí u_{DROP} na startovacím rezistoru bude dána rovnicí:

$$u_R(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (9.13)$$

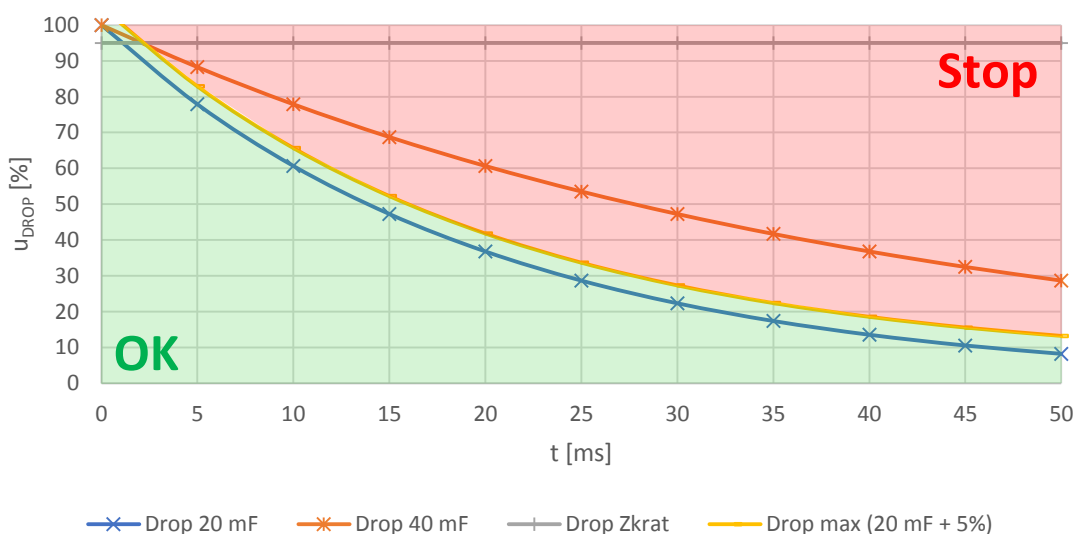
Po sepnutí startovacího rezistoru je každých 5 ms kontrolována hodnota úbytku napětí. Pokud je měřená hodnota nižší, než maximální očekávaná hodnota, měkký start pokračuje. Pokud je naměřená hodnota vyšší, může to znamenat buď zkrat na výstupu, nebo příliš velkou kapacitní zátěž. V takovém případě je start okamžitě ukončen.

V tabulce níže jsou vypsány očekávané hodnoty napětí pro různé situace, poslední sloupec je pak limit, při jehož překročení dojde k zastavení spínání. Hodnoty mimo limit, jsou označeny červeným písmem, hodnoty v limitu pak písmem zeleným.

Tabulka č. 9.9: Hodnoty úbytku na R_S při startu

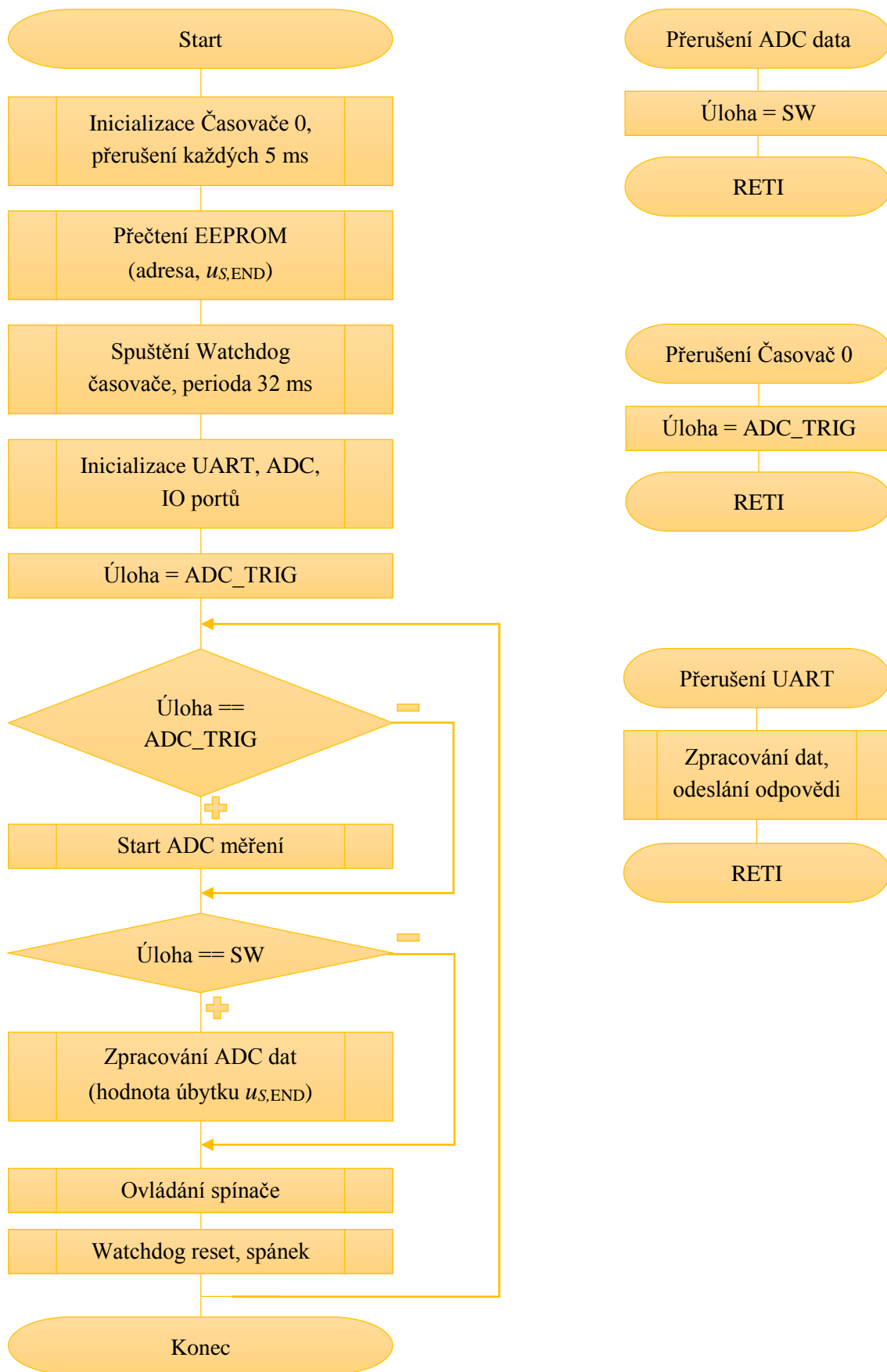
t [ms]	$u_{20\text{ mF}}$ [%]	$u_{40\text{ mF}}$ [%]	u_{ZKRAT} [%]	$u_{\text{MAX (20 mF + 5%)}}$ [%]
0	100	100	95	105
5	78	88	95	83
10	61	78	95	66
15	47	69	95	52
20	37	61	95	42
25	29	54	95	34
30	22	47	95	27
35	17	42	95	22
40	14	37	95	19
45	11	32	95	16
50	8	29	95	13

Následující graf pak představuje grafické znázornění tabulky. Platí, že jakmile se měřená hodnota dostane do červeného pole, spínání je ukončeno.



Obrázek č. 9.10: Hodnoty úbytku na R_S při startu

Z tabulky a grafu je patrné, že pokud dojde k přetížení výstupu, spínání by mělo být ukončeno již během prvních 5 ms. Pokud je průběh spínání v pořádku a absolutní hodnota úbytku na rezistoru klesne pod $u_{S,END} = 10$ V, dochází k sepnutí hlavního spínače. Hodnota $u_{S,END}$ je vypálena v paměti EEPROM a je možné ji na přání uživatele snadno změnit bez zásahu do hlavního programu. Celý průběh programu zobrazuje vývojový diagram na následující straně.



Obrázek č. 9.11: Modul pro odpojení baterie – Vývojový diagram programu

10. OVĚŘENÍ FUNKCE

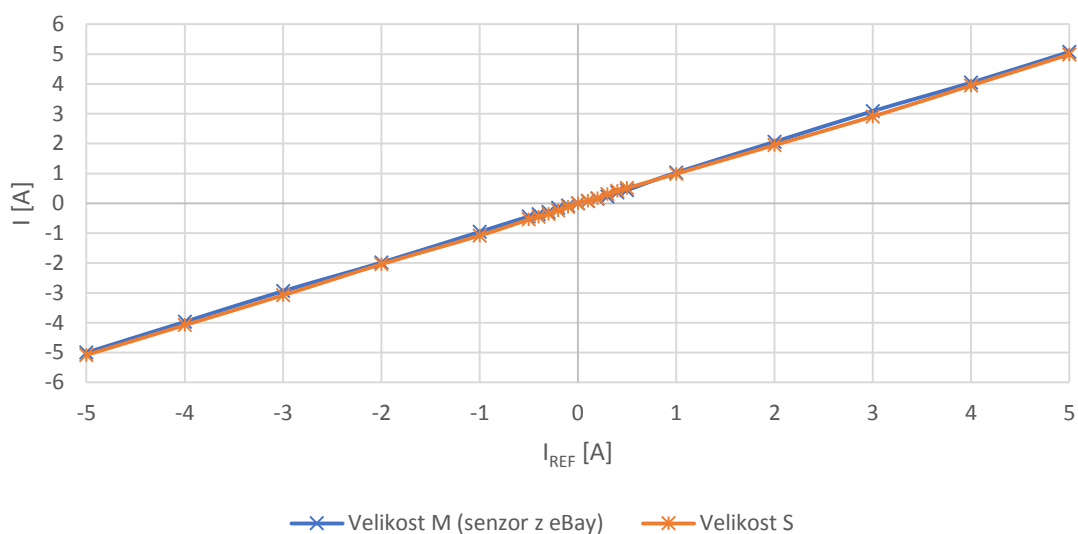
Cílem této kapitoly je ověření parametrů jednotlivých modulů. Součástí jsou i testy pro zkoušku, zda jsou moduly schopny dlouhodobého provozu při maximálním zatížení.

10.1 Modul pro měření proudu

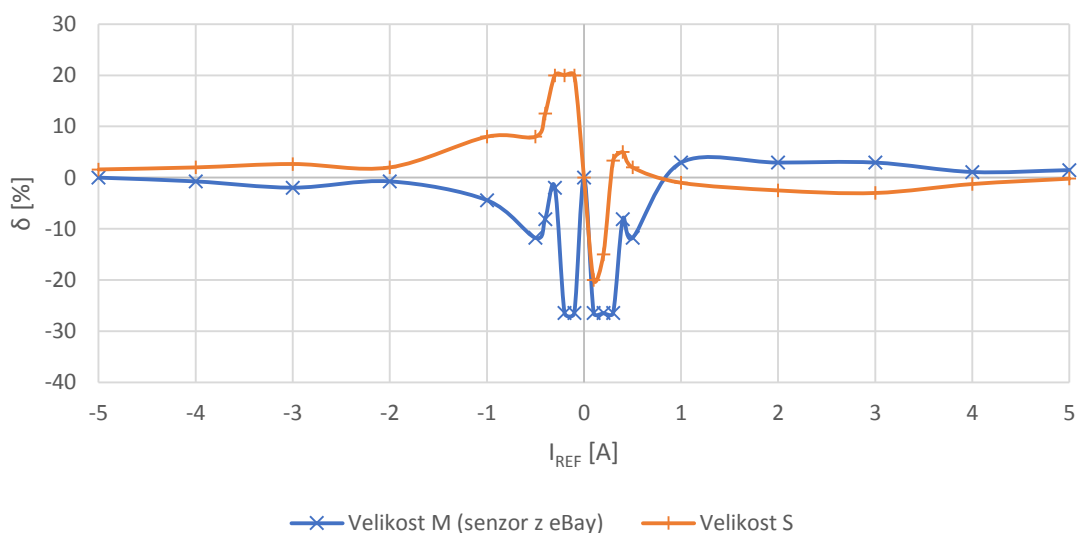
V první části byla ověřena přesnost měření malých proudů, kde byla očekávána největší chyba. Měření bylo provedeno pro rozsah proudů ± 5 A. Jako referenční proudový zdroj byl použit laboratorní zdroj Korad KA300P, který dle specifikace dosahuje přesnosti měření proudu $\pm 0,1$ % [24]. Hodnoty měřené proudovým senzorem modul odesílal po UART sběrnici přímo do PC. Při měření se ukázalo, že bude nutné upravit převodní konstanty pro senzor z portálu eBay. Citlivost senzoru z oficiální distribuce (osazený na modulu o velikosti S) odpovídala hodnotě $AU_S = 40 \text{ mV/A}$, kterou udává katalogový list. Senzor z portálu eBay (osazený na modulu o velikosti M) měl však citlivost pouhých $AU_M = 13,6 \text{ mV/A}$. Po změně konstant a úpravě citlivosti AD převodníku pro zachování rozlišení začalo měření obou senzorů odpovídat reálným hodnotám.

