

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Václav Zimčík



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

BALANCÉR PRO LI-ION AKUMULÁTOROVOU BATERII

BALANCER FOR LI-ION RECHARGEABLE BATTERY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Václav Zimčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Huták, Ph.D.

BRNO 2022



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Václav Zimčik

ID: 203383

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Balancér pro Li-ion akumulátorovou baterii

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Pro konkrétní aplikaci (8S článků Li-fe) navrhnete vhodné obvodové řešení balanceru.
2. Navrhnete a nadimenzujete aktivní i pasivní prvky - polovodiče, transformátory, chlazení.
3. Balancér realizujete a ověříte jeho vlastnosti měřeními.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
- [2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.2. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
- [3] LINDEN, David.; REDDY, Thomas. Handbook of batteries by David Linden and Thomas B., Third edition, Mcgraw-Hill Publ. Comp, 2001, 1200s., ISBN 0071359788

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 22.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Petr Huták, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce pojednává o návrhu a realizaci balančního obvodu pro 8S Li-Ion akumulátorovou baterii. V první, teoretické, části práce jsou rozebírány vlastnosti různých typů Li-Ion akumulátorů, různé topologie v praxi běžně využívaných balančních obvodů a vlastnosti mikrokontrolérů často využívaných pro řízení těchto balančních obvodů.

Ve druhé, praktické, části je rozebrán návrh prototypu balančního obvodu. Nachází se zde dimenzování polovodičových součástek, a jejich chlazení, prototypu balančního obvodu, popis chodu programu řídicího tento prototyp, srovnání vlastností tohoto prototypu s komerčním balančním obvodem a dokumentace k sestrojenému prototypu balančního obvodu.

Ve třetí části, závěr, jsou shrnuty získané poznatky týkající se prototypu balančního obvodu.

Klíčová slova

Li-Ion články, balancování akumulátorové baterie, 8S, BMS, modul Arduino, LTC6804, LT8584

Abstract

This diploma thesis is describing design and construction of battery balancer circuit for 8S Li-Ion battery pack. In the first, theoretical, paragraph the attributes of several Li-Ion battery cells are discussed, as well as different BMS topologies used in practice and microcontrollers commonly used to control them.

In the second, practical, paragraph the design of BMS circuit prototype is discussed. This paragraph contains dimensioning of semiconductors, and their cooling, of BMS prototype, description of program which is controlling this prototype, comparison with commercial BMS and documentation for designed prototype of balancing circuit.

Third paragraph, conclusion, contains summarization of gained knowledge regarding designed balancing circuit.

Keywords

Li-Ion cells, battery pack balancing, 8S, BMS, Arduino module, LTC6804, LT8584

Bibliografická citace

ZIMČÍK, Václav. *Balancér pro Li-ion akumulátorovou baterii* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142798>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Petr Huták.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Václav Zimčík*

VUT ID studenta: *203383*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2021/2022*

Téma diplomové práce: *Balancér pro Li-Ion akumulátorovou baterii*

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: 22. května 2022

podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: 22. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	2
SEZNAM TABULEK	4
ÚVOD	5
1. LI-ION AKUMULÁTORY	6
1.1 PARAMETRY LI-ION AKUMULÁTORŮ.....	6
1.2 TYPY LI-ION AKUMULÁTORŮ	7
1.2.1 <i>Lithium Cobalt Oxide (LiCoO₂) - LCO</i>	7
1.2.2 <i>Lithium Manganese Oxide (LiMn₂O₄) - LMO</i>	8
1.2.3 <i>Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO₂) - NMC</i>	8
1.2.4 <i>Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) - LFP</i>	8
1.2.5 <i>Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO₂) - NCA</i>	8
1.2.6 <i>Lithium Titanate (Li₂TiO₃) - LTO</i>	8
1.2.7 <i>Srovnání vlastností jednotlivých typů článků</i>	9
1.3 NEVYVÁŽENOSTI ČLÁNKŮ.....	9
1.3.1 <i>Nevyváženost celkových kapacit</i>	9
1.3.2 <i>Nevyváženost stavu nabití</i>	10
1.3.3 <i>Nevyváženost vnitřní impedance</i>	10
1.3.4 <i>Důsledky nevyváženosti článků</i>	11
2. VYVAŽOVACÍ OBVODY (BALANCÉRY)	14
2.1 PASIVNÍ BALANCÉRY.....	15
2.1.1 <i>Pasivní balancér s rezistorem/tranzistorem (Basic Dissipative Resistor/Transistor)</i>	15
2.2 AKTIVNÍ BALANCÉRY	16
2.2.1 <i>Kapacitní balancéry</i>	16
2.2.2 <i>Induktivní balancéry</i>	18
3. MIKROKONTROLÉRY PRO BALANCING	23
3.1 OBVOD LTC6804.....	23
3.2 OBVOD LT8584	27
4. NÁVRH BALANCÉRU	32
4.1.1 <i>Princip činnosti balancéru</i>	32
4.1.2 <i>Použité součástky</i>	33
4.1.3 <i>Část obvodu pro spínání zátěže</i>	35
4.1.4 <i>Snímací část</i>	39
4.1.5 <i>Software</i>	40
5. PROTOTYP BALANCÉRU	45
6. ZÁVĚR	49
LITERATURA	50
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	52
PŘÍLOHY	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Princip funkce lithiových akumulátorů.[2].....	6
1.2	OCV charakteristika pro různé výrobce Li-Ion článků. [5].....	7
1.3	Náhradní schéma akumulátoru (vlevo), náhradní schéma vnitřní impedance (vpravo)	7
1.4	Porovnání specifických energií Li-Ion článků [12].....	9
1.5	Závislost OCV na SOC (vlevo), závislost dOCV na SOC mezi dvěma články s 1% nevyvážeností SOC [6]	10
1.6	Rozdíly impedancí mezi 50 články pro jednoho výrobce v rozmezí 1 kHz [vlevo] až 10 mHz [vpravo] (vlevo), rozdíly napětí pro dva články s 15 % impedanční nevyvážeností při vybíjení C/2 (vpravo) [6]	11
1.7	Výchozí stav soustavy (vlevo), přepětí (vpravo), podpětí (dole) [4]	12
1.8	Limit přepětí [4]	12
1.9	Limity podpětí [4]	13
2.1	Zapojení pasivního balancčního obvodu, vlevo za použití rezistorů, vpravo za použití tranzistorů [7]	16
2.2	Kapacitní aktivní balancér s jedním kondenzátorem [8]	17
2.3	Kapacitní aktivní balancér s více kondenzátory [6]	17
2.4	Kapacitní aktivní balancér s dvěma stupni přepínaných kondenzátorů [9]	18
2.5	Indukční balancér s měniči buck-boost a) jednosměrný, b) obousměrný [10]	19
2.6	Princip činnosti buck-boost balancéru – obousměrného [10].....	19
2.7	Balancér s měniči flyback a) obousměrný, b) jednosměrný – nabíjení, c) jednosměrný – vybíjení [7]	20
2.8	Princip funkce MFB – B [7].....	20
2.9	Zapojení měniče MWFB [7]	21
2.10	Zapojení MSFB měniče [7].....	22
3.1	Běžné použití obvodu LTC6804 pro balancování [13]	23
3.2	Stavový diagram pro stavy hlavního obvodu LTC6804 [13]	25
3.3	Stavový diagram pro stavy vestavěného obvodu isoSPI obvodu LTC6804 [13]	26
3.4	Balancování 8 článků [13].....	26
3.5	Běžné použití obvodu LT8584 pro balancování [14]	27
3.6	Pracovní stavy obvodu LT8584 [14].....	28
3.7	Vliv kapacity sekundárního vinutí transformátoru [14]	29
3.8	Průběh napětí na vnitřním spínači [14]	30
4.1	Blokový diagram programu.....	33
4.2	Arduino Nano [15]	33
4.3	Bateriový článek NCR18650A [15]	33
4.4	Optočlen THT PC817X3NSZW [15].....	34
4.5	Tranzistor PN2222A [15].....	34
4.6	Operační zesilovač TLC272CP [15]	34
4.7	Vybíjecí část obvodu pro 1. a 2. článek soustavy	35
4.8	CTR převod optočlenu [17].....	36
4.9	$U_{CE} - I_B$ charakteristika tranzistoru PN2222A [16].....	37
4.10	I_{Cmax} tranzistoru PN2222A [16].....	38
4.11	P_{Dmax} tranzistoru PN2222A [16].....	38
4.12	Snímací část obvodu pro 1. a 2. článek soustavy	39
4.13	Zapojení diferenciálního zesilovače [18]	40

4.14	Struktura SCellInfo	40
4.15	Struktura SCellInfo	41
4.16	Prototyp třídy CBalancer.....	41
4.17	Globální funkce v programu.....	44
4.18	Program v prostředí Arduino IDE	44
5.1	Prototyp balancéru: horní vrstva (vlevo) / spodní vrstva (vpravo)	45
5.2	Prototyp balancéru: horní vrstva – přiblížený pohled	45
5.3	Výpis sériového monitoru modulu Arduino	46
5.4	Závislost kapacity článků na čase balancování	47
5.5	Závislost napětí článků na čase balancování	47

SEZNAM TABULEK

1.1	Porovnání vlastní jednotlivých typů článků [12].....	9
2.1	Rozdělení balančních obvodů	15
2.2	Srovnání vlastností balancérů.....	22
5.1	Finanční náklady výroby prototypu balancéru	48

ÚVOD

Cílem diplomové práce je návrh balančního obvodu pro 8S Li-Ion akumulátorovou baterii. Balanční obvody, nebo-li balancéry, a nebo zkráceně BMS, jsou neoddílnou součástí bateriových soustav využívající sériově řazených článků. Při nabíjení a vybíjení těchto soustav může dojít k nevyváženosti mezi jednotlivými články soustavy, cílem balančních obvodů je zamezení tohoto jevu, a udržení tak stavů jednotlivých článků téměř na stejné úrovni.

Z důvodu současného nedostatku integrovaných obvodů a mikrokontrolérů bylo potřeba zvolit zapojení pro balanční obvod, které se nespolehalo na tyto obvody. Zapojení bylo navrženo za použití modulu Arduino Nano. Existuje mnoho možných řešení zapojení balančních obvodů, nicméně z důvodu výše zmíněné situace bylo zapojení navrženo jako pasivní balanční obvod využívající k balancování zátěžné rezistory spínané přes bipolární tranzistory.

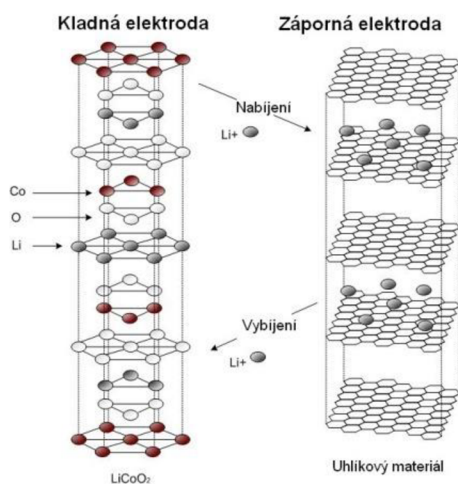
Osnova práce je rozdělena na dvě části. Na teoretickou část s popisem vlastností různých typů Li-Ion akumulátorů, popisem vlastností v praxi běžně používaných topologií zapojení balančních obvodů a popisem obvodů LTC6804 a LT8584, které jsou běžně používány pro jak pasivní, tak i aktivní, balanční obvody. A na praktickou část zaměřující se na návrh a realizaci prototypu balančního obvodu. Praktická část je dále rozdělena na část zaměřující se na dimenzování součástek použitých v zapojení, tranzistory, optočleny, rezistory atd., část zaměřující se na dimenzování chlazení pro tyto součástky, část vysvětlující chod a funkci použitého programu a na část obsahující dokumentaci k realizovanému prototypu, přesněji fotodokumentaci zařízení, změřené hodnoty a porovnání s komerčním zapojením pasivního balančního obvodu využívající ke svému chodu mikrokontrolér LTC6804.

V poslední části diplomové práce se nachází shrnutí poznatků získaných v průběhu realizace zařízení a návrhy na vylepšení zařízení.

1. LI-ION AKUMULÁTORY

V dnešní době jsou lithiové akumulátory jedny z nejpoužívanějších zdrojů energie v přenosných zařízeních běžné spotřební elektroniky. Jejich využití ale není limitováno na toto odvětví. Li-Ion akumulátory jsou taktéž používány jako zdroje energie pro elektromobily nebo elektrokola.

Jsou to akumulátory s bezvodným elektrolytem, které využívají pro kladnou elektrodu materiály jako jsou například lithium kobalt oxid (LiCoO_2), lithium-mangan oxid (LiMn_2O_4), lithium-nikl oxid (LiNiO_2) a další. Elektrolytem je nejčastěji lithium hexafluorofosfát, LiPF_6 , v nepolárním organickém rozpouštědle a záporná elektroda je vyrobena z uhlíkového materiálu. Ionty lithia se při nabíjení přesouvají z kladné elektrody na elektrodu zápornou. Zásadním rozdílem oproti jiným typům akumulátorů je to, že ionty lithia se vmísťují do mřížky materiálu bez chemické reakce se samotným materiálem záporné elektrody. V podstatě tedy neprobíhá chemická reakce a je dosaženo velmi dlouhé životnosti bez velkých změn ve výkonech akumulátorů. [1][3]



Obrázek 1.1 Princip funkce lithiových akumulátorů.[2]

1.1 Parametry Li-Ion akumulátorů

Jeden ze základních parametrů Li-Ion článků je jmenovitá kapacita článku, označována taky jako Q_j . Bývá udávána výrobcem a je to teoretická hodnota, ze které vypočteme celkovou hodnotu kapacity článku Q_c . Ta zachycuje skutečnou hodnotu kapacity článku, která odpovídá kapacitě naměřené mezi limitními body OCV charakteristiky. Z této charakteristiky se vypočítá SOC. [5]

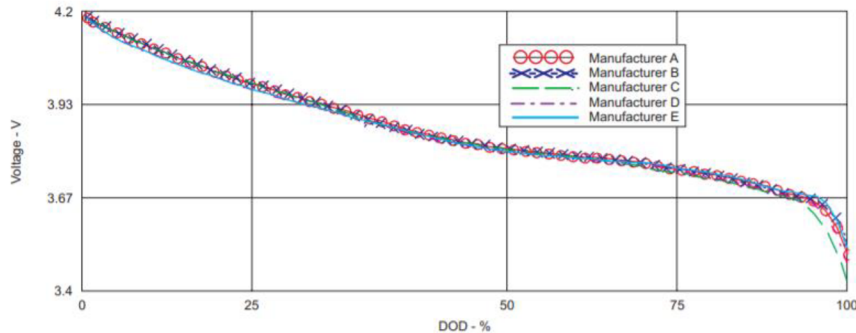
$$SOC = \frac{Q_c - q_s}{Q_c} \cdot 100 = 100 - DOD [\%] \quad (1.1)$$

Kde Q_c je celková kapacita článku, q_s je odebraná kapacita z článku a DOD je míra vybití akumulátoru.

Další parametr je napětí v nezátíženém stavu, tedy v momentu, kdy z článku není odebírán žádný proud, tedy stav naprázdno – anglicky OCV (open circuit voltage). Vyjádřit OCV je možné dvěma způsoby, za použití rovnice (1. 2), nebo OCV

charakteristikou. Tvar charakteristiky je závislý na elektrochemickém systému článku, SOC a také teplotě, kdy s klesající teplotou klesá hodnota OCV. [5]

$$OCV = f(SOC, T) [V] \quad (1.2)$$

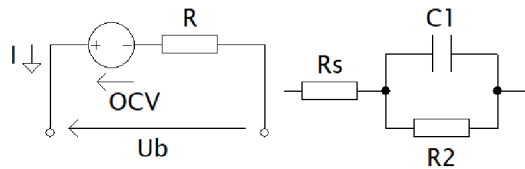


Obrázek 1.2 OCV charakteristika pro různé výrobce Li-Ion článků. [5]

Při nabíjení článků napětí neroste lineárně ale závisí na teplotě nabíjeného článku a jeho stavu nabití, podle rovnice (1. 3). Náboj musí projít několika vrstvami článku, nejprve ve formě elektronů a poté ve formě iontů po dosažení elektrolytu. Různé chemické procesy mají časové konstanty, které ovlivňují napěťovou odezvu článku. Z toho vyplývá, že se nejedná pouze o vnitřní odpor, ale jedná se o impedanci akumulátoru.

$$U_b = f(SOC, T) + IR(SOC, T) [V] \quad (1.3)$$

Kde U_b je napětí článku, I je proud procházející článkem, R je vnitřní odpor článku a T je teplota. [5]



Obrázek 1.3 Náhradní schéma akumulátoru (vlevo), náhradní schéma vnitřní impedance (vpravo)

Jen v určitých aplikacích nám stačí napětí a kapacita jednoho článku, z tohoto důvodu se používá buď sériová kombinace článků, nebo paralelní kombinace článků.

1.2 Typy Li-Ion akumulátorů

1.2.1 Lithium Cobalt Oxide (LiCoO₂) - LCO

Jeho vysoká specifická energie jej činí velmi používaným typem článků v mobilních telefonech, notebookech nebo digitálních kamerách. Článek je složen z katody z materiálu kobalt oxid a z anody z materiálu grafit karbon. Nevýhody tohoto typu článku jsou relativně nízká životnost, nízká teplotní stabilita a nízká specifická energie. Články by se neměly nabíjet proudem větším než 1 C, překročení této hodnoty zkracuje životnost baterie. Optimální hladina pro nabíjení je 0.8 C. Kapacita jednoho článku 18650 je 2400 mAh. Jedná se o jednu z původních variant a dnes již není tak relevantní jako dříve. [12]

1.2.2 Lithium Manganese Oxide (LiMn₂O₄) - LMO

Nízký vnitřní odpor těchto článků umožňuje rychlé nabíjení a vybíjení. Možnost vybíjení proudy 20 A – 30 A, nebo 50 A za použití pulzů. Tyto články jsou používány na výkonové nástroje, medicínské instrumenty nebo hybridní a elektrické automobily. Kapacita jednoho článku 18650 je 1100 mAh, nebo 1500 mAh pro vysokokapacitní verzi. Tento typ článku navíc také nabízí větší bezpečnost než výše zmíněný článek z kobalt oxidu. V dnešní době méně relevantní, je velmi malý potenciál pro rozvoj. [12]

1.2.3 Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO₂) - NMC

Tento typ článků je možné využívat jako výkonové články ale i jako energetické články. Například typ 18650 optimalizovaný jako energetický článek má kapacitu 2800 mAh a dokáže dodat proudy o hodnotách 4 A – 5 A, kdežto článek 18650 optimalizovaný jako výkonový článek má kapacitu menší, 2000 mAh, ale zato dokáže dodat větší proudy, o hodnotách až 20 A. Pokud by anoda byla založena na materiálu ze silikonu, mohla by kapacita těchto článků stoupnout až na 4000 mAh, ale za cenu sníženého dodávaného proudu a nižší živostnosti. Využití článků je například v elektrokolech nebo medicínských zařízeních. Cena za kWh se pohybuje kolem \$ 420, nebo 9000 Kč. [12]

1.2.4 Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) - LFP

Na rozdíl od jiných typů článků, je možnost zde uchovávání na vyšších napěťových hodnotách, tedy například maximální nabití baterie, i po delší dobu. Výměnou za tuto vlastnost je ale nižší jmenovité napětí a nižší specifická hustota. Dále, na rozdíl od jiných typů, má tento typ vyšší míru samovybíjení, což sebou přináší problémy s balancováním jak se živostnost baterie krátí. Využití je převážně jako přenosné zdroje energie vyžadující vyšší zátěžné proudy. Je to jeden z nejvíce bezpečných typů Li-Ion akumulátorů. Cena za kWh se pohybuje kolem \$ 580, nebo 12462 Kč. [12]

1.2.5 Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO₂) - NCA

Typ nabízí vyšší specifickou energii a dlouhou životnost, ale naopak bezpečnost je nižší a cena je vyšší. Využití je v medicínských zařízeních nebo v elektrických tramvajích. Cena za kWh se pohybuje kolem \$ 350, nebo 7520 Kč. [12]

1.2.6 Lithium Titanate (Li₂TiO₃) - LTO

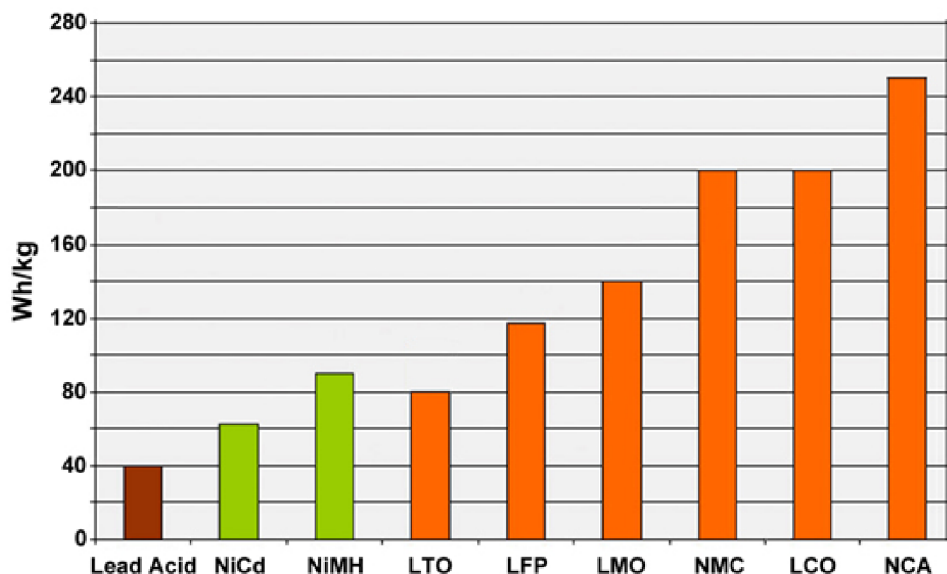
Nominální napětí článku není příliš vysoké, ale zato dokáže dodat vysoký vybíjecí proud. Článek je bezpečný a má výborné vybíjecí vlastnosti při nízkých teplotách. Dokáže si udržet až 80 % kapacity při teplotách až -30 °C. U tohoto typu článku je dále možnost rychlého nabíjení. Použití je převážně v UPS, elektrických tramvajích a solárně napájených pouličních osvětleních. Cena za kWh se pohybuje kolem \$ 1005, nebo 21954 Kč. [12]

1.2.7 Srovnání vlastností jednotlivých typů článků

Tabulka 1.1 Porovnání vlastní jednotlivých typů článků [12]

Typ	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiNiMnCoO ₂
Napětí	3 – 4.2 V, 3.6 V	3 – 4.2 V, 3.7 (3.8) V	3 – 4.2 V, 3.6 (3.7) V
Kapacita	150 – 200 Wh/kg	100 – 150 Wh/kg	150 – 220 Wh/kg
Nabíjecí proud	0.7 – 1 C, 1 C max	0.7 – 1 C, 3 C max	0.7 – 1 C, 1 C max
Vybíjecí proud	1 C	1 C, 10 C*, 30 C**	1 C, 2 C*
Nabíjecí cykly	500 – 100	300 – 700	1000 – 2000
Max. teplota	150 °C	250 °C	210 °C
Typ	LiNiCoAlO ₂	Li ₂ TiO ₃	LiFePO ₄
Napětí	3 – 4.2 V, 3.6 V	1.8 – 2.85 V, 2.4 V	2.5 – 3.65 V, 3.2 (3.3) V
Kapacita	200 – 260 Wh/kg	50 – 80 Wh/kg	90 – 120 Wh/kg
Nabíjecí proud	0.7 C	1 C, 5 C max	1 C
Vybíjecí proud	1 C	10 C*, 30 C**	1 C, 25 C*, 40 A**
Nabíjecí cykly	500	3000 – 7000	>2000
Max. teplota	150 °C		270 °C

* na některých článcích, ** za použití pulzů



Obrázek 1.4 Porovnání specifických energií Li-Ion článků [12]

1.3 Nevyváženosti článků

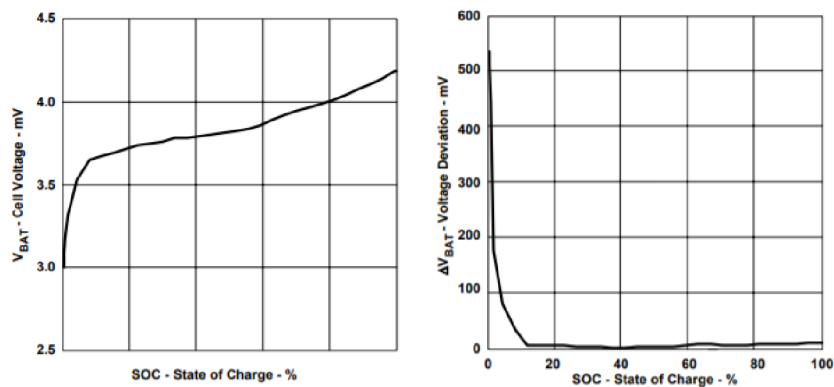
1.3.1 Nevyváženost celkových kapacit

Někdy může nastat situace, že články v sestavě mají shodné napětí po ukončení nabíjení či vybíjení, a mohou se tedy zdát být vyrovnané. Při vybíjení nebo při nabíjení ovšem rostou rozdíly mezi články a při dosažení maxima nabíjení nebo vybíjení jsou tyto rozdíly největší. V tomto případě je chyba způsobena nevyvážeností celkových kapacit článků.