Tabulka č. 10.1: Měřené hodnoty proudových senzorů a vypočítaná relativní chyba

I_{REF} [A]	$I_{M(eBay)}$ [A]	I_S [A]	$\delta_{M(eBay)}$ [%]	δ_S [%]
-5,00	-5,00	-5,08	0,0	1,6
-4,00	-3,97	-4,08	-0,7	2,0
-3,00	-2,94	-3,08	-2,0	2,7
-2,00	-1,99	-2,04	-0,7	2,0
-1,00	-0,96	-1,08	-4,4	8,0
-0,50	-0,44	-0,54	-11,8	8,0
-0,40	-0,37	-0,45	-8,1	12,5
-0,30	-0,29	-0,36	-2,0	20,0
-0,20	-0,15	-0,24	-26,5	20,0
-0,10	-0,07	-0,12	-26,5	20,0
0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
0,10	0,07	0,08	-26,5	-20,0
0,20	0,15	0,17	-26,5	-15,0
0,30	0,22	0,31	-26,5	3,3
0,40	0,37	0,42	-8,1	5,0
0,50	0,44	0,51	-11,8	2,0
1,00	1,03	0,99	2,9	-1,0
2,00	2,06	1,95	2,9	-2,5
3,00	3,09	2,91	2,9	-3,0
4,00	4,04	3,95	1,1	-1,3
5,00	5,07	4,99	1,5	-0,2



Obrázek č. 10.1: Převodní charakteristika proudových modulů



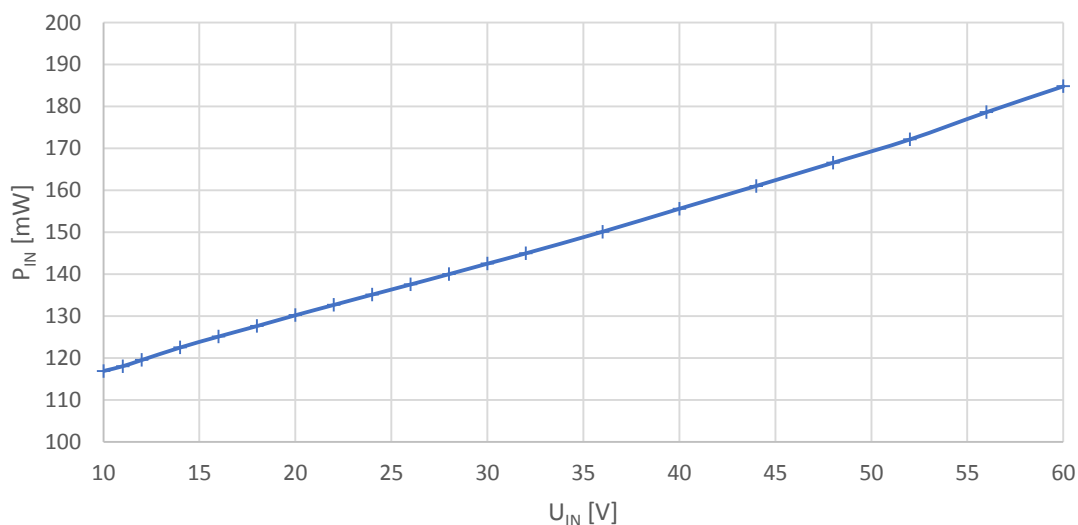
Obrázek č. 10.2: Relativní chyba měření proudových modulů

Z měření je patrné, že největší chyby se moduly dopouští při měření malých proudů pod $I < 1$ A, kde relativní chyba měření přesahuje hodnotu $\delta > 20$ %. S rostoucím proudem pak velikost relativní chyby ztlačně klesá. Při proudu $I = 5$ A už se chyba pohybovala kolem hodnoty $\delta \approx 1$ %. Proudový senzor z portálu eBay vykazoval oproti senzoru z oficiální distribuce srovnatelné chyby měření. Zdá se tedy, že s korekcí citlivosti bude i tento senzor možné použít.

Dále byla změřena klidová spotřeba proudového modulu v celém rozsahu napájecího napětí 10–60 V. Pro dosažení požadované velikosti napětí bylo použito zapojení dvou laboratorních zdrojů v sérii. Byly použity laboratorní zdroje Korad KA300P a zdroj DPS5020. Hodnoty napětí byly odečteny přímo z laboratorních zdrojů. Hodnoty proudu byly měřeny pomocí multimetru MASTECH MS8268.

Tabulka č. 10.2: Naměřené hodnoty klidové spotřeby proudového modulu

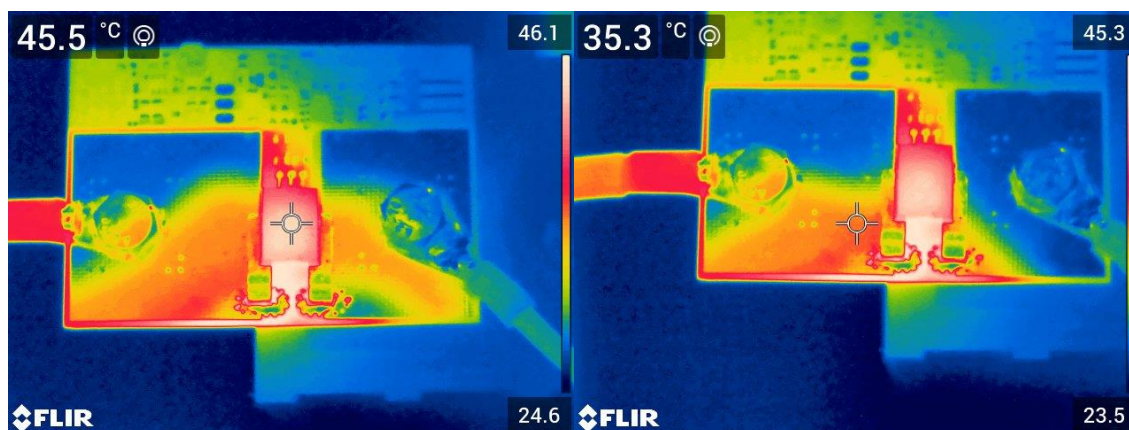
U_{IN} [V]	I_{IN} [mA]	P_{IN} [mW]	U_{IN} [V]	I_{IN} [mA]	P_{IN} [mW]
10	11,69	117	28	5,00	140
11	10,73	118	30	4,75	143
12	9,96	120	32	4,53	145
14	8,75	123	36	4,17	150
16	7,82	125	40	3,89	156
18	7,09	128	44	3,66	161
20	6,51	130	48	3,47	167
22	6,03	133	52	3,31	172
24	5,63	135	56	3,19	179
26	5,29	138	60	3,08	185



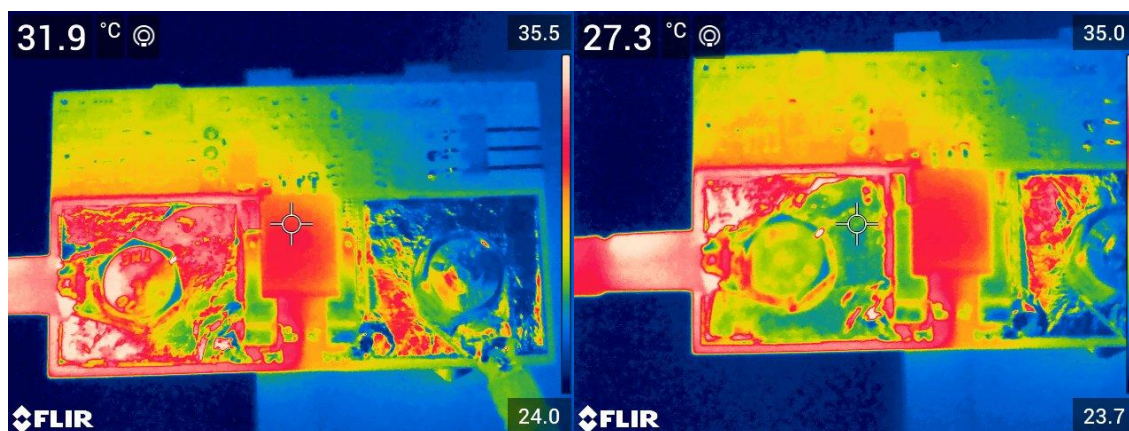
Obrázek č. 10.3: Závislost klidové spotřeby proudového modulu na napájecím napětí

Měřené hodnoty ukazují, že spínanému zdroji, který zajišťuje stabilní napájecí napětí pro řídicí elektroniku modulu, s rostoucím vstupním napětím klesá účinnost a spotřeba tak mírně narůstá. Pro maximální napájecí napětí $U_{IN} = 60$ V byla naměřena hodnota spotřeby $P_{IN} = 185$ mW, což odpovídá odhadu z kapitoly 7.1, kde byla hodnota spotřeby odhadována jako $P_{IN} < 200$ mW.

V další části měření byl zkoumán ohřev modulů při maximálním proudu $I = 50$ A. Jako zdroj byl použit LiFePO_4 článek o kapacitě 60 Ah. Protékající proud $I = 50$ A byl nastaven elektronickou zátěží typu Agilent N3300A. Byl ponechán čas pro ustálení teploty $T = 10$ min. Následně byly pořízeny snímky modulů pomocí termokamery Flir E96 na teplotním rozsahu -20 – 120 °C. Pokojová teplota v době měření činila $\vartheta_A = 26$ °C.



Obrázek č. 10.4: Měření ohřevu proudového modulu velikosti M při $I = 50$ A



Obrázek č. 10.5: Měření ohřevu proudového modulu velikosti S při $I = 50$ A

Měření termokamerou ukázalo, že u proudového modulu bez posilující fólie dochází skutečně k vyššímu ohřevu oproti modulu s posilující fólií. Na snímku 10.4 je vidět horké místo přímo na proudovém senzoru o teplotě kolem 45 °C a dále v oblasti pod senzorem. V tomto místě vedou výkonové spoje ze spodní strany DPS. Teplo z těchto spojů se pak pravděpodobně přenáší do samotného senzoru. Teplota odmaskovaných spojů je bohužel jenom orientační, protože jde o lesklý povrch. Pro přesné měření by bylo nutné tyto povrchy začernit.

Teploty u modulu S, který byl posílen měděnou fólií, nepřekročily hodnotu 32 °C. Měděná fólie tedy snížila velikost ohřevu o cca 13 °C. Pro proudy do 50 A bude bez problému použitelná i verze bez posílení spojů. Vliv na ohřev mohou mít i parametry samotného proudového senzoru. Ty by však měly být srovnatelné, přestože je senzor na modulu M z neoficiální distribuce. Odpor senzoru je dán pouze průřezem, délkou a materiálem použitého vodiče. Kusy z neoficiální distribuce mohou mít nějaký defekt na samotném čipu, ale dá se předpokládat, že vyrobí vodič o definovaném průřezu a délce se podaří vždy.

Po dokončení měření ohřevu byla u obou kusů změřena velikost offsetu. Oba senzory byly delší dobu vystaveny působení maximální velikosti proudu jedním směrem, dalo by se tedy předpokládat, že dojde k částečnému zmagnetování vodiče. Tato skutečnost se bohužel potvrdila a u obou kusů byl naměřen offset kolem $I_{OFS} = 200 \text{ mA}$. Po krátkém proudovém pulzu o velikosti $I = -50 \text{ A}$ byla hodnota offsetu zpět na nulové hodnotě. Při provozu ve fotovoltaické elektrárně, kde jsou baterie chvíli vybíjeny a chvíli nabíjeny by tak problém s offsetem nemusel být příliš výrazný. Pokud by však z nějakých důvodů zůstala velikost offsetu delší dobu na hodnotě $I_{OFS} = 200 \text{ mA}$, znamenalo by to chybu v měření náboje baterie o velikosti:

$$\Delta Q = I_{OFS} \cdot t = 0,2 \cdot 24 = 4,8 \text{ Ah/den} \quad (9.14)$$

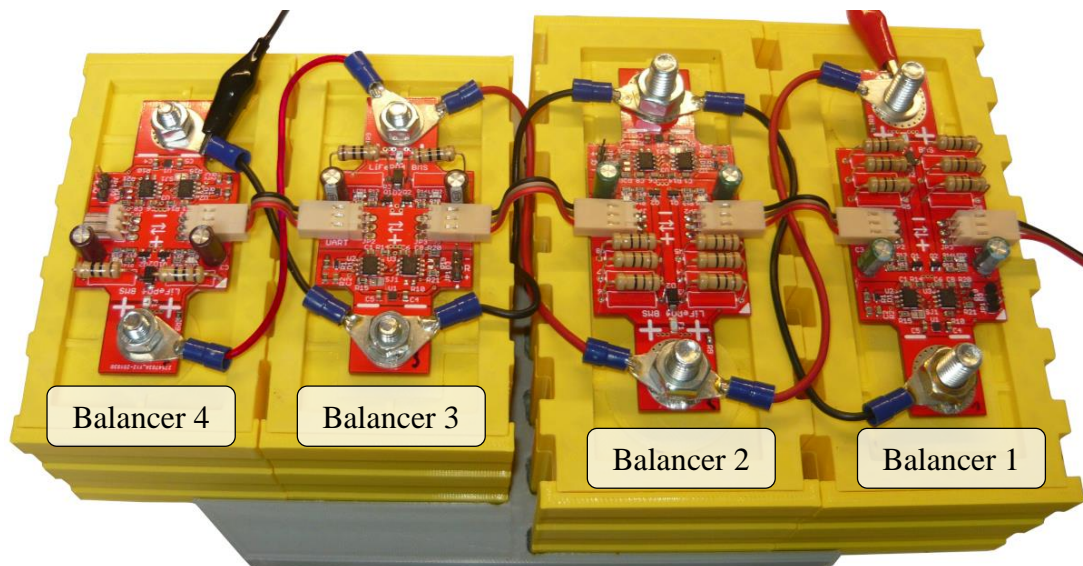
Hodnota $\Delta Q = 4,8 \text{ Ah/den}$ je poměrně vysoká, ale jak už bylo zmíněno, jde o teoreticky nevyšší možnou hodnotu. Jaká bude reálná velikost chyby způsobené offsetem, ukáže až dlouhodobé testování v reálném provozu.

Použité měřicí přístroje:

Laboratorní zdroj	Korad KA300P
Laboratorní zdroj	DPS5020
Miliampérmetr	MASTECH MS8268
Elektronická zátěž	Agilent N3300A
Termokamera	FLIR E96

10.2 Modul pro balancování

Pro ověření funkce balancovacích modulů byly osazeny 4 testovací kusy, z toho 2 ks velikosti S a 2 ks velikosti M. Jednotlivé kusy byly označeny čísly 1–4. Pro snadnou manipulaci byl na 3D tiskárně vytištěn model baterie, složené z článků typu Winston 100 Ah a 60 Ah.

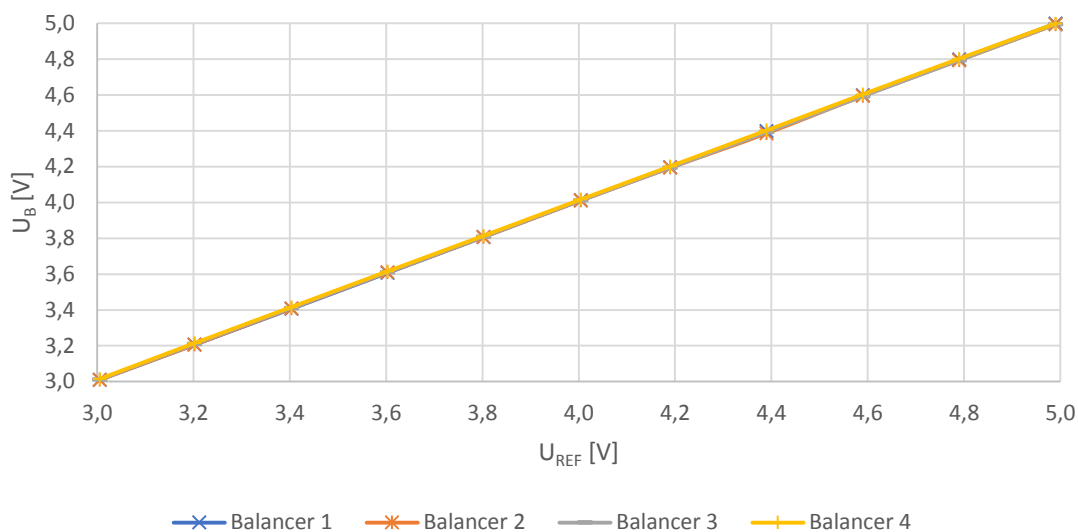


Obrázek č. 10.6: Testovací sestava pro měření balancerů

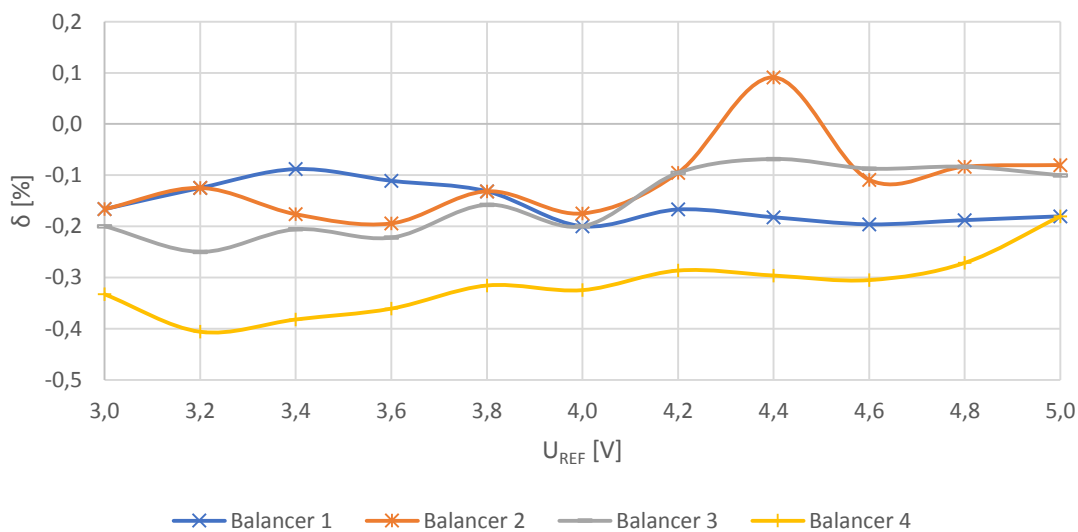
Základním požadavkem pro přesné balancování je přesné měření napětí. V první části měření byly všechny balancery propojeny paralelně, dále byla vypnuta funkce balancování, aby nedocházelo k ovlivnění měření vlivem úbytku na vodičích. Na všechny balancery přivedeno napětí z laboratorního zdroje Korad. Přesná hodnota výstupního napětí byla přeměřována multimetrem MASTECH. Změřené hodnoty byly zapsány do tabulky a byla vypočítána relativní odchylka od hodnoty odečtené z multimetru.

Tabulka č. 10.3: Měření napětí balancerů a vypočítaná relativní odchylka

U_Z [V]	U_{REF} [V]	U_{B1} [V]	U_{B2} [V]	U_{B3} [V]	U_{B4} [V]	δ_{B1} [%]	δ_{B2} [%]	δ_{B3} [%]	δ_{B4} [%]
3,00	3,005	3,010	3,010	3,011	3,015	-0,166	-0,166	-0,200	-0,333
3,20	3,202	3,206	3,206	3,210	3,215	-0,125	-0,125	-0,250	-0,406
3,40	3,403	3,406	3,409	3,410	3,416	-0,088	-0,176	-0,206	-0,382
3,60	3,603	3,607	3,610	3,611	3,616	-0,111	-0,194	-0,222	-0,361
3,80	3,802	3,807	3,807	3,808	3,814	-0,132	-0,132	-0,158	-0,316
4,00	4,004	4,012	4,011	4,012	4,017	-0,200	-0,175	-0,200	-0,325
4,20	4,19	4,197	4,194	4,194	4,202	-0,167	-0,095	-0,095	-0,286
4,40	4,39	4,398	4,386	4,393	4,403	-0,182	0,091	-0,068	-0,296
4,60	4,59	4,599	4,595	4,594	4,604	-0,196	-0,109	-0,087	-0,305
4,80	4,79	4,799	4,794	4,794	4,803	-0,188	-0,084	-0,084	-0,271
5,00	4,99	4,999	4,994	4,995	4,999	-0,180	-0,080	-0,100	-0,180



Obrázek č. 10.7: Převodní charakteristika balancovacích modulů



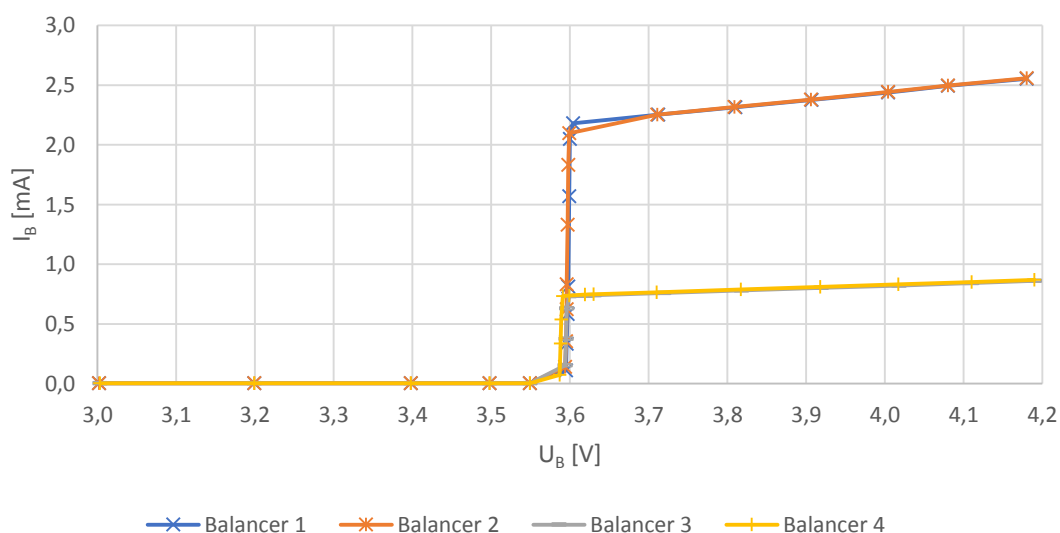
Obrázek č. 10.8: Relativní chyba měření balancovacích modulů

Naměřené charakteristiky ukazují, že jednotlivé moduly nevykazují oproti měření multimetrem větší odchylku než $\delta < \pm 0,5 \%$. Rozdíly mezi jednotlivými moduly jsou pak ještě menší. Největší odchylku vykazoval balancer s označením 4, který oproti ostatním modulům měřil o cca 0,1 % nižší hodnoty. Pro měření napětí článků by však měla být dosažená přesnost naprosto dostačující.

Dále bylo na všech balancerech nastaveno balancovací napětí $U_{BAL} = 3,6 \text{ V}$ pro změření VA charakteristiky při balancování. Při tomto měření byl zapojen vždy každý balancer zvlášť a napětí bylo měřeno multimetrem přímo na svorkách měřeného balanceru, proud byl odečítán z laboratorního zdroje.