Pokud budeme mít v soustavě sériově tři akumulátory, kdy kapacita dvou článků je 2200 mAh a kapacita třetího je 2100 mAh, a všechny články vybijeme o 100 mAh, při vypočtení SOC za použití rovnice (1. 1) zjistíme, že články s původní kapacitou 2200 mAh mají SOC 95.4 % a článek, který měl původní kapacitu 2100 mAh má SOC 95 %. Toto ve výsledku způsobí rozdílné OCV na člancích soustavy. Pro dosažení stejného SOC je potřeba aplikovat rozdílné nabíjecí/vybíjecí proudy na jednotlivé články. [6] Vyvažování tohoto stavu je možno provést za použití dvou metod, tzv. aktivní balancování a pasivní balancování. Podrobněji popsány níže. Pasivní balancování v podstatě přenáší přebytečnou energii článku do okolí v podobě tepla, kdežto aktivní balancování může přenášet energii mezi jednotlivými články.

1.3.2 Nevyváženost stavu nabití

Nevyváženost článků může být chápána jako rozdíl mezi napětími na jednotlivých člancích zapojených v soustavě. Projevuje se hlavně při konci nabíjení soustavy, kdy napětí na jednom článku je vyšší než na ostatních, a vybití soustavy, kdy napětí na jednom článku je nižší než na člancích jiné soustavy. Nevyváženost stavu nabití nastává pouze pokud článkem neprochází žádný proud, je tedy v klidovém stavu, a je způsobena tím, že články v soustavě jsou nabity na rozdílné hodnoty napětí, tedy rozdílné SOC. Pokud například máme soustavu o třech člancích, každý o kapacitě 2200 mAh, a dva z nich vybijeme o 100 mAh a jeden o 200 mAh, z plně nabitého stavu, poté bude SOC pro články vybité o 100 mAh 95.4 %, kdežto pro článek vybití o 200 mAh bude SOC 91 %. Výpočty jsou provedeny podle rovnice (1. 1). Je tedy patrné, že bude třetí článek nevybalancovaný o 4.4 %. Z tohoto důvodu bude na článku tři jiné OCV v poměru ku zbylým článkům. [6]



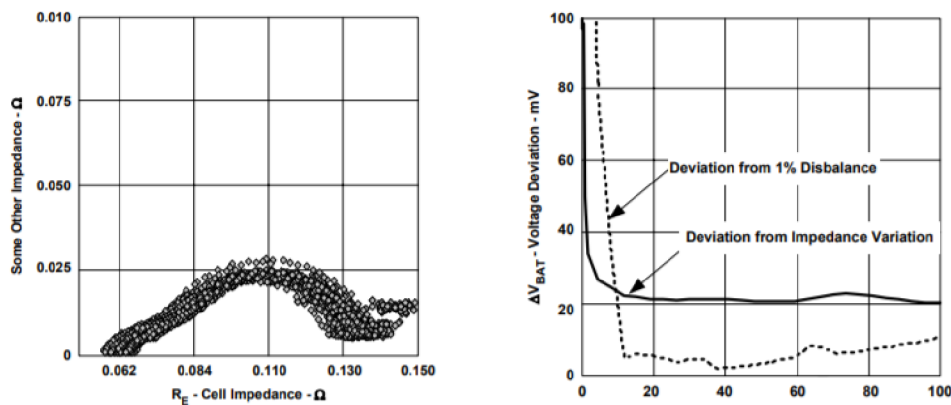
Obrázek 1.5 Závislost OCV na SOC (vlevo), závislost dOCV na SOC mezi dvěma články s 1% nevyvážeností SOC [6]

Jak z obrázku 1.5 vyplývá, je charakteristika nejvíce strmá při konci průběhu vybití, jak již bylo zmíněno výše. Je potřeba brát v potaz, že i když je procentuální změna SOC konstantní v celém průběhu vybití článku, napěťové rozdíly mezi články sestavy se mění protože závislost dOCV/dSOC se mění s SOC. [6]

1.3.3 Nevyváženost vnitřní impedance

U SOC nevyváženosti bylo zmíněno, že nastává pouze za předpokladu, že článek je v klidovém stavu. Pokud ovšem bude soustava nabíjena či vybita, vzniknou

procházejícím proudem na vnitřních impedancích jednotlivých článků napěťové úbytky. Velikost těchto úbytků je dána procházejícím proudem a velikostí vnitřních impedancí podle rovnice (1. 3). Impedance jednotlivých článků nejsou shodné a tím vznikají úbytky napětí odlišné od úbytků napětí vznikajících vlivem SOC. Pokud je procházející proud záporný (vybíjení), bude úbytek napětí vyšší u článku s vyšší impedancí a tedy napětí tohoto článku bude nižší. Naopak při nabíjení bude napětí článku vyšší. Rozdíly vnitřních impedancí mohou být z výroby, i přesto, že se jednotlivé články řadí do určitých skupin, až 15 %. Proti této nevyváženosti nepomůže žádný algoritmus, nicméně může výrazně ovlivnit balancování ostatních nevyvážeností, jmenovitě nevyváženosti SOC. Pokud budeme mít dva články nabíjející se stejným proudem s nulovou diferencí SOC, ale jeden z nich bude mít větší impedanci, tak při pokusech balancovat podle napětí U_b dojde ke špatnému vyhodnocení, a to tak že článek s vyšší impedancí bude zaznamenán jako článek s vyšší hodnotou SOC. Při odpojení nabíjecího proudu dojde k projevení nevyváženosti v OCV, která byla způsobena vyvažovacím obvodem. [6]

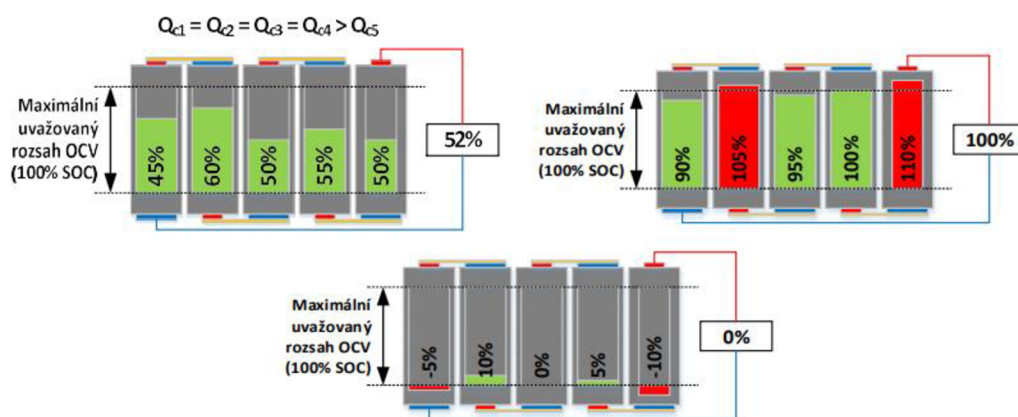


Obrázek 1.6 Rozdíly impedancí mezi 50 články pro jednoho výrobce v rozmezí 1 kHz [vlevo] až 10 mHz [vpravo] (vlevo), rozdíly napětí pro dva články s 15 % impedanční nevyvážeností při vybíjení C/2 (vpravo) [6]

1.3.4 Důsledky nevyvážeností článků

Nižší životnost

Články s vyšší hodnotou napětí jsou neustále vystavovány vyšším chemickým napětím, což způsobuje jejich rychlejší degradaci, a tedy i pokles jejich celkové kapacity. I nepatrné překročení maximálního povoleného nabíjecího napětí má za následek okamžité zrychlení degradace článku. U Li-Ion článků dochází při překročení maximálního dovoleného napětí 4.2 V o 50 mV ke zrychlení degradace až o 30 %. Při překročení napětí na hodnotu 4.35 V dochází k velmi zrychlené degradaci článku a může dojít i k bezpečnostním rizikům. I když je nejčastější příčinou degradace článků přepětí, může být degradace způsobena i podpětím. [4]



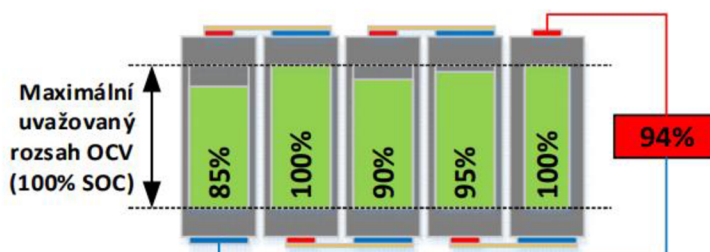
Obrázek 1.7 Výchozí stav soustavy (vlevo), přepětí (vpravo), podpětí (dole) [4]

Nižší bezpečnost

V porovnání s jinými články, mají Li-Ion akumulátory vyšší energetickou hustotu, což je nesporně jedna z jejich největších výhod, nicméně při nedodržení podmínek provozu těchto článků dochází ke snížení bezpečnosti článků. Maximální dovolené nabíjecí napětí bývá 4.35 V a při překročení tohoto napětí dochází k náhlému zvýšení vývinu tepla, které je způsobeno reakcí aktivních materiálů s elektrolytem. Tato situace může vést ke zničení, případně až k explozi článku. Při hoření či výbuchu jednoho článku se tento jev šíří řetězovým způsobem i mezi články ostatní. Z tohoto důvodu je zásadní, aby balancovaná sestava, nebo i jednotlivá baterie, měla nějakým způsobem zajištěnou ochranu proti přepětí a přehřátí. Za použití balancérů se bezpečnost akumulátorové sestavy zlepšuje, nicméně ani při použití balancérů není možné zajistit kompletní reakci přepětí ochrany. V závislostech na parametrech balancéru může přepětí ochrana občas zareagovat a odstavit nabíjecí proud. [4]

Předčasné ukončení nabíjení

Souvisí s funkcí přepětí ochrany. Nabíjení článku je ukončeno, pokud jeho napětí dosáhne maximální úrovně, jmenovitě to bývá u Li-Ion 4.25 V – 4.35 V. V tomto momentu je ale maximálně nabit pouze jeden článek ze sestavy a ostatní zůstávají pod maximálním napětím SOC. To má za následek nižší napětí v akumulované sestavě a tedy i nižší akumulovanou energii. [4]



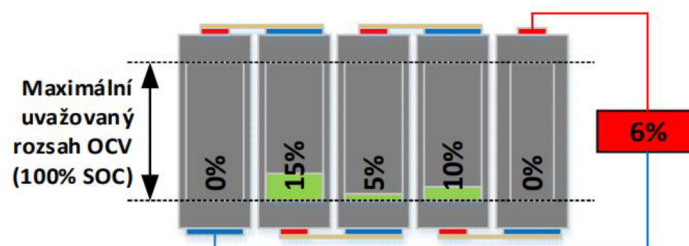
Obrázek 1.8 Limit přepětí [4]

Z obrázku 1.8 je patrné, že i když dva články dosáhly maximálního napětí, tak zbylé tři články byly nabity pouze na určitou část maximálního napětí, a tedy je celá

soustava nabita pouze na 94 %. Vyšší napětí jednoho, nebo více, článků ovšem nemůže kompenzovat nižší kapacitu ostatních článků v soustavě, a to proto, že efekt ztráty kapacity je dán i tvarem průběhu nabíjecí charakteristiky, která je strmější u konce nabíjení a tedy kapacita akumulovaná v této části charakteristiky je v porovnání se zbytkem charakteristiky, která je mnohem plošší, zanedbatelná. [4]

Předčasné ukončení vybíjení

Souvisí s funkcí podpěťové ochrany. Pokud napětí jakéhokoliv článku v soustavě klesne pod minimální dovolenou hodnotu, u Li-Ion akumulátorů asi 2.2 V – 3 V, bude ukončeno vybíjení akumulátoru. Tím je baterie chráněna proti podpětí, čímž se zlepšuje životnost článku, avšak je to za cenu vyššího napětí ostatních článků v soustavě, kdy tyto články nejsou zcela vybité. [4]



Obrázek 1.9 Limity podpětí [4]

Jak je z obrázku 1.9 patrné, tak dva články již dosáhly kompletního vybití ovšem zbylé tři mají ještě nějakou akumulovanou energii. Tato energie ovšem nemůže být nijak spotřebována, neboť limit 0 % kapacity již byl dosažen u určitých článků. To má za následek pokles kapacity soustavy. Při shodném napětí všech článků u konce nabíjení a neshodném napětí při konci vybíjení, je možné tento jev řešit přesunem energie z článků s vyšším napětím do článků s nižším napětím. Tím se prodlouží doba vybíjení akumulátorů. Jedná se o metodu bottom balancing s využitím redistribuce energie. [4]

2. VYVAŽOVACÍ OBVODY (BALANCÉRY)

Vyvažovací obvody (balancéry) je možné rozdělit na aktivní a pasivní, nebo jiné označení by mohlo být ztrátové a bezztrátové. U pasivních balancérů pracuje balancování požadovaného článku (článek s největším napětím) za pomoci připojení externího komponentu pro odvod energie z článku. To umožní průchod proudu přes tento komponent dokud není dosaženo ekvivalentního napětí na všech člancích soustavy, tedy vyváženého stavu. Toho se dosahuje nejčastěji pomocí paralelně připojených rezistorů k vyvažovanému článku, metoda bývá označována jako vybíjení pomocí vybíjecích odporů nebo resistor bleeding. Použitím této metody dochází k odvedení veškeré přebytečné energie vyvažovaného článku do okolí v podobě tepelné energie, což může mít za následek problémy s teplotním managementem vyvažovacího obvodu. Jedná se o metodu vyvažování na provedení velmi jednoduchou, levnou a nenáročnou, z tohoto důvodu nachází uplatnění především v levnějších aplikacích.