Tabulka č. 10.4: Měření VA charakteristiky balancerů

$U_{B1} \text{ [V]}$	$I_{B1} \text{ [A]}$	$U_{B2} \text{ [V]}$	$I_{B2} \text{ [A]}$	$U_{B3} \text{ [V]}$	$I_{B3} \text{ [A]}$	$U_{B4} \text{ [V]}$	$I_{B4} \text{ [A]}$
3,002	0,003	3,002	0,003	3,003	0,003	3,003	0,003
3,199	0,003	3,199	0,003	3,199	0,003	3,199	0,003
3,398	0,003	3,398	0,003	3,398	0,003	3,398	0,003
3,498	0,003	3,498	0,003	3,498	0,003	3,498	0,003
3,549	0,003	3,549	0,003	3,549	0,003	3,549	0,003
3,595	0,111	3,594	0,140	3,594	0,153	3,587	0,073
3,596	0,333	3,595	0,354	3,595	0,377	3,588	0,336
3,597	0,583	3,596	0,622	3,596	0,632	3,589	0,537
3,598	0,812	3,596	0,831	3,599	0,732	3,591	0,732
3,599	1,570	3,597	1,330	3,611	0,735	3,599	0,738
3,600	2,050	3,598	1,833	3,620	0,736	3,619	0,745
3,604	2,181	3,599	2,098	3,631	0,740	3,630	0,750
3,712	2,253	3,711	2,253	3,719	0,759	3,710	0,766
3,810	2,315	3,809	2,317	3,818	0,781	3,817	0,789
3,907	2,375	3,906	2,379	3,919	0,802	3,918	0,810
4,004	2,439	4,004	2,444	4,018	0,821	4,017	0,831
4,080	2,493	4,080	2,496	4,110	0,843	4,110	0,852
4,180	2,553	4,180	2,558	4,190	0,861	4,190	0,870



Obrázek č. 10.9: Změřená VA charakteristika balancerů

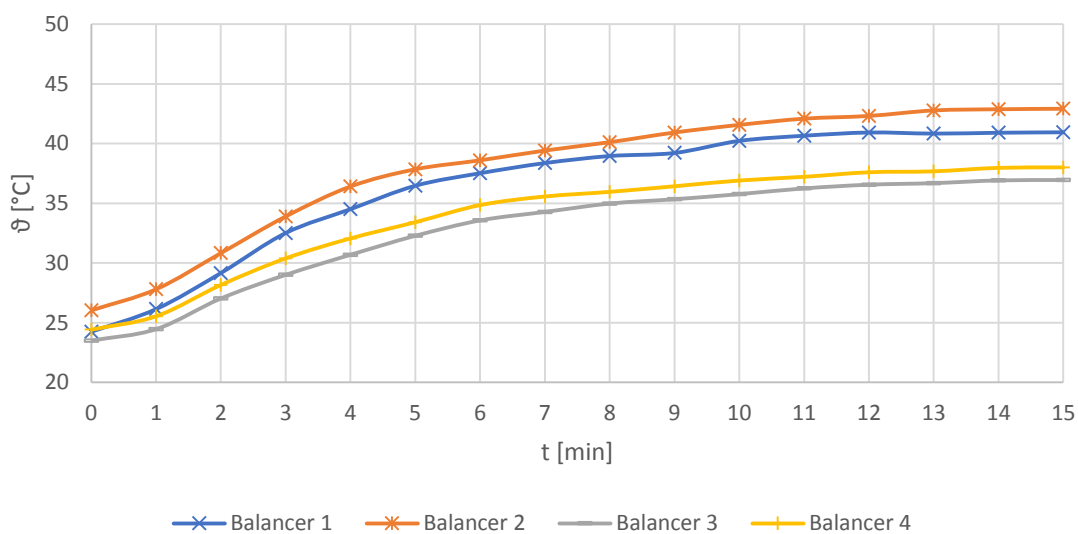
Cílem návrhu bylo dosažení charakteristiky, která se bude blížit charakteristice ideální zenerovy diody, tedy aby balancovací napětí nebylo závislé na velikosti balancovacího proudu. Maximální hodnoty balancovacího proudu dosáhly všechny balancery prakticky přesně při požadované hodnotě $U_{BAL} = 3,6V$. Naměřený rozdíl napětí mezi minimálním a maximálním balancovacím proudem činil kolem 10 mV, což se dá považovat za poměrně slušný výsledek. Pro balancery 1,2 o velikosti M bylo dosaženo maximálního balancovacího proudu $I_{B,MAX,12} = 2,55 A$. Pro moduly 3,4 o velikosti S pak tato hodnota činila $I_{B,MAX,34} = 0,86 A$.

Při balancování maximálním proudem vzniká na výkonových rezistorech značné množství tepla. Řídící mikroprocesor, který obsahuje i teplotní senzor pro měření teploty článků, je umístěn na stejné desce plošných spojů. Přestože byl mikroprocesor umístěn od výkonových rezistorů poměrně daleko, ukázalo se, že měření teploty bude ovlivněno i teplem vznikajícím při balancování.

Pro měření tohoto vlivu byly všechny balancery ponechány vychladnout na pokojovou teplotu, následně byly opět propojeny paralelně a nastavena byla maximální hodnota balancovacího proudu. Po dobu 15 minut pak byla každou minutu odečítána naměřená teplota.

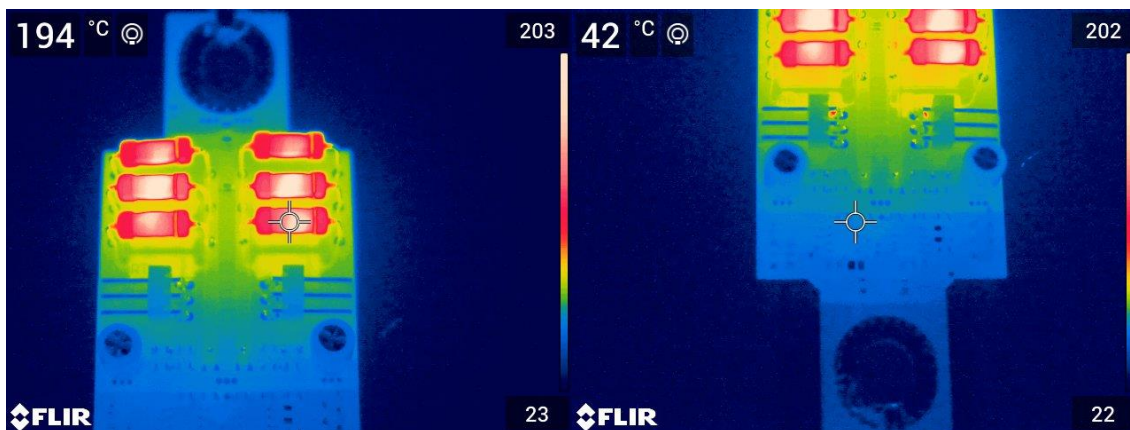
Tabulka č. 10.5: Měření vlastního ohřevu balancerů při $I_{BAL,MAX}$

t [min]	ϑ_{B1} [°C]	ϑ_{B2} [°C]	ϑ_{B3} [°C]	ϑ_{B4} [°C]
0	24,24	26,03	23,50	24,42
1	26,14	27,80	24,46	25,54
2	29,16	30,83	27,03	28,16
3	32,51	33,90	29,01	30,39
4	34,51	36,41	30,69	32,06
5	36,47	37,85	32,28	33,42
6	37,52	38,60	33,57	34,85
7	38,37	39,42	34,28	35,57
8	38,96	40,12	34,98	35,96
9	39,22	40,93	35,34	36,43
10	40,23	41,57	35,77	36,91
11	40,66	42,09	36,25	37,22
12	40,93	42,32	36,56	37,60
13	40,84	42,78	36,69	37,68
14	40,91	42,88	36,92	37,97
15	40,95	42,92	36,95	38,01

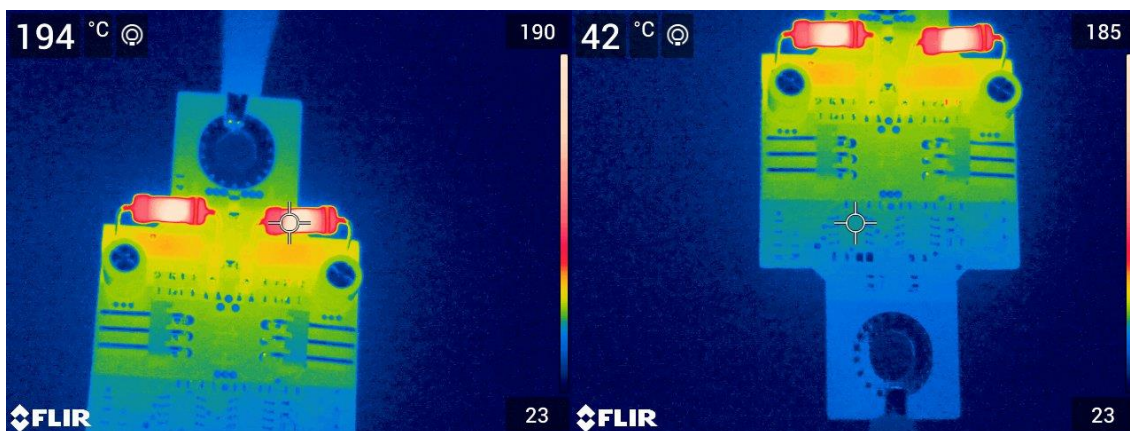


Obrázek č. 10.10: Průběh vlastního ohřevu balancerů při $I_{BAL,MAX}$

U modulu 2 a 4 pak byly pořízeny snímky termokamerou, zobrazující ohřev celé desky plošných spojů. Použitý rozsah byl 0–650 °C.



Obrázek č. 10.11: Měření ohřevu balancovacího modulu č. 2 velikosti M při $I_{BAL,MAX}$

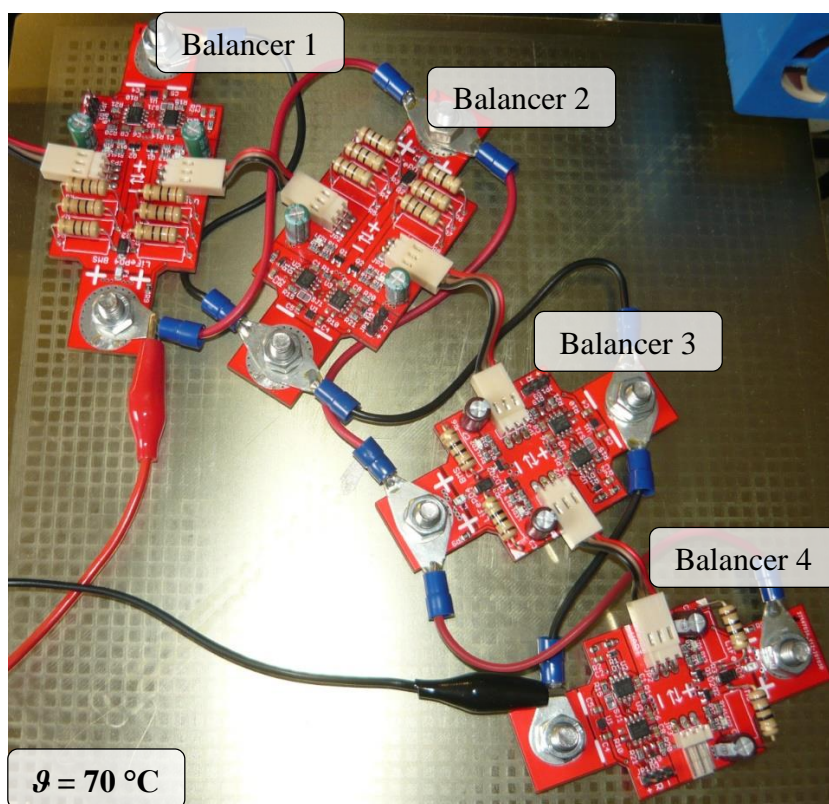


Obrázek č. 10.12: Měření ohřevu balancovacího modulu č. 4 velikosti S při $I_{BAL,MAX}$

Z teploty 25 °C se teplotní čidlo balanceru č. 2 rozešlo na téměř $\vartheta_{B2,MAX} = 43$ °C. U balancerů 3,4 o velikosti S byly výsledky o něco lepší, zde činila nejvyšší naměřená hodnota $\vartheta_{B4,MAX} = 38$ °C.

Měření termokamerou pak ukázalo stejné výsledky pro obě velikosti balancovacích modulů. Teplota výkonových rezistorů dosahovala v nejteplejších místech hodnoty $\vartheta_{R,MAX} = 194$ °C. Pouzdro mikroprocesoru, kde je umístěn teplotní senzor pak dosahovalo dle termokamery teploty $\vartheta_{MCU} = 42$ °C. Z teplotních snímků je dále vidět, že teploty všech ostatních součástek jsou na přijatelných hodnotách. Na snímcích není dokonce pozorovatelný ani ohřev výkonových tranzistorů, přes které teče veškerý balancovací proud. Za zmínku stojí pouze ohřev elektrolytických kondenzátorů. U velikosti M jsou kondenzátory umístěny dále od výkonových rezistorů a jejich teplota se bude pohybovat podobně jako u mikroprocesoru kolem $\vartheta_{C,M} \approx 40$ °C. Na velikosti S byly z důvodu nedostatku prostoru umístěny kondenzátory výrazně blíže, což se negativně projevilo na jejich teplotě, která se bude pohybovat kolem $\vartheta_{C,S} \approx 55$ °C. Nutno však zmínit, že jde o kondenzátory s maximální provozní teplotou 105°C. Balancování navíc u článků v dobré kondici neprobíhá příliš často. Po většinu času tak budou kondenzátory provozovány při pokojové teplotě.