Na rozdíl od pasivních balancérů fungují aktivní balancéry na principu přenosu energie mezi články vyvažované sestavy za použití spínaných zdrojů, neboli konvertorů, čímž dosahují vyšší energetické účinnosti. Přebytečná energie článku s nejvyšším napětím je odváděna, místo do okolí v podobě tepla, do okolních článků, čímž se výrazně zlepšuje účinnost. Podle prvku použitého pro přenos energie se dělí na dva typy, kapacitní a induktivní. Kapacitní balancéry se používají pro aplikace s nižším vyvažovacím výkonem. Účinnost dosahuje nanejvýš 50 % a to z toho důvodu, že je výrazně limitována procesem nabíjení kondenzátoru, kdy dochází k výrazným energetickým ztrátám. Účinnost použití kapacitních balancérů je úměrná velikosti difference nabití mezi vyvažovanými články, přičemž se tato difference projevuje výrazněji až při konci vybíjení článků a kapacitní metoda se tedy stává účinnější v této oblasti. Energie přenesená během jednoho cyklu je tedy velmi nízká. Induktivní metody jsou na rozdíl od kapacitních nezávislé na napětí vyvažovaných článků, navíc je zde i možnost obráceného přenosu energie, tedy z článku s nižším napětím do článku s napětím vyšším, a to v závislosti na typu použitého konvertoru. Účinnost se pohybuje běžně okolo 90 % a vyvažovací proudy dosahují jednotek ampér a výše. U induktivních balancérů je možnost použití jednoduché cívky, ale taky je zde možnost použití transformátorů s dvěma, či více cívkami.

Tabulka 2.1 Rozdělení balančních obvodů

Balancování		
Pasivní	Pomocí rezistoru	
	Pomocí tranzistoru	
Aktivní	Kapacitní	Se dvěma stupni přepínaných kondenzátorů (DTSC)
		S jedním přepínaným kondenzátorem (SSC)
		S přepínanými kondenzátory (STSC)
	Induktivní	S přepínaným měničem MSFB (MSFB)
		S měničem flyback a transformátorem s více vinutími (MWFB)
		S měniči flyback (MFB)
		S měniči buck-boost (MBB)

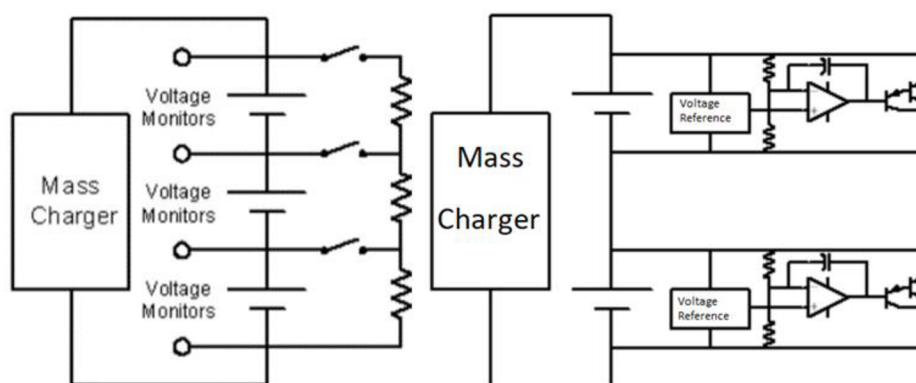
2.1 Pasivní balancéry

Jsou v případě lithiových akumulátorů nejčastěji složeny z vyvažovacích rezistorů a spínačů. Spínače jsou nejčastěji tvořeny tranzistory MOSFET. Funkce těchto tranzistorů je připínání a odpinání daných rezistorů k článkům v závislosti na stavu nabití baterie. Tyto tranzistory bývají součástí složitějších integrovaných obvodů. U integrovaných tranzistorů bývá vyvažovací proud velmi limitován a pohybuje se pouze v desítkách mA. V případě externích tranzistorů je možnost použití tranzistorů s mnohem vyšším dovoleným vyvažovacím proudem.

Pasivní balancéry se používají jen na vyvažování nevyváženosti nabití baterií. U Li-Ion akumulátorů je efekt samovybíjení na jeden cyklus velmi malý, proto postačuje na udržení vyváženosti článků jen malý vyvažovací proud. S větší kapacitou vyvažovaných článků je nutnost použití vyššího vyvažovacího proudu, a to z toho důvodu, že při vyšších kapacitách i nepatrná nevyváženost článků by vedla k dlouhodobému vyvažování, případně by k vyvážení nemuselo u malého vyvažovacího proudu nikdy dojít.

2.1.1 Pasivní balancér s rezistorem/tranzistorem (Basic Dissipative Resistor/Transistor)

Zapojení může být tvořeno buďto rezistory nebo tranzistory. Princip metody je následující, v momentu, kdy baterie dosáhne maximálního napětí (dáno napěťovou referencí a napěťovým děličem) je baterie vybíjena přes připojený rezistor nebo tranzistor. U zapojení s tranzistorem je odváděna energie pouze při konci nabíjení a díky tomu má, v porovnání se zapojením s rezistorem, menší energetické ztráty, a tedy větší účinnost. Dále zapojení s tranzistorem nepotřebuje, na rozdíl od zapojení s rezistorem, kontrolér a díky tomu jsou náklady na realizaci metody nižší. [7]



Obrázek 2.1 Zapojení pasivního balančního obvodu, vlevo za použití rezistorů, vpravo za použití tranzistorů [7]

2.2 Aktivní balancéry

Nevýhodou pasivních balancérů je, že veškerá nadbytečná energie vyvažovaných článků je promrhána v podobě tepla. Toto je možné připustit pouze v případě, že je balancování použito jen při napájení. V momentu, kdy článek se chová jako zdroj je potřeba zajistit jeho maximální využití, tedy zajistit co nejmenší plýtvání energií.

První metoda spočívá na principu zapojení samotných článků. Napěťová nevyváženost existuje pouze v případě sériového zapojení článků, a tedy za použití paralelního zapojení bychom tento problém eliminovali. Nicméně v tomto případě by měla sestava napětí pouze jednoho článku což je pro většinu aplikací nedostatečné. To by se mohlo řešit připojením soustavy na zvyšující měnič (step-up). Pokud vezmeme v potaz, že bude požadován velký výstupní výkon, tak při nízkém napětí akumulátoru bude mít měnič malou účinnost a velké rozměry. Z tohoto důvodu bude toto řešení využíváno pouze v aplikacích o nízkých výkonech.

Další metodou bývá aktivní vyvažování článků. Volbou vhodné kombinace (sérioparalelní) vyvažovaných článků dosáhneme požadovaných napětí i proudů a vyvažovací proud bude jen částí proudu odebíraného ze zátěže. Nevýhodou u tohoto řešení bývá velký počet spínacích prvků, kondenzátorů, cívek, transformátorů atd. (v závislosti na použitém typu balancéru), což má za následek vyšší rozměry obvodu ale také vyšší cenovou náročnost. Aktivní balancéry se, podle druhu použitých součástek, dělí na kapacitní a induktivní.

2.2.1 Kapacitní balancéry

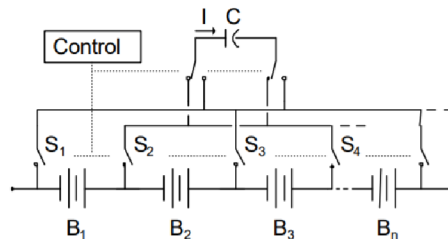
Kondenzátor je paralelně připojen k článku s nejvyšším napětím, začne se nabíjet až do doby, dokud jeho napětí není rovno napětí na článku, ke kterému je připojen. Poté se odpojí od tohoto článku a připojí se na článek s nejnižším napětím a začne do něj pumpovat proud do doby, dokud napětí nebudou vyrovnána. Protékající proud je dán rozdílem napětí a vnitřním odporem článku a spínače. Nejvíce náboje bude přeneseno při začátku a konci nabíjení a to proto, že napěťová křivka je v rozmezí ~40 % – ~80 %, poměrně plochá, a tedy i rozdíly napětí budou minimální. Díky tomu i vyvažovací proud bude velmi malý. V zapojení jsou využívány spínače a kondenzátory, kdy jejich odpor

omezuje špičkový proud a způsobuje Jouleovy ztráty, čímž snižuje výkonost celého balancéru.

Kapacitní balancéry se dají rozdělit na tři topologie: první je s jedním přepínaným kondenzátorem (Single Switched Capacitor Topology), druhá je s více přepínanými kondenzátory (Switched Capacitor Topology) a třetí je s více stupni přepínaných kondenzátorů (Double-Tiered Switched Capacitors). [7]

2.2.1.1 Přepínaný kondenzátor (Single Switched Capacitor – SSC)

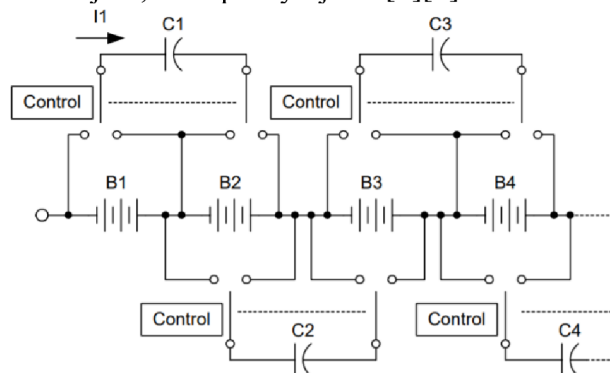
Spočívá v principu připojení prvně kondenzátoru na článek s vyšším napětím a po jeho nabití přepojení kondenzátoru na článek s nižším napětím. Metoda je označována taky jako létající kondenzátor (Flying capacitor). Pomocí spínačů je jeden kondenzátor připojen na všechny články a je mezi nimi cyklicky přepínán. Tato metoda má největší účinnost, pokud jsou balancované články zapojeny v soustavě vedle sebe, tedy pouze při balancování sousedících článků. Čím dále jsou od sebe články v soustavě tím více se snižuje účinnost metody. Pokud jsou balancovány články na koncích sestavy je účinnost nejnižší. Rychlost balancování je pouze $1/n$ a je potřeba pro n – článkovou soustavu n spínacích prvků a jeden kondenzátor. [7][8]



Obrázek 2.2 Kapacitní aktivní balancér s jedním kondenzátorem [8]

2.2.1.2 S přepínanými kondenzátory (Single-Tiered Switched Capacitors – STSC)

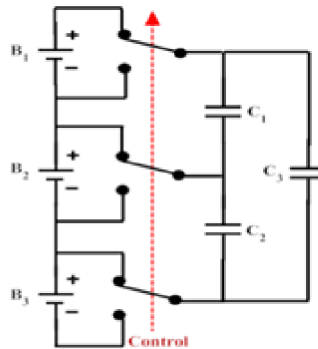
V tomto zapojení je pro vybalancování n článků zapotřebí $2n$ přepínacích článků a $n - 1$ kondenzátorů. Přepínací strategie je velmi jednoduchá, protože existují pouze dva stavy. Kondenzátory jsou připojeny vždy mezi dvěma články sestavy a dochází tedy k přelévání náboje v celé sestavě. Opět je přelévání náboje prováděno z článku s vyšším napětím do článku s nižším napětím. Výhodou je, že soustava nevyžaduje inteligentní řízení, a že může fungovat jak při nabíjení, tak i při vybíjení. [7][8]



Obrázek 2.3 Kapacitní aktivní balancér s více kondenzátory [6]

2.2.1.3 S dvěma stupni přepínaných kondenzátorů (Double-Tiered Switched Capacitors – DTSC)

Metoda je derivací metody s přepínanými kondenzátory. Rozdíl mezi metodami je ten, že zde jsou použity dva stupně kondenzátorů pro přepínání mezi jednotlivými články. K vybalancování n článků potřebuje tato metoda n kondenzátorů a $2n$ přepínacích prvků. Více přepínacích stupňů mezi články znamená více přepínacích cest, a tedy menší impedanci pro přenos náboje – menší ztráty. Hlavní výhodou této metody oproti metodě s přepínanými kondenzátory je ten, že druhý stupeň kondenzátorů redukuje čas potřebný pro přenos náboje z jednoho článku na článek jiný. Jinými slovy tedy za použití více stupňů kondenzátorů redukuje čas potřebný pro balancování soustavy. Dále může toto zapojení fungovat opět jak při nabíjení soustavy, tak i při jejím vybíjení. [9]



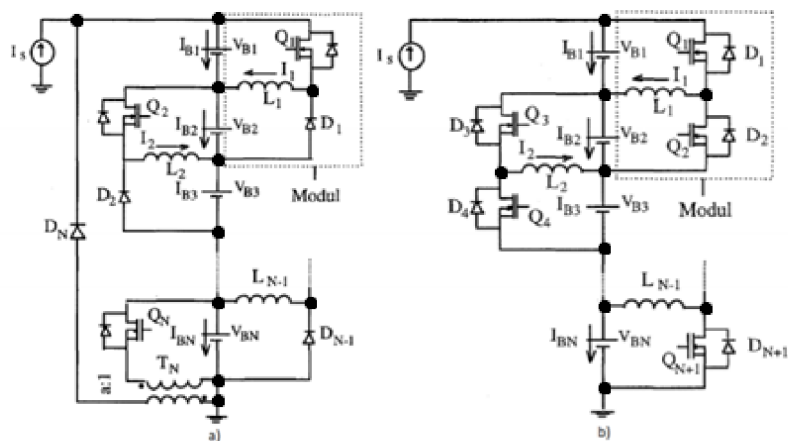
Obrázek 2.4 Kapacitní aktivní balancér s dvěma stupni přepínaných kondenzátorů [9]

2.2.2 Induktivní balancéry

Využívají pro přenos (akumulaci) energie cívek (indukčnosti) nebo transformátorů. Existuje více druhů zapojení, podle toho, zda je přenos mezi samotnými články anebo mezi každým článkem a baterií. Výhodou oproti kapacitním balancérům je, že jsou schopny pracovat i při nízké diferenci napětí. [6]

2.2.2.1 S měniči buck-boost (Multiple Buck-Boost – MBB)

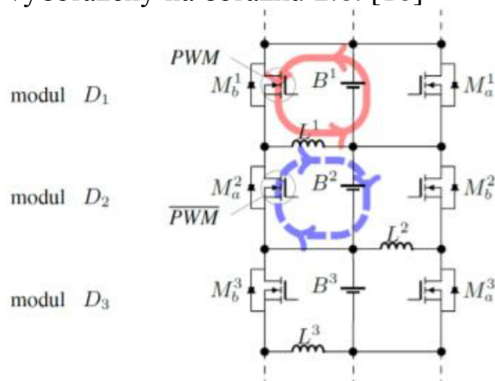
Metoda využívá k přenosu energie konvertory typu buck-boost, to znamená, že je možné energii mezi články předávat bez ohledu na jejich napětí. Kompletní zapojení se skládá z jednotlivých modulů, přičemž každý modul obsahuje tranzistor (spínací prvek), diody a indukčnosti. [10]



Obrázek 2.5 Indukční balancér s měniči buck-boost a) jednosměrný, b) obousměrný [10]

Zapojení podle obrázku 2.5 a) funguje pouze v jednom směru, tedy z článku n do článku $n + 1$. Aby bylo dosaženo přenosu energie mezi všemi prvky soustavy je potřeba připojit na poslední článek flyback transformátor. Tento transformátor přenáší energii z posledního článku zpět do celé sestavy baterie.

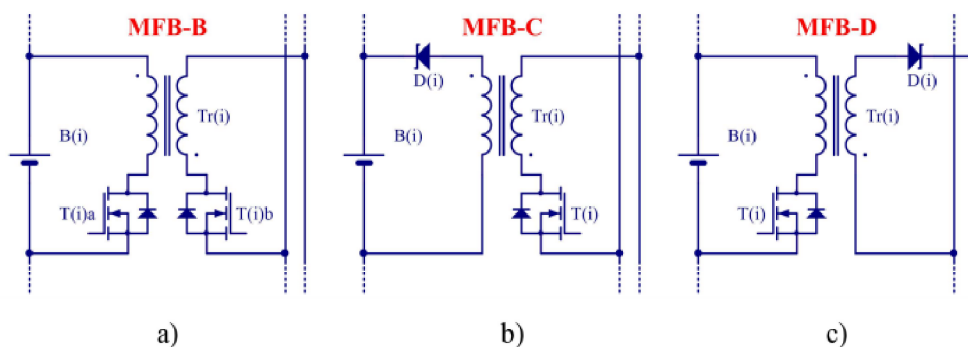
Na obrázku 2.5 b) je vyobrazeno flexibilnější zapojení. Toto zapojení umožňuje přenos energie v obou směrech a tím tedy eliminuje potřebu zapojení flyback transformátoru na poslední článek soustavy. Zde se jeden modul skládá z kombinace tranzistoru a cívky, kdy pro n počet článků je potřeba $n - 1$ cívek a $2n - 2$ tranzistorů. Princip balancování je vyobrazený na obrázku 2.6. [10]



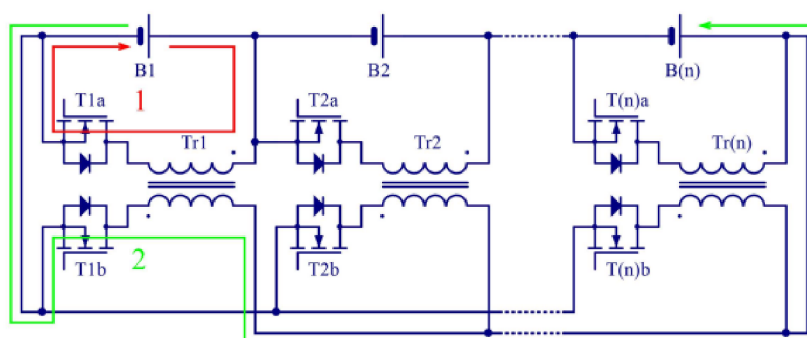
Obrázek 2.6 Princip činnosti buck-boost balacéru – obousměrného [10]

2.2.2.2 S měniči flyback (Multiple FlyBack – MFB)

K přenosu energie mezi články jsou zde využívány tzv. flyback transformátory. Transformátor je izolovaný a díky tomu tedy umožňuje přenos energie mezi článkem a soustavou, kde je za jiných podmínek velký napěťový rozdíl. Měnič je velmi jednoduchý, a proto je velmi často využíván. [11]



Obrázek 2.7 Balancér s měniči flyback a) obousměrný, b) jednosměrný – nabíjení, c) jednosměrný – vybíjení [7]



Obrázek 2.8 Princip funkce MFB – B [7]

Jako příklad bude sloužit obrázek 2.8, tedy přenos z článku B1 do sestavy. Po sepnutí daného článku (B1) a k němu příslušnému tranzistoru (T1a) začne primárním vinutím protékat proud, červená šipka. V tomto momentu dochází k ukládání energie v jádře transformátoru. Po rozepnutí tranzistoru T1a dojde k sepnutí tranzistoru T1b na sekundární straně vinutí a akumulovaná energie je předána do sestavy, zelená šipka. Toto řízení usměrňovače se nazývá synchronní, je možné řídit usměrňovač i asynchronně za použití zpětných diod tranzistorů. Pro zvýšení účinnosti je dobré zapojení doplnit o paralelní Schottkyho diody s menším napěťovým úbytkem. Pro přenos energie ze sestavy do článku je použit stejný princip, jenom směr a pořadí šipek bude obráceno. [7]

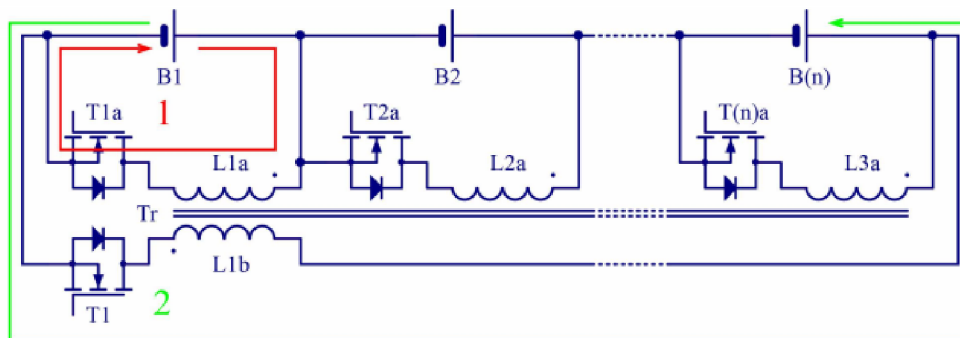
Zapojení na obrázku 2.7 a) umožňuje činnost měniče při nabíjení i vybíjení – odtud název MFB – B (Bidirectional – Both). Měníče jsou na jedné straně spojeny sériově k článkům a na druhé straně jsou paralelně spojeny se soustavou. Toto zapojení vyžaduje pro balancování n článků n transformátorů a $2n$ tranzistorů. U tohoto typu balancéru existují ale i jednosměrné verze. Verze vzniknou náhradou jedno z tranzistorů diodou, jak je patrné z obrázku 2.7 b), c). Pokud nahradíme tranzistor na primární straně, obrázek 2.7 b), tak bude balancér umožňovat vyvažování pouze při nabíjení – odtud zkratka MFB – C (Charge). Pokud ovšem nahradíme diodou tranzistor na sekundární straně, podle obrázku 2.7 c), tak bude balancér fungovat pouze u vybíjení – odtud zkratka MFB – D (Discharge). [7]

Tyto typy balancérů mají jednoduchou strukturu, velmi dobrou modularitu a díky své izolaci je výhodné je použít pro sestavy s větším počtem sériově řazených článků. Díky nezávislosti měničů je umožňováno současné vyvažování všech článků sestavy

najednou. Tranzistory a diody pracující na straně článků pracují s malým napětím a mohou tedy být poměrně levné a malé, tranzistory a diody pracující na straně soustavy pracují s napětím poměrně vyšším. Poměr napětí článku a celé baterie může být značný a tím tedy může být značný i transformační poměr. [7]

2.2.2.3 S měničem flyback a transformátorem s více vinutími (Multi – Winding FlyBack – MWFB)

Zapojení má řadu vlastností shodných se zapojením MFB, ovšem nezávislé transformátory jsou zde nahrazeny pouze jedním velkým transformátorem s větším počtem vinutí. Princip funkce je totožný k předchozímu MFB zapojení, ale hlavní rozdíl spočívá v principu přenosu energie mezi řadou sekundárních vinutí a jedním primárním vinutím. Je zde využita magnetická vazba společného transformátoru namísto vazby elektrické.