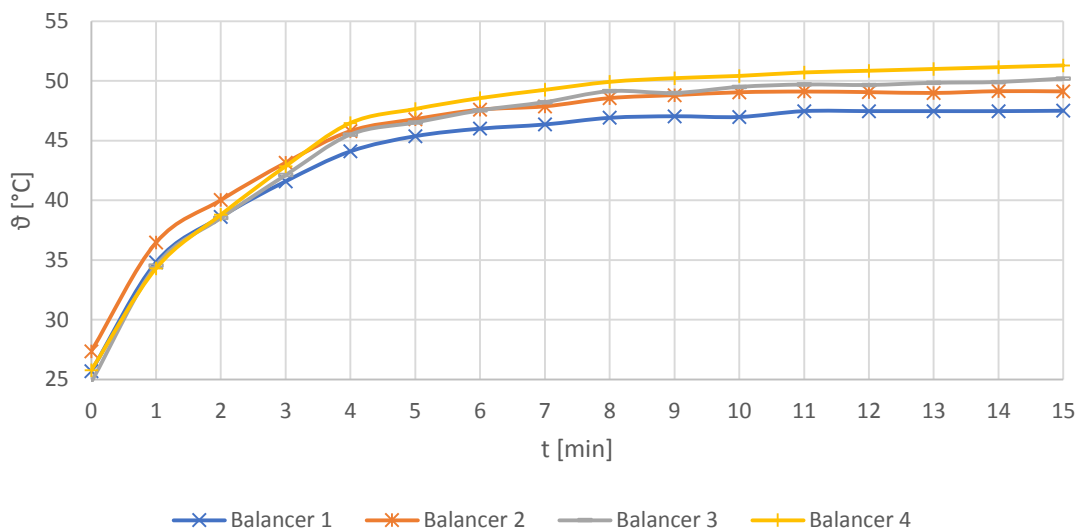
Následovalo měření přenosu tepla z článku do balancovacího modulu. Pro tento experiment byly moduly přesunuty na podložku 3D tiskárny rozešlárou na 70 °C.



Obrázek č. 10.13: Testovací sestava pro měření přenosu tepla z článku do balanceru

Tabulka č. 10.6: Měření přenosu tepla z článku do balanceru, teplota podložky $\vartheta = 70^{\circ}\text{C}$

t [min]	ϑ_{B1} [$^{\circ}\text{C}$]	ϑ_{B2} [$^{\circ}\text{C}$]	ϑ_{B3} [$^{\circ}\text{C}$]	ϑ_{B4} [$^{\circ}\text{C}$]
0	25,68	27,35	24,77	25,77
1	34,81	36,46	34,53	34,30
2	38,61	40,02	38,52	38,79
3	41,59	43,15	42,11	42,86
4	44,10	45,80	45,51	46,48
5	45,37	46,80	46,52	47,65
6	46,00	47,59	47,53	48,56
7	46,35	47,87	48,22	49,25
8	46,91	48,56	49,14	49,92
9	47,04	48,81	48,99	50,23
10	46,98	49,05	49,50	50,42
11	47,47	49,11	49,70	50,71
12	47,47	49,06	49,66	50,85
13	47,47	48,99	49,84	51,00
14	47,47	49,14	49,91	51,15
15	47,50	49,12	50,20	51,30



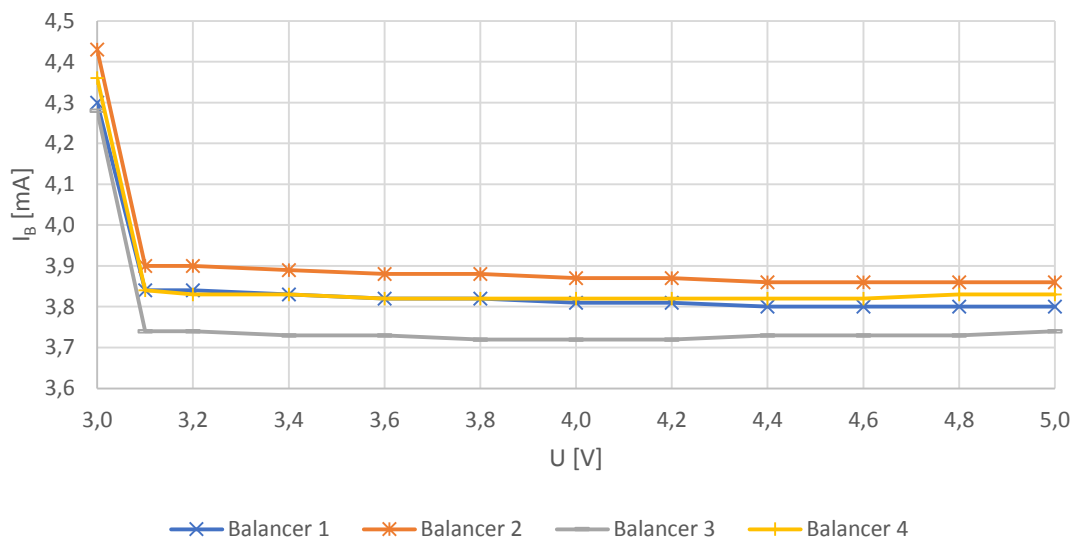
Obrázek č. 10.14: Přenos tepla z článku do balanceru, teplota podložky $\vartheta = 70^{\circ}\text{C}$

Přenos tepla z článku do balanceru není ideální. Experiment ukázal, že pokud by se článek rozehřál na teplotu $\vartheta = 70^{\circ}\text{C}$, balancery by ukázaly hodnotu pouze kolem $\vartheta = 50^{\circ}\text{C}$. Balancer tedy dokáže spolehlivě detekovat nadměrný ohřev článku, ale konkrétní hodnota teploty je pouze orientační. Pro přesné měření teploty by bylo nutné pořídit externí teplotní senzor, který by byl namontován přímo na článek. Odpadl by tak i problém s ovlivňováním měření při balancování.

Dále byla změřena klidová spotřeba všech balancerů. Zde je důležité, aby byla spotřeba všech kusů ideálně stejná, aby nedocházelo zbytečně k nerovnoměrnému vybíjení článků.

Tabulka č. 10.7: Měření spotřeby balancerů

U_B [V]	I_{B1} [mA]	I_{B2} [mA]	I_{B3} [mA]	I_{B4} [mA]	P_{B1} [mW]	P_{B2} [mW]	P_{B3} [mW]	P_{B4} [mW]
3,00	4,30	4,43	4,28	4,36	12,9	13,3	12,8	13,1
3,10	3,84	3,90	3,74	3,84	11,9	12,1	11,6	11,9
3,20	3,84	3,90	3,74	3,83	12,3	12,5	12,0	12,3
3,40	3,83	3,89	3,73	3,83	13,0	13,2	12,7	13,0
3,60	3,82	3,88	3,73	3,82	13,8	14,0	13,4	13,8
3,80	3,82	3,88	3,72	3,82	14,5	14,7	14,1	14,5
4,00	3,81	3,87	3,72	3,82	15,2	15,5	14,9	15,3
4,20	3,81	3,87	3,72	3,82	16,0	16,3	15,6	16,0
4,40	3,80	3,86	3,73	3,82	16,7	17,0	16,4	16,8
4,60	3,80	3,86	3,73	3,82	17,5	17,8	17,2	17,6
4,80	3,80	3,86	3,73	3,83	18,2	18,5	17,9	18,4
5,00	3,80	3,86	3,74	3,83	19,0	19,3	18,7	19,2



Obrázek č. 10.15: Klidový proud balancerů

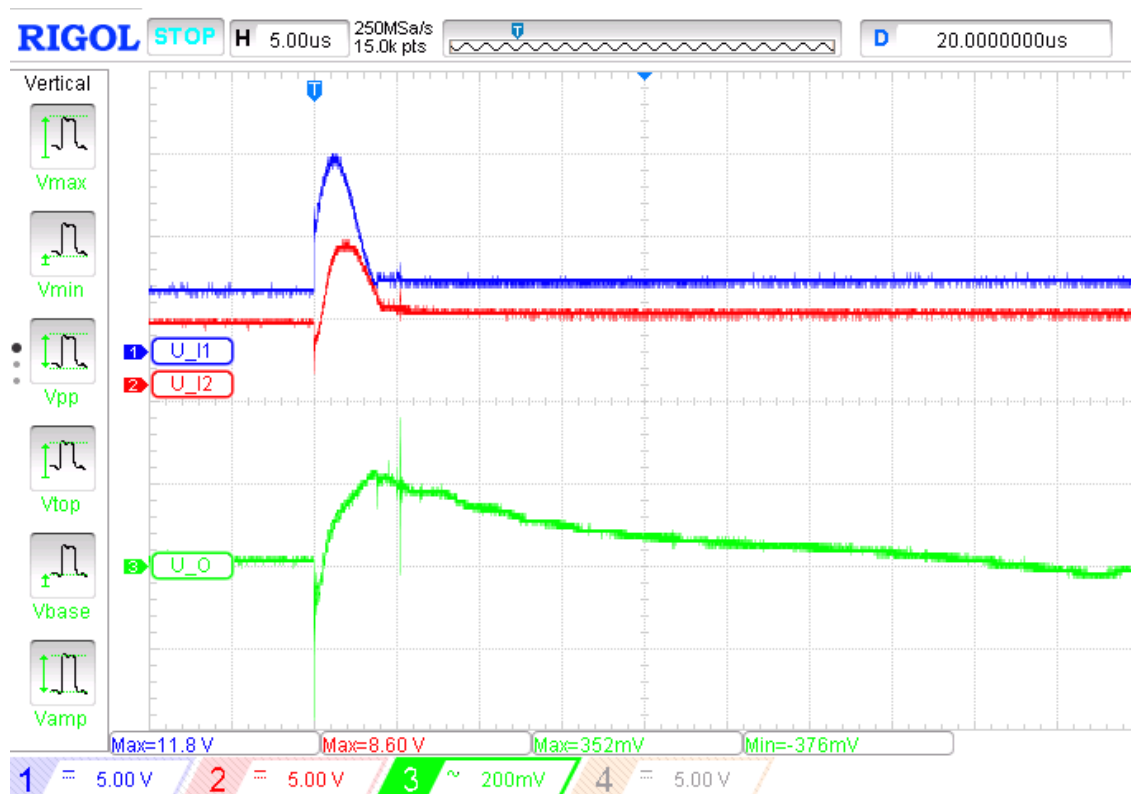
Napájení balancerů zajišťuje LDO regulátor, proto se klidový proud se změnou vstupního napětí příliš nemění. Můžeme pozorovat pouze nárůst klidového proudu při minimálním napájecím napětí $U_{B,MIN} = 3,0$ V. Výstupní napětí LDO regulátoru činí rovněž $U_{OUT} = 3,0$ V. Výkonový tranzistor LDO regulátoru se tak při minimálním U_B otevírá naplno, což vede ke zvýšení jeho zemního proudu.

Rozdíly v klidovém proudu jednotlivých kusů jsou pouze v řádu desítek μA , což by nemělo způsobovat žádné problémy s nerovnoměrným vybíjením článků. Spotřeba ani při maximálním U_B nepřesáhla $P_{B,MAX} < 20$ mW.

Na závěr byla testována odolnost balancovacích modulů proti přepětí na napájecí lince. Vzhledem k tomu, že tyto moduly budou na celé baterii osazeny ve značném množství kusů, byla odolnosti balancerů věnována zvýšená pozornost. Na vstupu se nachází transil s prahovým napětím $U_{TH} = 9,1 \text{ V}$ a špičkovým výkonem $P_{DIS,MAX} = 600 \text{ W}$. Napájení veškeré elektroniky pak zajišťuje LDO regulátor s maximálním vstupním napětím $U_{MAX,LDO} = 24 \text{ V}$. Pro účely experimentu byl do napájecí linky vybíjen kondenzátor o kapacitě $C = 4,7 \mu\text{F}$ nabitý na $U_{HV} = 150 \text{ V}$.

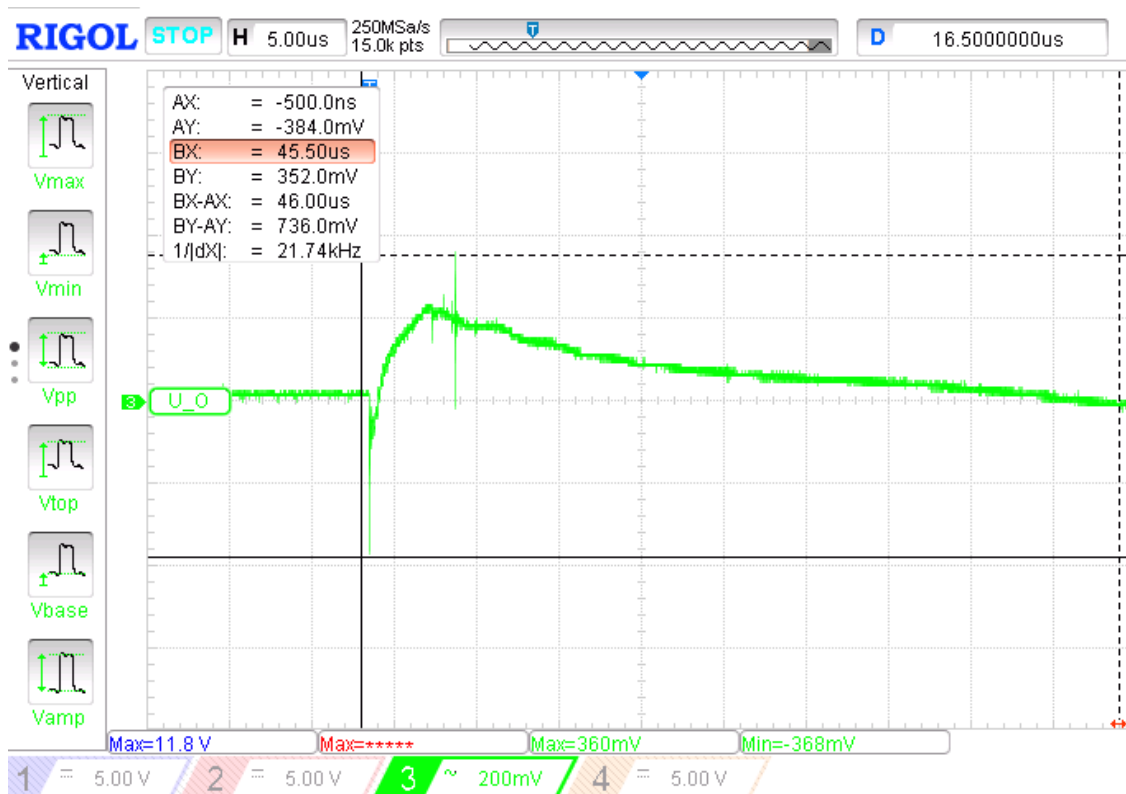
Průběh při vybití kondenzátoru byl sledován pomocí osciloskopu, kdy měřicí sondy byly zapojeny:

- Kanál 1 – vstupní svorky balanceru
- Kanál 2 – vstup LDO
- Kanál 3 – výstup LDO



Obrázek č. 10.16: Měření odolnosti balanceru proti přepětí

Na oscilogramu můžeme pozorovat, že transil omezí napěťovou špičku na napájecích svorkách na hodnotu $U_{IN1} = 11,8 \text{ V}$. Samotný LDO regulátor je od napájecích svorek poměrně daleko, takže přívodní spoj bude mít poměrně velkou parazitní indukčnost. Hned v těsné blízkosti LDO regulátoru je pak umístěn keramický kondenzátor $C_{IN} = 1 \mu\text{F}$. Na plošném spoji tak vzniká LC filtr, který rychlé změny napájecího napětí potlačuje. Přímo na vstupu LDO regulátoru už byla naměřena špička o velikosti $U_{IN2} = 8,6 \text{ V}$, což má k $U_{MAX,LDO} = 24 \text{ V}$ ještě značnou rezervu.



Obrázek č. 10.17: Měření odolnosti balanceru proti přepětí, detail na výstup LDO regulátoru

Na výstupu LDO regulátoru byl naměřen zákmit o velikosti $\Delta U_{OUT} = -384/+352$ mV. To by v absolutních číslech znamenalo, že řídicí elektronika byla v době přechodového děje vystavena napětí $U_{MIN} = 2,616$ V a $U_{MAX} = 3,352$ V, což jsou naprosto bezpečné hodnoty. Experiment byl opakován více než $10\times$ a po celou dobu nebyla zaznamenána jediná anomálie v chování řídicího mikroprocesoru.

Použité měřicí přístroje:

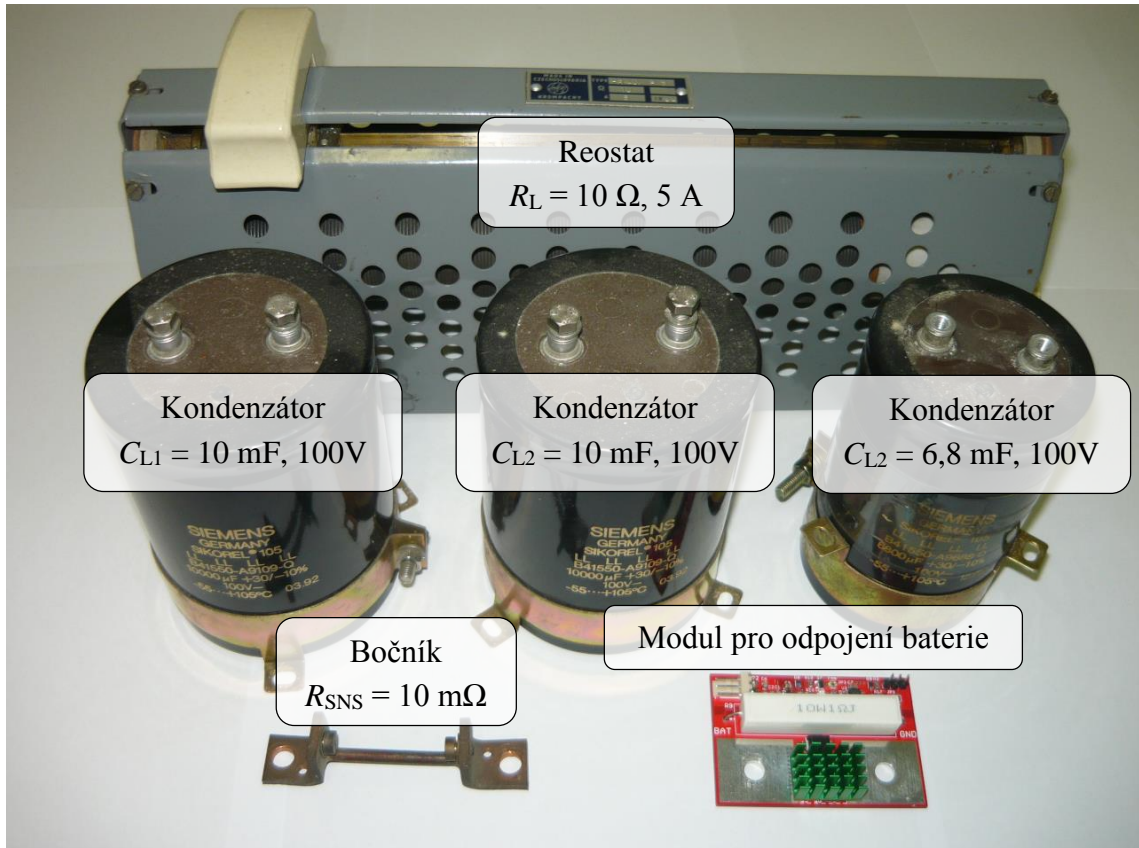
Laboratorní zdroj	Korad KA300P
Zdroj 150V	Vlastní výroby
Voltmetr	MASTECH MS8268
Miliampérmetr	MASTECH MS8268
Osciloskop	Rigol DS1054Z
Termokamera	FLIR E96

10.3 Modul pro odpojení baterie

První část měření byla věnována ověření schopnosti spínat velkou kapacitní zátěž. Pro tento experiment byla k dispozici zátěž ve formě elektrolytických kondenzátorů:

- $2 \times 10 \text{ mF}$, 100V
- $1 \times 6,8 \text{ mF}$, 100V

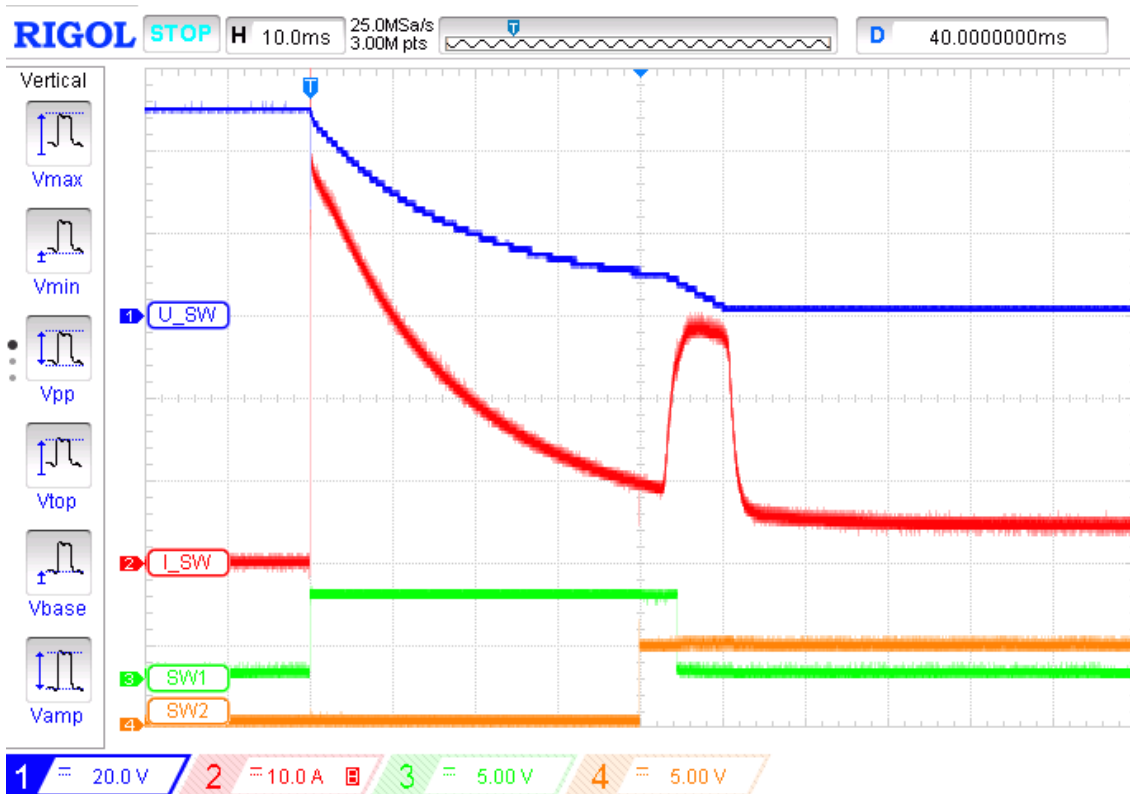
Pro snímání proudu byl do obvodu zapojen bočník s hodnotou $R_{\text{SNS}} = 10 \text{ m}\Omega$. Jako napěťový zdroj posloužila 48 V baterie složená z článků Winston 60 Ah.



Obrázek č. 10.18: Zátěž pro testování modulu pro odpojení baterie

Nejprve byla připojena kapacitní zátěž o velikosti $C_L = 20 \text{ mF}$, stejně jako v simulaci, která byla provedena v kapitole 7. Pro rychlé vybití kondenzátorů po rozepnutí byl paralelně ke kondenzátorům zapojen výkonový reostat o velikosti $R_L = 10 \Omega$. Průběh sepnutí je zobrazen na následujícím oscilogramu, kde bylo použito zapojení kanálů:

- Kanál 1 – úbytek napětí na spínači
- Kanál 2 – proud spínačem
- Kanál 3 – řídicí napětí soft-start spínače
- Kanál 4 – řídicí napětí spínače



Obrázek č. 10.19: Průběh spínání kapacitní zátěže o velikosti $C_L = 20 \text{ mF}$

Naměřený průběh spínání je prakticky totožný s výsledkem simulace v kapitole 7. Po sepnutí soft-start spínače jsou kondenzátory nabíjeny přes $R_S = 1 \Omega$. Startovací proud exponenciálně klesá až na hodnotu $I_{SW} = 10 \text{ A}$. Následně je sepnutý trvalý spínač, kdy při spínání je udržována konstantní hodnota proudu $I_{SW} = 30 \text{ A}$. Po skončení přechodového děje se hodnota proudu ustálí na $I_{SW} = 5 \text{ A}$, což odpovídá proudu tekoucímu do připojené odporové zátěže o velikosti $R_L = 10 \Omega$.

Na výstup byly následně připojeny všechny 3 dostupné kondenzátory, což vytvořilo kapacitní zátěž o velikosti $C_L = 26,8 \text{ mF}$. Cílem bylo otestovat ochranu proti spínání příliš velké kapacitní zátěže, případně proti zkratu.