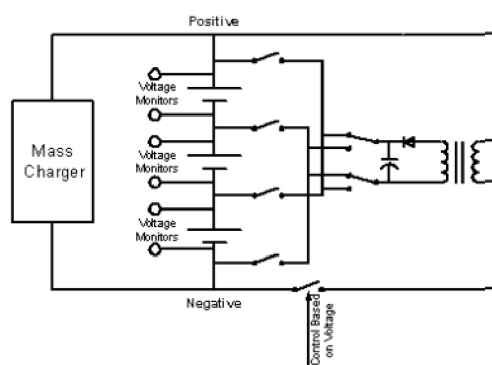


Obrázek 2.9 Zapojení měniče MWFB [7]

Balancér vyžaduje $n + 1$ tranzistorů. I u tohoto typu měniče existuje jednosměrná verze ve variantě pro nabíjení i pro vybíjení. Nahrazením tranzistoru na straně primárního vnutí bude měnič pracovat jen při nabíjení článku – odtud MWFB – C. Naopak nahrazením tranzistoru na straně sekundárního vnutí bude měnič pracovat jen při vybíjení článku – odtud MWFB – D. Při použití tohoto zapojení není možnost současného vyvažování všech článků v soustavě. Vždy je možné balancování pouze jednoho článku, což výrazně zpomaluje proces balancování. Modularita zapojení je zde taky komplikovaná ale na druhou stranu výsledná cena zapojení je nižší, a to, protože je zde menší počet tranzistorů, diod a počtu vinutí. [7][8]

2.2.2.4 S přepínaným měničem flyback (Multi-Switch FlyBack – MSFB)

Zapojení využívá pouze jednoho měniče flyback s jedním transformátorem. Transformátor je na soustavu připojen pomocí sestavy spínačů – multiplexoru. Výhodou MSFB je, že v zapojení je pouze jeden transformátor. Bohužel má toto zapojení také velké množství spínačů $n + 6$, kdy většina z těchto spínačů, $n + 2$, musí pracovat s napětím celé soustavy. Další nevýhodou oproti výše zmíněnému MFB zapojení je to, že zde není možnost vyvažování všech článků soustavy zároveň a je tedy pomalejší a méně výkonný. Zapojení existuje ve více variantách, MSFB – C pro nabíjení, MSFB – D pro vybíjení a MSFB pro obousměrný provoz. [7][8]



Obrázek 2.10 Zapojení MSFB měniče [7]

2.2.2.5 Srovnání vlastností balancérů

V následující tabulce budou shrnuty vlastnosti všech více zmíněných balancérů. Parametry budou počet cívek (L), kondenzátorů (C), transformátorů (Tr), vinutí (V), diod (D), spínačů (S) a tranzistorů (T). Vzhledem k tomu, že počty diod a tranzistorů pro spínače je velmi aplikačně náročný je v tabulce zahrnut počet spínačů namísto individuálních počtů diod a tranzistorů. Dalšími parametry jsou počet tranzistorů nebo spínačů namáhaných vysokým napětím (VNS), možnost prediktivního balancování (PB) a možnost vyvažování všech článků soustavy zároveň (Sim). Prediktivní balancování je možnost vyvažování bez ohledu na napětí vyvažovaných článků.

Tabulka 2.2 Srovnání vlastností balancérů

Typ		L	C	Tr	V	D	S	T	VNS	PB	Sim
Kap	SSC	0	1	0	0	-	n + 5	-	n + 1	N	N
	STSC	0	n - 1	0	0	-	2n	-	0	N	A
	DTSC	0	2n - 3	0	0	-	2n	-	0	N	A
Ind	MBB-B	n - 1	0	0	n - 1	2n - 2	-	2n - 2	0	A	A
	MBB-U	n - 1	0	1	n + 1	n	-	n	0	A	A
	MFB-B	0	0	n	2n	2n*	-	2n	n	A	A
	MFB-C	0	0	n	2n	n	-	n	n	A	A
	MFB-D	0	0	n	2n	n	-	n	0	A	A
	MWFB-D	0	0	1	n + 1	1	-	n	0	A	N
	MWFB-B	0	0	1	n + 1	2 + 1*	-	n + 1	1	A	N
	MWFB-C	0	0	1	n + 1	n	-	1	1	N	N
MSFB	0	0	1	2	-	n + 6	-	n + 2	A	N	

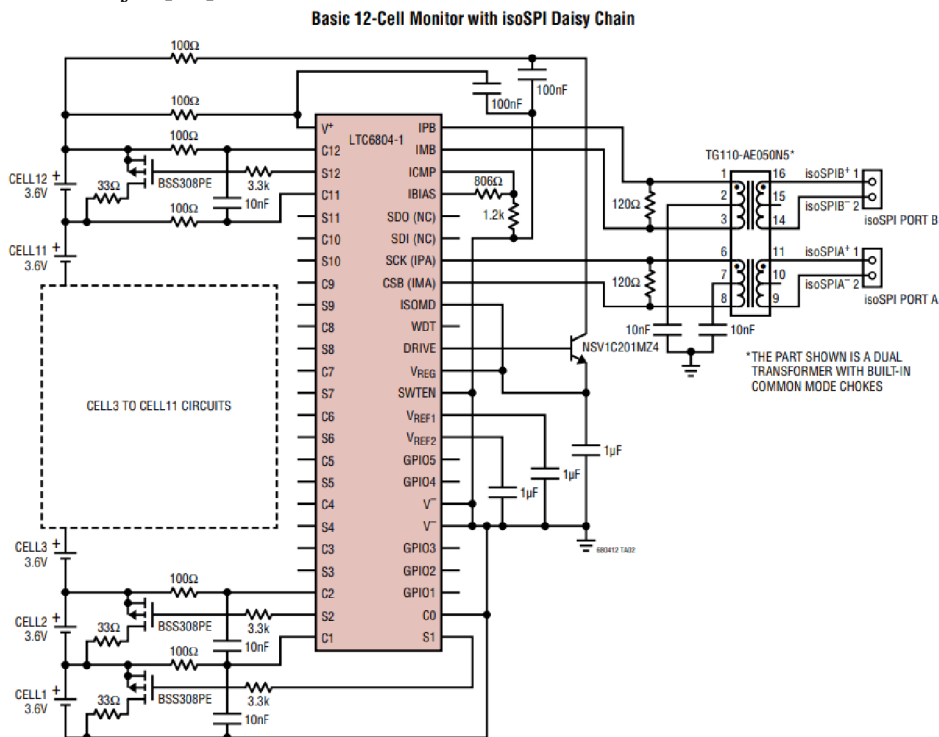
* jen pasivní, A – ano, N – ne, U – jednosměrný, C – nabíjení, D – vybíjení, B – obousměrný

3. MIKROKONTROLÉRY PRO BALANCING

Obvody, které se často používají pro návrh a výrobu balančních obvodů jsou typu LTC6804 a LT8584. Bohužel ze současného nedostatku integrovaných obvodů nebylo možné tyto obvody použít a bylo třeba vymyslet náhradní zapojení.

3.1 Obvod LTC6804

Obvod slouží k monitorování až 12 sériově zapojených článků. Velkou výhodou obvodu je jeho přesnost, maximální chyba měření je 1.2 mV, a rychlost čtení dat z jednotlivých článků, při zapojení všech 12 článků, je přibližně 290 μ s. Nicméně můžou být zvoleny i pomalejší rychlosti přenosu dat z důvodu omezení šumu. Další výhodou obvodu je ta, že je možno zapojení více obvodů do série a vytvoření tak možnosti měření velkých bateriových soustav. Každý obvod LTC6804 má vlastní rozhraní isoSPI pro vysoké rychlosti. Obvod LTC6804 má dvě možné varianty zapojení, varianta LTC6804 – 1 a varianta LTC6804 – 2. Při první variantě zapojení je zapojeno více článků do série s jedním hostujícím procesorem pro všechny články v obvodu. Při druhé variantě zapojení jsou jednotlivé články zapojeny paralelně k hostujícímu článku, a jsou tedy adresovány individuálně. Další vlastnosti zahrnují pasivní balancování pro každý článek, vestavěný 5V regulátor a 5 obecných I/O linek. Spotřeba obvodu je v režimu spánku snížena až na 4 μ A. Napájení obvodu je možné přímo z balancované soustavy nebo z externího zdroje. [13]



Obrázek 3.1 Běžně použité zapojení obvodu LTC6804 pro balancování [13]

Souhrn vlastností:

- Možnost měření až 12 článků
- Možnost sériového zapojení obvodů
- Vestavěné rozhraní isoSPI
- Chyba měření 1.2 mV
- Doba měření pro 12 článků v soustavě – 290 μ s
- Synchronizované měření napětí a proudu
- Pasivní balancování s nastavitelným časovačem
- Spotřeba v režimu spánku – 4 μ A

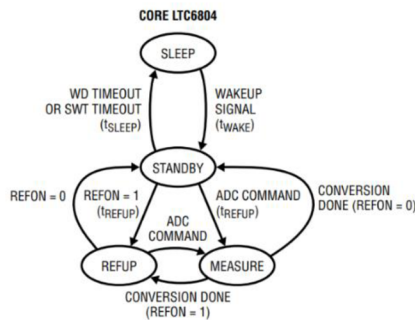
Využití obvodu:

- Elektrické a hybridní automobily
- Záložní bateriové systémy
- Vysoko výkonné přenosné systémy [13]

Popis stavů hlavního obvodu LTC6804

1. SLEEP state (režim spánku) – pracovní režim ADC je ukončen a watchdog časovač neběží, časovač pro vybíjení je buď vypnutý nebo je jeho pracovní čas ukončen, proudy ze zdroje jsou sníženy na minimum a porty isoSPI jsou ve stavu IDLE. Po zavolání příkazu WAKEUP přejde obvod do stavu STANDBY.
2. STANDBY state (režim připravený k práci) – ADC jsou vypnuty, watchdog časovač a/nebo časovač pro vybíjení běží, DRIVE pin napájí pin V_{REG} 5 V skrze externí tranzistor. Po přijetí validního příkazu z ADC, nebo po nastavení REFON bitu na logickou 1 v CRG, se IC pozastaví na určitou dobu (t_{REFUP}), z důvodu dovolení spuštění reference, a následně přejde do stavu REFUP nebo MEASURE. Pokud nedorazí žádný WAKEUP signál po celou dobu t_{SLEEP} (kdy oba watchdog časovač a časovač pro vybíjení doběhly ke konci) se obvod LTC6804 navrátí do stavu SLEEP. Pokud je časovač pro vybíjení vypnutý je důležitý pouze watchdog časovač.
3. REFUP state – k dosažení tohoto stavu je potřeba aby pin REFON, v CRG, byl nastaven na logickou 1 (nastavení se provádí pomocí příkazu WRCFG). ADC jsou vypnuty. Reference je zapnuta, takže je možné, aby LTC6804 mohl zahájit přenos rychleji, než by bylo možné ze STANDBY stavu. Po přijetí validního signálu z ADC, přejde IC do stavu MEASURE, jinak přejde LTC6804 zpět do stavu STANDBY po nastavení pinu REFON na logickou 0, a to buďto manuálně nebo automaticky když skončí watchdog časovač, při tomto stavu přejde LTC804 přímo do stavu SLEEP, pokud oba časovače skončily.
4. MEASURE state (stav měření) – LTC6804 provádí ADC převody v tomto stavu, tedy oboje jak reference, tak i ADC jsou zapnuty. Po dokončení přenosů z ADC přejde LTC6804 do buďto stavu STANDBY nebo REFUP, v závislosti na

REFON bitu. Další ADC přenosy můžou být zahájeny nastavením logické 1 na bit REFON aby se využil stav REFUP. Je nutné podotknout, že přenosy, které nejsou z ADC, neumožní LTC6804 aby přešel do stavu MEASURE. [13]

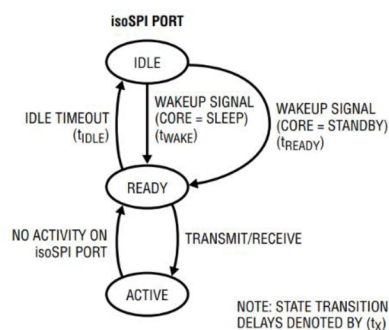


Obrázek 3.2 Stavový diagram pro stavy hlavního obvodu LTC6804 [13]

Popis stavů vestavěného isoSPI obvodu

Je nutné podotknout, že obvod LTC6804 – 1 má dva isoSPI porty (A, B), zatímco obvod LTC6804 – 2 má port pouze jeden.