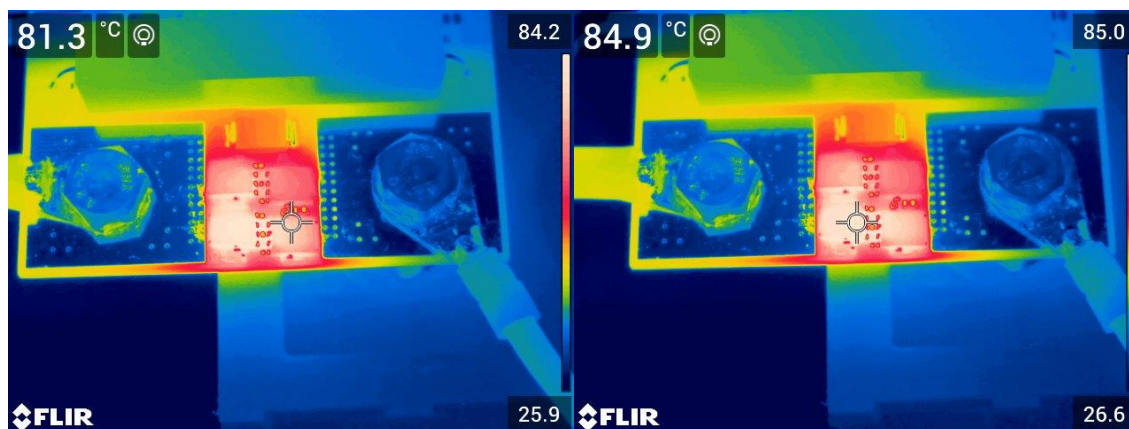


Obrázek č. 10.20: Průběh spínání kapacitní zátěže o velikosti $C_L = 26,8 \text{ mF}$

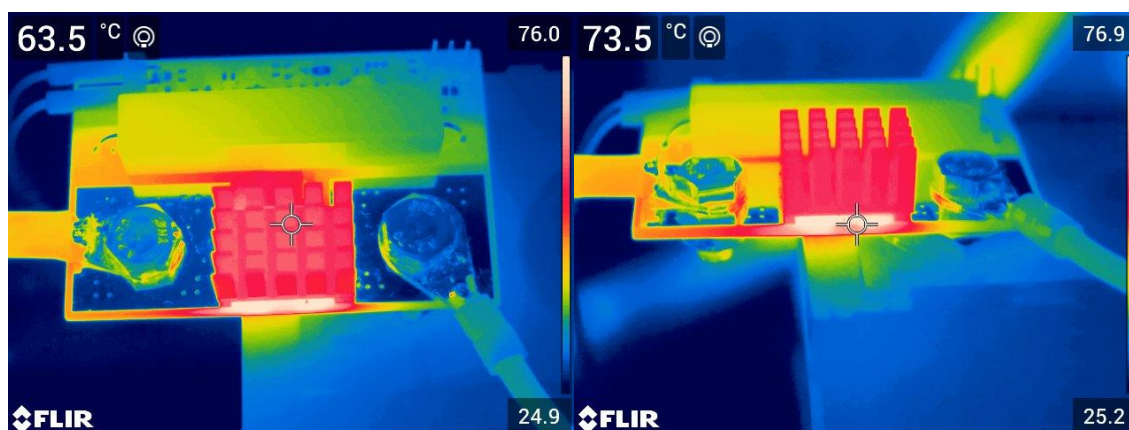
Z oscilogramu je patrné, že řídicí mikroprocesor rozpoznal příliš nízkou strmost proudové rampy, tedy příliš velkou kapacitní zátěž a v čase $t = 5 \text{ ms}$ bylo spínání bezpečně ukončeno. Obdobná situace by nastala i při spínání do zkratu, kde by byla strmost proudové rampy nulová.

Po ověření bezpečného spínání následoval test ohřevu při maximálním zatěžovacím proudu $I_L = 50 \text{ A}$. Teplotní měření bylo provedeno se stejnými přístroji, jako měření modulu pro měření proudu. Jako zdroj tedy posloužil článek Winsotn 60 Ah, proud byl nastaven pomocí elektronické zátěže Agilent N3300A a snímky pořízeny termokamerou Flir E96 na rozsahu $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+125 \text{ }^\circ\text{C}$. Čas na ustálení teploty byl ponechán stejně jako u předchozích měření, tedy 15 minut.

Měření ukázalo, že modul by byl za pokojové teploty schopen pracovat při maximálním proudu i bez potřeby chladiče. Teploty tranzistorů bez chladiče nepřesáhly hodnotu $\vartheta = 85\text{ °C}$, což je pro použité tranzistory přijatelná hodnota.



Obrázek č. 10.21: Měření ohřevu modulu pro odpojení baterie při $I = 50\text{ A}$ bez chladiče



Obrázek č. 10.22: Měření ohřevu modulu pro odpojení baterie při $I = 50\text{ A}$ s chladičem

Vždy je však vhodné udržovat teplotu spínacích prvků co nejnižší už jenom z důvodu, že s rostoucí teplotou roste i odpor kanálu $R_{\text{DS(on)}}$. Teplo se navíc může přenášet i do samotného článku. Proto byl změřen i ohřev po nalepení chladiče, kdy se teplota můstku ustálila na hodnotě kolem $\vartheta = 74\text{ °C}$. Na základě tohoto výsledku bylo rozhodnuto, že chladič bude osazován na všechny kusy.

Použité měřicí přístroje:

Elektronická zátěž	Agilent N3300A
Osciloskop	Rigol DS1054Z
Termokamera	FLIR E96

11. ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést literární rešerši k problematice lithiových baterií a na základě získaných poznatků navrhnout a sestrojít funkční prototyp inteligentní BMS která zajistí bezpečný provoz tohoto typu baterií.

První polovina práce, složená z kapitol 2–5, se zabývá teoretickým rozborem problematiky. Byla stručně popsána vnitřní konstrukce lithiových článků a analyzovány jejich základní vlastnosti. Největší pozornost byla věnována článkům Li-Ion a LiFePO₄. Oba typy článků lze poškodit vlivem hlubokého vybití, přebíjení, vysoké teploty, nebo příliš vysokých proudů.

Proto byly dále popsány možnosti monitorování úrovně nabití (SoC). Bylo zjištěno, že určení SoC pouze dle svorkového napětí může být v mnoha případech značně nepřesné. Proto byl zkoumán způsob určování SoC metodou coulomb counting, která při zajištění dostatečně přesného měření proudu dosahuje mnohem lepších výsledků.

Dalším problémem u baterií, které jsou složeny z více článků zapojených v sérii, může být nerovnoměrné nabití jednotlivých článků. Byly analyzovány příčiny vzniku této nevyváženosti, mezi které patří zejména nerovnoměrné stárnutí článků a různá velikost samovybití. Těmto jevům nelze jednoduše zabránit, proto je nutné monitorovat stav jednotlivých článků a baterii průběžně vyvažovat – balancovat. Byly popsány rozdíly mezi pasivním a aktivním typem balancerů. Pasivní balancery jsou konstrukčně jednoduché, levné, ale při balancování dochází k vyzařování přebytečné energie článků. Aktivní balancery proti tomu umí tuto přebytečnou energii efektivně přenést do ostatních článků. Nevýhodou je však vyšší cena a složitost.

Druhá polovina práce, počínající kapitolou 6, se zabývá návrhem BMS na základě poznatků získaných z teoretické části. Na úvod byly stanoveny dílčí cíle, které by měly být splněny pro dosažení funkčního a spolehlivého systému. Zvolen byl modulární koncept. Uživatel tak bude mít možnost si volbou modulů sestavit systém dle vlastních požadavků. Základem celé BMS je modul pro měření proudu, který byl navržen ve dvou velikostních variantách. Dostupné jsou proudové rozsahy ± 50 A, ± 100 A a ± 200 A. Následně byl proveden návrh modulů pro balancování. Balancery budou montovány na každý článek zvlášť. Jejich cílem je měření napětí, teploty a případné balancování jednotlivých článků. Navrženy byly ve 3 velikostech. Velikosti S a M jsou speciálně určené pro montáž na LiFePO₄ články Winston 60 Ah a 100 Ah, velikost U je možné montovat na ostatní typy článků. Pro případ, že by bylo nutné baterii odpojit, např. z důvodu poruchy, byl navržen modul pro odpojení baterie s použitím polovodičových spínačů. Aby při spínání nevznikaly nežádoucí nárazové proudy, byly provedeny výpočty a simulace měkkého startu pro kapacitní zátěž o velikosti až 20 mF.

Dále byly zhotoveny prototypy pro ověření správné funkce. Modul pro měření proudu byl osazen v obou velikostních variantách proudovým senzorem s rozsahem ± 50 A. Na velikosti S byly výkonové spoje posíleny měděným plátováním o tloušťce 0,3 mm, verze M byla ponechána se základní tloušťkou mědi 35 μ m pro porovnání ohřevu při zátěžovém testu. Balancerů bylo osazeno celkem 4 ks, 2x velikost S, 2x velikost M. Od modulu pro odpojení baterie byl osazen 1 ks velikosti S pro spínání 50 A zátěže. Ostatní velikostní varianty jsou plánovány až po otestování varianty S v praxi.

Následuje kapitola věnovaná popisu digitálního protokolu pro komunikaci. Moduly umožňují komunikovat po RS-485 sběrnici, data jsou chráněna proti chybám využitím 16 bitového cyklicky redundantního součtu. Obsažen je i stručný popis programu pro jednotlivé moduly formou vývojových diagramů.

V poslední kapitole byly zhotovené prototypy podrobeny důkladnému testování. U modulu pro měření proudu se podařilo dosáhnout odchylky měření $\delta = \pm 1$ %. Maximální velikost nesymetrie měření proudu Hallovým senzorem byla naměřena $I_{OFS} = 200$ mA. Tato nesymetrie byla způsobena dlouhodobým průtokem maximálního proudu pouze jedním směrem. V praxi se bude polarita proudu při nabíjení a vybíjení pravidelně střídat a nesymetrie by se tak měla kompenzovat. Provedený zátěžový test pak ukázal, že pro nejnižší rozsah ± 50 A není nutné posílení výkonových spojů, což ušetří čas při osazování.

Moduly pro balancování dosahovaly při měření napětí v celém rozsahu odchylky $\delta < \pm 0,5$ % oproti referenčnímu voltmetru. Více je důležitá odchylka mezi jednotlivými moduly, aby bylo dosaženo nízké odchylky mezi články. Zde byl výsledek ještě lepší, jednotlivé moduly se od sebe nelišily o více než 0,1 %. V pořádku byla taktéž VA charakteristika balancování. V ideálním případě by měl být balancer schopen dosáhnout maximální velikosti balancovacího proudu okamžitě po překročení nastavené úrovně. Balancery byly schopny dosáhnout max. balancovacího proudu při nárůstu napětí článku o +10 mV nad nastavenou úroveň. Dosažená strmota VA charakteristiky tak dokonce předčila očekávání. Pro měření teploty je využíván senzor přímo na čipu mikrokontroléru. Přenos tepla z článku na teplotní senzor není ideální, při skutečné teplotě článku $\vartheta = 70$ °C byla měřená hodnota cca o 20 °C nižší. Měření je dále ovlivněno procesem balancování, kdy dochází naopak k navyšování měřené hodnoty. Výkonové rezistory dosahují při balancování teploty až $\vartheta = 190$ °C, takže se část tepla přenesla i do teplotního senzoru. Přesnost měření je dostatečná pro spolehlivou detekci přehřívání článku, ale pro získání přesnějších hodnot bude do budoucna vhodné doplnit externí teplotní senzor umístěný mimo samotný modul. Na závěr byl proveden test odolnosti proti přepětí, kde nebyly zjištěny žádné problémy.

Testování modulu pro odpojení baterie bylo zaměřeno zejména na ověření funkce měkkého startu. Ověřována byla i schopnost detekce příliš velké kapacitní zátěže či zkratu. Bylo možné opakovaně spínat kapacitní zátěž o hodnotě $C_L = 20 \text{ mF}$, což byla maximální uvažovaná hodnota. Průběhy napětí a proudů změřené osciloskopem prakticky dokonale kopírovaly průběhy získané simulací. Po připojení kapacitní zátěže o velikosti $C_L = 26,8 \text{ mF}$ došlo k aktivování ochrany a spínání bylo bezpečně přerušeno v čase $t = 5 \text{ ms}$. Na závěr byl změřen ohřev při maximálním proudu $I = 50 \text{ A}$. Měření ukázalo, že výkonové tranzistory dosahují teploty téměř $\vartheta = 85 \text{ }^\circ\text{C}$. Bylo proto přistoupeno k použití pasivního chladiče, který snížil teplotu na přijatelných $\vartheta = 74 \text{ }^\circ\text{C}$. Je však nutno podotknout, že výkonová ztráta na modulu roste s druhou mocninou proudu, takže se dá očekávat, že po většinu času bude ohřev modulu mnohem menší.