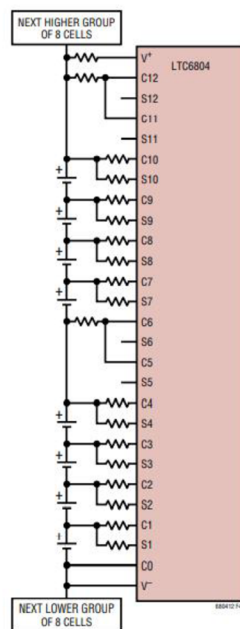
1. IDLE state (klidový režim) – isoSPI porty jsou vypnuty, po přijetí WAKEUP signálu na port A přejde isoSPI do stavu READY. Tento přechod se odehrává velmi rychle (v době t_{READY}) pokud je hlavní obvod ve STANDBY stavu, protože piny DRIVE a V_{REG} jsou již v pracovním režimu. Pokud je hlavní obvod ve stavu SLEEP při přijetí WAKEUP signálu, bude trvat přechod do stavu READY dobu t_{WAKE} .
2. READY state (režim připravenosti) – isoSPI porty jsou připraveny ke komunikaci. Port B je připraven pouze pro obvod LTC6804 – 1. Proud v tomto momentu závisí na tom, zda je použit obvod LTC6804 – 1 nebo LTC6804 – 2, na stavu pinu ISOMD a na $R_{BIAS} = R_{B1} + R_{B2}$, což jsou externí rezistory připojené k pinu IBIAS. Pokud nedorazí žádný WAKEUP signál na port A po dobu delší, než je $t_{IDLE} = 5.5$ ms, přejde obvod do stavu IDLE. Pokud jsou přenášena nebo přijímána data, přechází obvod do stavu ACTIVE.
3. ACTIVE state (aktivní režim) – obvod přenáší/přijímá data za použití jednoho, nebo obou isoSPI portů. V tomto stavu spotřebovává sériové rozhraní největší množství energie. Proud zdroje se zvyšuje v závislosti na frekvenci, jak se hustota pulsů isoSPI zvyšuje. [13]



Obrázek 3.3 Stavový diagram pro stavy vestavěného obvodu isoSPI obvodu LTC6804 [13]

Použití LTC6804 s méně než 12 články k balancování

Pokud je obvod LTC6804 napájen z balancovaného obvodu, je minimální možný počet článků k balancování dán napěťovými požadavky obvodu LTC6804. Napětí na pinu V^+ musí být aspoň 11 V. Při použití LTC6804 obvodu k monitorování 12 článků jsou tyto články rozděleny do dvou skupin po 6 článcích kdy jsou měřeny za použití dvou interních multiplexorů a ADC. Abychom optimalizovali synchronizaci v aplikaci, kdy se balancuje méně než 12 článků, je potřeba rovnoměrně rozmístit nepoužité piny C mezi vrch druhého multiplexoru (C12) a konec prvního multiplexoru (C6). Pokud by byl monitorován lichý počet článků, je potřeba aby vrchní multiplexor měl připojen menší počet článků. Nepoužité piny by měly být spojeny s ostatními nepoužitými piny na stejném multiplexoru a poté by měly být připojeny k článku přes 100Ω rezistor. Nepoužité vstupy budou číst 0 V pro tyto piny. [13]

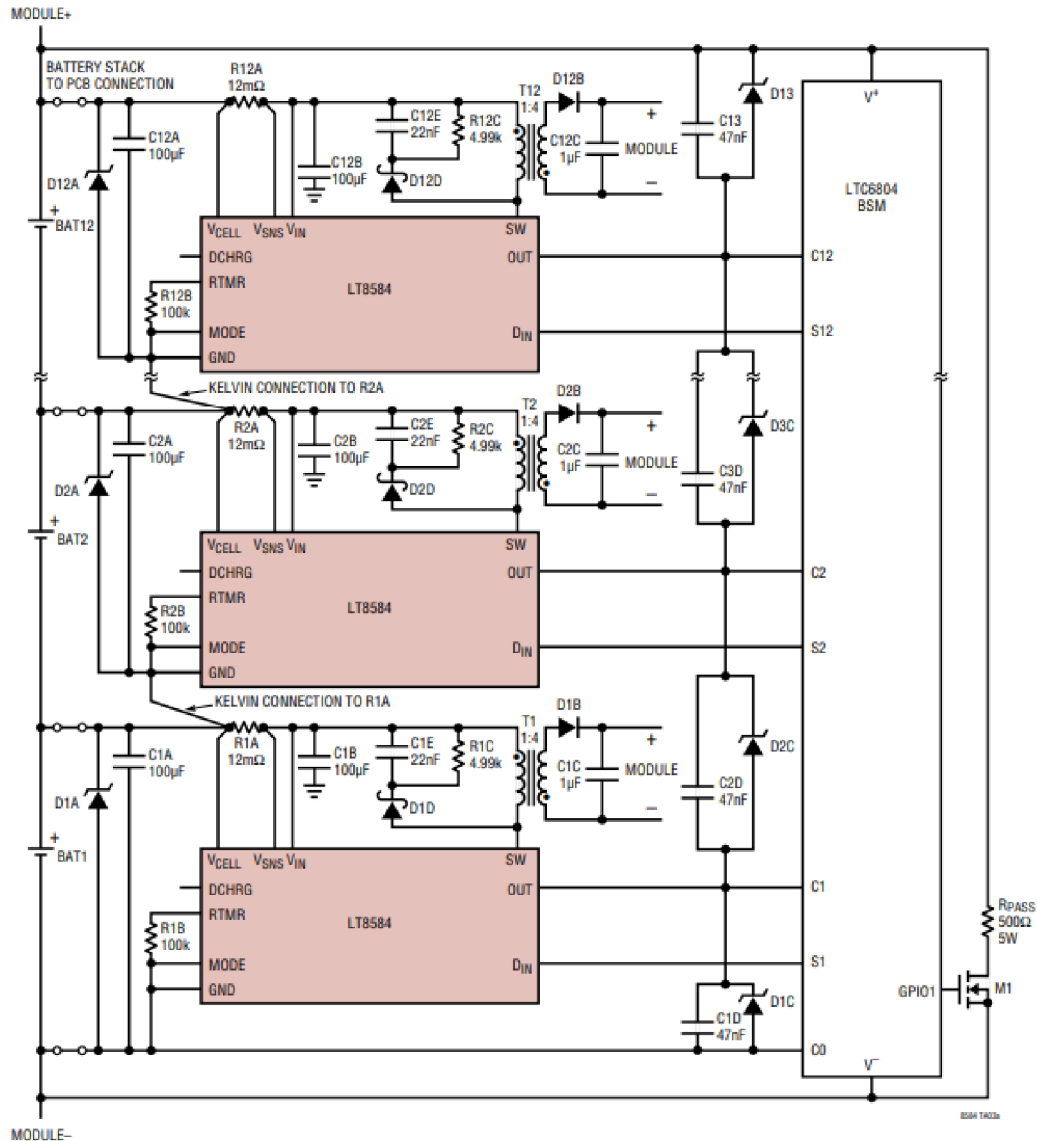


Obrázek 3.4 Balancování 8 článků [13]

3.2 Obvod LT8584

Obvod je monolitický flyback DC/DC měnič navržen k aktivnímu balancování vysokonapěťových bateriových soustav. Vysoká účinnost přepínacího regulátoru značně zvyšuje dosažitelný balancující proud, a značně snižuje generaci tepla.

V obvodu je zakomponován interní spínač 6 A, 50 V. Jako napájení pro tento spínač slouží balancovaný článek, čímž se snižuje náročnost schémat potřebných pro externí spínač. Pokud je obvod LT8584 vypnut, je proud odebíráný z článku méně než 20 nA. [14]



Obrázek 3.5 Běžné použití obvodu LT8584 pro balancování [14]

Souhrn vlastností

- Typický vybíjecí proud je 2.5 A
- Integrovaný spínač 6 A, 50 V
- Kompatibilita s rodinou obvodů LTC680x – netřeba dalšího softwaru k připojení

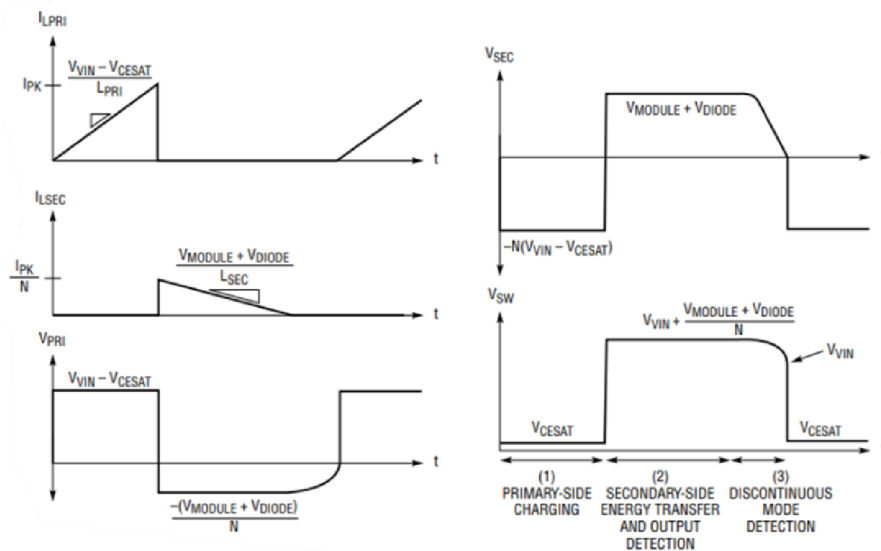
- Volitelné obvody k monitorování proudu a teploty
- Nízký proud při vypnutí
- Izolované balancování
- Může být zapojeno více obvodů paralelně pro větší vybíjecí proud

Využití obvodu

- Aktivní balancování bateriových článků
- Elektrické a hybridní automobily
- Systémy pro ukládání energie [14]

Pracovní stavy obvodu LT8584

1. Nabíjení primární strany vinutí: Pokud je spínač sepnut, vnitřní NPN začne spínat, čímž přinutí napětí ($V_{IN} - V_{CESAT}$) na primární vinutí. To má za následek lineární nárůst proudu na primární straně vinutí. Vstupní napětí primární strany je zrcadleno na sekundární straně vinutí jako ($-N \times (V_{IN} - V_{CESAT})$), což neumožňuje tok proudu v sekundárním vinutí přes diodu připojenou na sekundární straně vinutí. Tímto způsobem je energie ukládána v jádru transformátoru.
2. Přenos energie na sekundární stranu vinutí: Po dosažení proudového limitu se spínač rozepne a obvod přejde do druhého pracovního stavu. Energie uložená v transformátoru je uvolněna přes diodu připojenou na sekundární straně vinutí a proud teče do výstupního kondenzátoru a/nebo bateriového článku. V této době je výstupní napětí a úbytek na diodě přenášén zpět na primární stranu vinutí.
3. Mód přerušované detekce: Během přenosu energie na výstupní kondenzátor a/nebo bateriový článek, má napětí na primární straně vinutí hodnotu ($(V_{MODULE} + V_{DIODE}) / N$). [14]

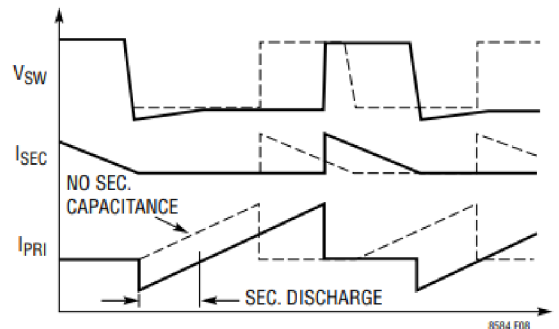


Obrázek 3.6 Pracovní stavy obvodu LT8584 [14]

Externí komponenty

Pro použití obvodu LT8584 k balancování je potřeba k němu připojit ještě několik externích komponentů. Tyto komponenty jsou transformátor, dioda/diody, V_{IN} kondenzátor, R_{SNS} rezistor (pro měření vybíjecího proudu), R_{RTMR} rezistor (k použití sériového módu), a v některých případech RCD tlumič.

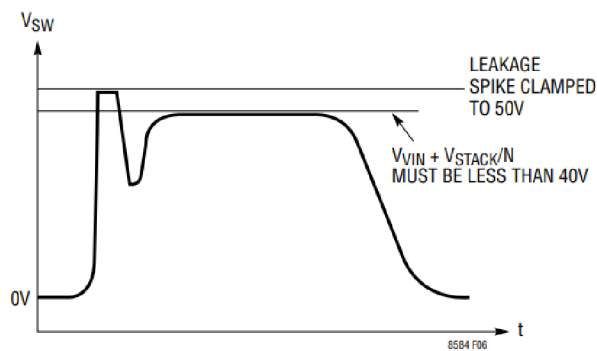
1. Transformátor: Transformátor by měl být zvolen tak, aby jeho účinnost přenosu energie byla vyšší než 80 %, tím se zajistí nižší ztráty a zmenší se tím plocha potřebná pro PCB. Správně zvolený transformátor balancuje ztráty v jádru se ztrátami ve vinutí. Při návrhu transformátoru je dobré zvolit mezní pracovní frekvenci v rozsahu 100 kHz až 150 kHz, tyto hodnoty se volí z důvodu velikosti transformátoru, aby byl co nejmenší, a přepínacích ztrát. Poměr vinutí je dán poměrem celkového napětí a napětí konkrétního článku. Průřez vinutí je dán vybíjecím proudem.