V průběhu práce se podařilo úspěšně splnit všechny cíle z kapitoly 6. Bylo objeveno pár drobných nedostatků, které by mělo být do budoucna poměrně snadné napravit. Tyto nedostatky však nebrání nasazení do reálného provozu. V blízké době je proto plánováno dlouhodobější testování v rámci vlastní fotovoltaické elektrárny.

LITERATURA

- [1] GAZDÍK, Roman. ČEZ Prodej Ioni instaloval 660 střešních fotovoltaik. *ČEZ* [online]. Praha 4: ČEZ, 2021, 7. 1. 2021 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-prodej-ioni-instaloval-660-stresnich-fotovoltaik-a-514-tepelnych-cerpadel.-hitem-je-kombinace-129165>
- [2] J. DRISCOLL, Michael. Electrical Fires: What You Need to Know About Lithium-Ion Batteries. *Envista Forensics* [online]. West Haven, CT: Envista Forensics, 2019 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.envistaforensics.com/knowledge-center/insights/articles/electrical-fires-what-you-need-to-know-about-lithium-ion-batteries/>
- [3] The Four Components of a Li-ion Battery. *Samsung SDI* [online]. Samsung SDI, 2016 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/55272.html>
- [4] Cathode Materials for Lithium-ion Batteries. *NEI Corporation* [online]. New Jersey: Nanopowder Enterprises Incorporated, 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.neicorporation.com/products/batteries/lithium-ion-cathode-materials/>
- [5] Anode Material for Battery Manufacturers. *Targray* [online]. Montreal, Canada: Targray [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.targray.com/li-ion-battery/anode-materials>
- [6] Lithium Titanate (LTO) Cells - Technical Advantages. *GWL Power* [online]. Prague, CZ: GWL, 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://shop.gwl.eu/LTO-Tech/>
- [7] COLTHORPE, Andy. Experts react to Tesla Battery Day: The key technology takeaways. *Energy Storage News* [online]. London, UK: GWL, 2020 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/experts-react-to-tesla-battery-day-the-key-technology-takeaways/>
- [8] Lithium-ion Battery vs Lithium-polymer Battery. *Robu.in* [online]. India: Robu.in, 2020, 20.4.2020 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://robu.in/lithium-ion-battery-vs-li-po-battery/>
- [9] A LiFePO4 battery vs lithium ion polymer battery. *Grepow Blog* [online]. Grepow, 2020, 4.6.2020 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.grepow.com/blog/lifepo4-battery-vs-lithium-ion-polymer-battery/>
- [10] GB-LFP1865-11 Specification. *GWL Power* [online]. Prague, CZ: GWL Power, 2019 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: https://files.gwl.eu/inc/_doc/attach/StoItem/4963/GB-LFP1865-11_specification.pdf

- [11] Winston LFP100AHA Specification. *GWL Power* [online]. Prague, CZ: GWL Power, 2019 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: https://files.gwl.eu/inc/_doc/attach/StoItem/7705/ThunderSky-Winston-LIFEPO4-100Ah-TALL-Datasheet.pdf
- [12] Lithium Battery Overview. *Battery Stuff* [online]. Grants Pass, OR: Battery Stuff, 2012 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.batterystuff.com/kb/articles/battery-articles/lithium-battery-overview.html>
- [13] LiFePO4 Batteries On Boats: TOP BALANCE vs. BOTTOM BALANCE. *Marine How To* [online]. Cumberland, ME: Marine How To, 2017 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://marinehowto.com/lifepo4-batteries-on-boats/>
- [14] AN024 – Li-ion Battery and Gauge Introduction: Li-ion Battery Introduction. *Richtek* [online]. Taiwan: Richtek Technology Corporation, 2021 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN024>
- [15] ACS758 Datasheet. *Allegro microsystems* [online]. Manchester, NH: Allegro MicroSystems, 2020 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs758-datasheet.ashx>
- [16] LM5008 Datasheet. *Texas Instruments* [online]. Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2018 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/LM5008>
- [17] NCP718 Datasheet. *ON Semiconductor* [online]. Phoenix, Arizona, USA: ON Semiconductor Corporation, 2019 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/products/power-management/linear-regulators-ldo/ncp718>
- [18] ATTINY402 Datasheet. *Microchip* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2019 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATTiny202-04-402-04-06-Auto-DataSheet-DS40002159A.pdf>
- [19] ATTINY412 Datasheet. *Microchip* [online]. Irvine, California, USA: Skyworks Solutions, 2019 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001911A.pdf>
- [20] Si86xx Datasheet. *Skyworks* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology, 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/SL/documents/public/datasheets/si86xx-1Mbps-datasheet.pdf>

- [21] NTMFS5C604NL Datasheet. *ON Semiconductor* [online]. Phoenix, Arizona, USA: ON Semiconductor Corporation, 2019 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ntmfs5c604nl-d.pdf>
- [22] BSS806NE Datasheet. *Infineon* [online]. Munich, Germany: Infineon Technologies AG, 2014 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSS806NE-DS-v02_01-en.pdf?fileId=db3a304340f610c201410d1548de3366
- [23] MCP1525/41 Datasheet. *Microchip* [online]. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology Inc., 2019 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21653c.pdf>
- [24] KA3000/6000-Series User Manual. *Korad* [online]. Chandler, Arizona, USA: Shenzhen Korad Technology Co. Ltd., 2019 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Stan%20Rubinstein/KA3000_6000_Series_Man.pdf
- [25] Oversampling the ADC12 for Higher Resolution. LM5008 Datasheet. *Texas Instruments* [online]. Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2006 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slaa323a/slaa323a.pdf?ts=1651346014258>
- [26] Two of the Simplest Digital filters. In: *Gisselquist Technology* [online]. PGisselquist Technology, 2017 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://zipepu.com/dsp/2017/08/19/simple-filter.html>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ADC	Analogově digitální převodník
BMS	System pro správu baterie (Battery Management System)
B	Označení modulu pro balancování ve schématech
C	Proud v násobcích kapacity akumulátoru
CS	Označení modulu pro měření proudu ve schématech
CLK	Hodinový signál (Clock)
CRC	Cyklicky redundantní součet, používaný pro kontrolu integrity dat
DEC	Označení pro dekadickou (desítkovou) soustavu
DPS	Deska plošných spojů
Drop	Úbytek napětí
Drouput	Úbytek napětí na napěťovém regulátoru
EEPROM	Elektronicky přepisovatelná paměť
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
FVE	Fotovoltaická elektrárna
GND	Zemní potenciál
HEX	Označení pro hexadecimální (šestnáctkovou) soustavu
IO	Vstupně výstupní port (Input-Output)
LED	Elektroluminescenční dioda (Light-Emitting-Diode)
LCO	Lithium kobalt oxid
LDO	Regulátor s nízkým úbytkem napětí (Low-Dropout)
LFP	Lithium železo fosfát
LiFePO4	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
Li-Ion	Lithium-iontový akumulátor
Li-Po	Lithium-polymerový akumulátor

LMO	Lithium mangan oxid
LSB	Nejméně významný byte (Least Significant Byte)
LTO	Lithium titan oxid
MEAS	Měření (Measurement)
MODBUS	Protokol umožňující komunikaci většího množství zařízení po jedné sběrnici
MSB	Nejvýznamnější byte (Most Significant Byte)
NMC	Lithium nikl kobalt mangan
Offset	Nesymetrie
PCB	Deska plošných spojů (Printed Circuit Board)
PWM	Pulzně šířková modulace
RET	Návrat z funkce
RETI	Návrat z přerušení
RS-485	Sériová sběrnice, se zvýšenou odolností proti rušení
Rx	Vstup přijímače
Soft-Start	Měkký start, start při kterém je omezen nárazový proud
SPI	Sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface)
SW	Označení modulu pro odpojení baterie ve schématech
TRIG	Spouštěč (Trigger)
TTL	Tranzistorově Tranzistorová Logika
Tx	Výstup vysílače
UART	Asynchronní sériová sběrnice
UPDI	Sériové rozhraní vyvinuté firmou Microchip, umožňuje programování pouze po jednom datovém vodiči (Unified Program and Debug Interface)
VF	Vysokofrekvenční
VUT	Vysoké učení technické v Brně
Watchdog	Časovač, který po přetečení dokáže resetovat mikrokontrolér, slouží jako ochrana proti zacyklení

Symbols:

a	Koeficient a pro digitální filtr	(-)
C	Kapacita	(F)
C_L	Zatěžovací kapacita	(F)
DoD	Depth of Discharge, úroveň vybití baterie	(%)
E_{AS}	Maximální energie pulzu	(J)
E_{START}	Energie vyzářená při měkkém startu	(J)
f_m	Mezní kmitočet filtru	(Hz)
I	Proud	(A)
I_{BAL}	Balancovací proud	(A)
I_{BUD}	Výstupní proud budiče tranzistorů	(A)
I_D	Proud Drainem tranzistoru	(A)
I_{DIV}	Kvantizační krok AD převodníku	(A)
I_{IN}	Vstupní proud	(A)
I_L	Zatěžovací proud	(A)
I_M	Měřená hodnota proudu	(A)
I_{OFS}	Chybový proud způsobený nesymetrií měření	(A)
I_{REF}	Referenční proud	(A)
I_{Rmax}	Maximální proud rezistorem	(A)
I_{SW}	Proud modulem pro odpojení baterie	(A)
P	Výkon	(W)
P_B	Výkon vyzářený balancerům	(W)
P_{CELK}	Celkový vyzářený výkon	(W)
P_{DMAX}	Maximální ztrátový výkon tranzistoru	(W)
P_{IN}	Příkon	(W)
P_{MAX}	Maximální výkon	(W)
ΔQ	Absolutní odchylka při měření náboje	(Ah)
Q	Náboj	(Ah)
R	Odpor	(Ω)
$R_{DS(on)}$	Odpor mezi Drain-Source při sepnutí tranzistoru	(Ω)
R_L	Zatěžovací odpor	(Ω)
R_S	Startovací odpor	(Ω)

R_{SNS}	Snímací odpor	(Ω)
$R_{\theta JA}$	Tepelný odpor tranzistoru	($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
SoC	State of Charge, úroveň nabití baterie	(%)
T_{START}	Doba měkkého startu	(s)
U	Napětí	(V)
U_B	Napětí změřené balancerem	(V)
U_{BAL}	Balancovací napětí	(V)
U_{DIV1}	Kvantizační krok AD převodníku	(V)
U_{DIV8}	Teoretická velikost kvantizačního kroku při použití průměrování z 8 vzorků	(V)
U_{DS}	Maximální napětí mezi Drain-Source tranzistoru	(V)
U_{GS}	Napětí mezi Gate-Source tranzistoru	(V)
U_{IN}	Vstupní napětí	(V)
U_{MAX}	Maximální napětí	(V)
U_{OUT}	Výstupní napětí LDO regulátoru	(V)
u_R	Okamžitá hodnota napětí na rezistoru při měkkém startu	(V)
U_{REF}	Referenční napětí	(V)
$u_{S,END}$	Okamžitá hodnota napětí pro ukončení měkkého startu	(V)
U_Z	Napětí změřené laboratorním zdrojem	(V)
x_n	Vstupní hodnota digitálního filtru	(-)
y_n	Výstupní hodnota digitálního filtru	(-)
δ	Relativní odchylka	(%)
$\Delta\vartheta$	Velikost ohřevu	($^{\circ}\text{C}$)
$\Delta\vartheta_{START}$	Velikost ohřevu při měkkém startu	($^{\circ}\text{C}$)
ϑ	Telota	($^{\circ}\text{C}$)
ϑ_A	Teplota okolí	($^{\circ}\text{C}$)
ϑ_B	Teplota balanceru	($^{\circ}\text{C}$)
ϑ_C	Teplota kapacitoru	($^{\circ}\text{C}$)
ϑ_{MCU}	Teplota mikrokontroléru	($^{\circ}\text{C}$)
ϑ_R	Teplota rezistoru	($^{\circ}\text{C}$)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ELEKTRONICKÁ PŘÍLOHA	91
--	----

Příloha A - Elektronická příloha

Elektronická příloha obsahuje dokumentaci vytvořenou v programu CadSoft Eagle 7.2.0. Schémata jsou rovněž dostupná ve formátu PDF, výrobní podklady pro desky plošných spojů pak i ve formě Gerber dat. Veškeré 3D modely jsou ve formátu SKP, vytvořené programem Sketchup 2017 s pomocí skriptu eagleUp.

Dále je přiložen kompletní zdrojový kód, včetně projektu, který byl vytvořen ve vývojovém prostředí AtmelStudio 7.0. Pro kompilaci je nutné doinstalovat balíček ATtiny_DFP.