Obrázek 3.7 Vliv kapacity sekundárního vinutí transformátoru [14]

Hodnotu proudu je možné navýšit zvýšením poměru mezi časem při sepnutí, t_{ON} , a časem při vypnutí, t_{OFF} . Pro co nejvyšší účinnost přenosu energie je potřeba, aby střída byla přibližně 0.5. Některé aplikace vyžadují pro svůj chod nižší hodnoty proudu z důvodu limitace napájecí schopnosti nebo limitace odvádění tepla. Indukčnost primárního vinutí transformátoru by se měla pohybovat v rozmezí od 2.2 μH do 10 μH . Nižší hodnoty zaručují správnou detekci otevřeného obvodu na sekundárním vinutí transformátoru. Vyšší hodnoty zaručují, že detektor vysoké impedance nevyhlásí falešnou chybovou hlášku.

2. Rozptylová indukčnost: Tato indukčnost způsobuje zvýšené napěťové zatížení na spínači. Obvod LT8584 má vestavěný omezovací obvod pro omezení tohoto napěťového zatížení na určitou hranici. Rozptylová indukčnost by měla být co nejmenší pro získání co největší účinnosti přenosu energie. Aby toho bylo docíleno, je potřeba, aby obě vinutí transformátoru měly co největší magnetickou vazbu. Transformátory s poměrem závitů vyšším, než je 8 obvykle vyžadují RCD tlumič k omezení tohoto napěťového zatížení a zvýšení účinnosti přenosu energie. Vhodné hodnoty pro rezistor a kondenzátor by mohly být např. 4.99 k Ω a 22 nF.



Obrázek 3.8 Průběh napětí na vnitřním spínači [14]

3. Výstupní dioda/diody: Diody jsou vybírány v závislosti na maximálním opakovaném napětím s obrácenou polaritou (V_{RRM}) a na velikosti maximálního propustného proudu, $I_{F(AVG)}$. Napětí V_{RRM} by mělo, při nejmenších hodnotách, přesahovat aspoň hodnoty ($V_{MODULE} + (N \times V_{IN})$). Vnitřní ochrana proti přepětí v obvodu LT8584 vybavuje při hodnotách napětí 50 V, a tudíž napětí V_{RRM} by mělo přesáhnout hodnoty ($N \times (50 + V_{VIN})$), aby bylo zabráněno poškození diody při přepětí. Je nutné podotknout, že parazitní špičky napětí obvykle způsobí, že přepětěová ochrana vybaví přibližně o 10 % dříve. Maximální propustný proud diodou by měl být vyšší než průměrný zkratový proud obvodu. Nejvyšší proud diodou nastává na nízkých hladinách napětí a snižuje se s nárůstem napětí. Dioda by měla být zvolena tak aby měla dobu zotavení menší než 75 ns, měla minimální záporný proud a minimální přechodovou kapacitu.
4. Kondenzátor na výstupu transformátoru: Každý flyback transformátor musí mít keramický kondenzátor na svém výstupu. Měl by být navržen tak, aby byl plně nabit po přibližně 10 spínacích cyklech, při nabíjení na nominální hodnotu napětí, $V_{OUTPUT,NOM}$. Hodnota přepětí pro kondenzátor musí být vyšší než $(50 \times N)$. Tato hodnota bývá obvykle specifikována jako násobek jmenovité hodnoty napětí kondenzátoru.
5. Bypass kondenzátory: Obvod LT8584 by měl být vybaven třemi bypass keramickými kondenzátory vysoké kvality, C_{VIN} , C_{VCELL} a C_{TRAN} . Kondenzátor C_{VIN} by měl být umístěn blízko V_{IN} a jeho hodnota by se měla pohybovat v rozmezí mezi 1 μF a 4.7 μF . Kondenzátor C_{TRAN} musí být umístěn blízko primárního vinutí transformátoru a IC lokální země. Hodnoty kapacity by se měly pohybovat v rozmezí 47 μF a 100 μF . Keramické kondenzátory jsou vhodnou volbou z důvodu jejich hustoty, nízké sériové impedance a velmi nízkému parazitnímu proudu. Je nutné podotknout, že tento proud na dané napětěové hladině klesá s navýšením jmenovitého napětí kondenzátoru.
6. R_{SNS} rezistor: Tento rezistor by měl být použit pouze při používání obvodu LT8584 v sériovém módu. V jednoduchém módu je třeba spojit V_{SNS} a V_{CELL} k V_{IN} . Maximální napětí mezi V_{VSNS} a V_{VCELL} je 50 mV. Je doporučeno navrhnout

toto napětí na hodnotu 30 mV. Není doporučeno navrhovat toto napětí pod hodnotu 20 mV, protože vstupní napětí diferenciálního zesilovače má větší zkreslení na nižších hodnotách napětí.

7. R_{RTMR} rezistor: RTMR pin je používán pouze v sériovém módu, při jednoduchém módu je spojen se zemí. Hodnota rezistoru by měla být dána podle rovnice (3. 1):

$$R_{RTMR} = 0.015 \cdot t_W^2 + 5.9 \cdot t_W - 1.1 [k\Omega] \quad (3. 1)$$

8. Kompenzace pro pin OUT: Pin OUT musí mít vždy připojen kompenzační kondenzátor C_{OUT} . Zesilovač OUT je vnitřně kompenzován tak, aby unesl kapacity v rozmezích od 20 nF do 220 nF. Je vhodné využít 47 nF pro většinu aplikací. Rychlejší doba zesílení může být dosažena přidáním rezistoru v sérii s externím filtrovacím kondenzátorem. Vhodné použití 4.7nF kondenzátoru s 60Ω rezistorem. Je nutné podotknout, že v sériovém módu jsou kondenzátory připojeny mezi přilehlé piny OUT obvodu LT8584. Toto zdvojnásobuje kompenzující kapacitu. Další filtrování může být potřebné pro hlučné prostředí.
[14]

4. NÁVRH BALANCÉRU

Návrh byl ovlivněn současným nedostatkem integrovaných obvodů. Původní návrh pro zapojení zahrnoval obvody typu LTC6804 – 1/LTC6804 – 2 jako hlavní řídicí jednotky a obvody LT8584 jako obvody sloužící pro sledování stavů jednotlivých článků bateriové soustavy. Nicméně z důvodu špatné dostupnosti integrovaných obvodů v dnešní době bylo třeba vymyslet jiný typ zapojení, tedy místo aktivního balancéru, řízeného výše zmíněnými obvody, byl vytvořen pouze pasivní balancér řízen modulem Arduino.

Zapojení využívající modul Arduino je možné pro danou aplikaci použít z toho důvodu, že použitý modul Arduino Nano obsahuje 8 analogových portů, přes které budou snímány informace z jednotlivých akumulátorů, a zapojení bateriové soustavy bude využívat 8 sériově řazených článků.

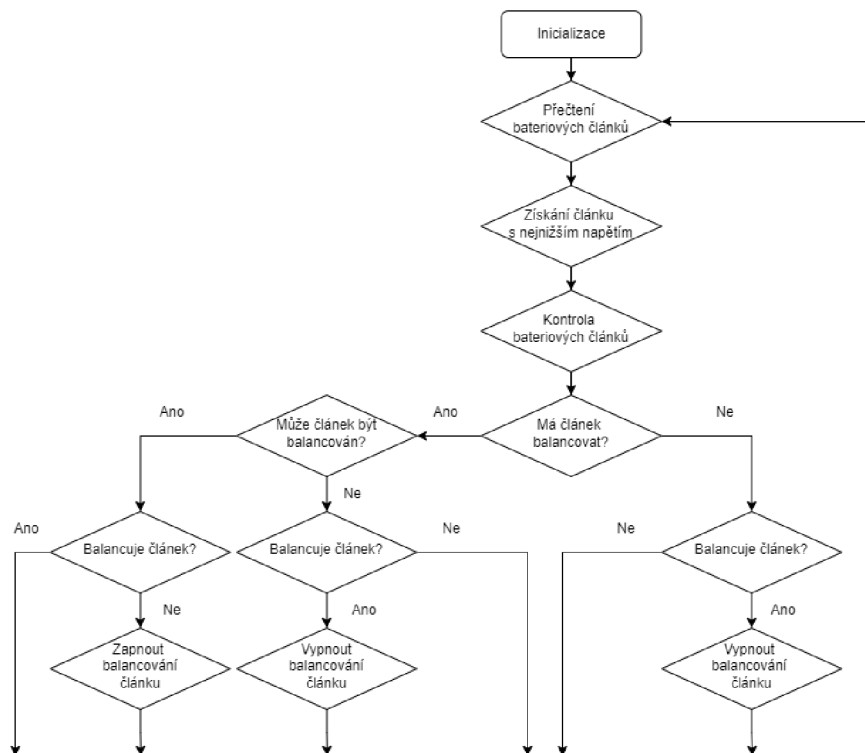
Návrh byl rozdělen na dvě části, část sloužící ke spínání zátěžných/vybíjecích rezistorů a část sloužící ke snímání aktuálních hodnot napětí z jednotlivých článků. Blíže popsány níže.

4.1.1 Princip činnosti balancéru

Chod balancéru byl navržen tak, aby jej bylo možné použít při nabíjení bateriové soustavy i při jejím vybíjení. Pro spuštění balancování je potřeba připojit napájení k řídicímu modulu Arduino. Po připojení napájení a nahrání programu do modulu Arduino je spuštěna smyčka programu, nejprve se získají údaje z článků a poté podle potřeby bude spuštěno balancování pro dané články. První podmínka pro spuštění balancování je stav, kdy je mezi nejméně nabitým článkem a daným článkem odchylka napětí větší než zadaná, druhá podmínka je kontrola vůči maximálnímu dovolenému napětí, pokud napětí daného článku dosáhne této hodnoty, je opět spuštěno balancování. Těmito podmínkami je zajištěno balancování při nabíjení i při vybíjení soustavy.

Při používání bateriové soustavy jako zdroj může dojít k nadměrnému vybití článků této soustavy. Pro informování uživatele je zabudována kontrola pro tuto situaci. Pokud všechny články dosáhnou minimální dovolené hodnoty napětí je spuštěna vizuální indikace, v podobě zelené LED, upozorňující uživatele pro odpojení zátěže.

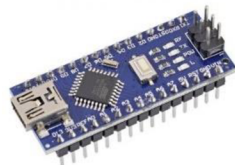
Obdobně pokud je bateriová soustava nabíjena, může dojít k nadměrnému nabití článků v soustavě. Opět je zabudována kontrola pro tuto situaci. Pokud všechny články v soustavě dosáhnou maximální dovolené hodnoty napětí je spuštěna vizuální indikace, v podobě modré LED, upozorňující uživatele na odpojení napájení.



Obrázek 4.1 Blokový diagram programu

4.1.2 Použité součástky

1. Arduino Nano: Arduino Nano V3.0 R3 – klon



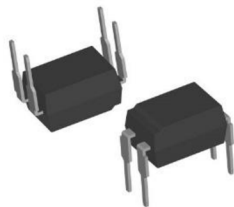
Obrázek 4.2 Arduino Nano [15]

2. Bateriové články: Použité články jsou typu NCR18650A o kapacitě 3100 mAh.



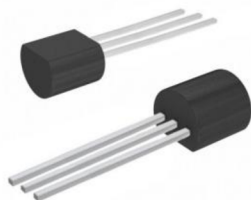
Obrázek 4.3 Bateriový článek NCR18650A [15]

3. Optočlen: Použitý optočlen byl zvolen typu THT PC817X3NSZW, kdy hlavní důvody pro volbu byly cenová dostupnost, cena se pohybuje ~6 Kč za kus, a dobré CTR, které se pohybuje v rozmezí udávané výrobcem 200 – 400 %.



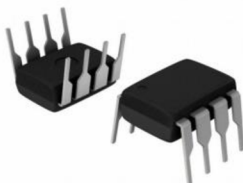
Obrázek 4.4 Optočlen THT PC817X3NSZW [15]

4. Tranzistor: Tranzistor byl volen tak, aby byl schopen spínat potřebný vybíjecí proud. Byl tedy zvolen typu PN2222A, což je bipolární tranzistor, který by měl být schopen spínat kolektorové proudy až 1 A kontinuálně. Dalším faktorem pro volbu byla opět cena pohybující se ~5 Kč za kus.



Obrázek 4.5 Tranzistor PN2222A [15]

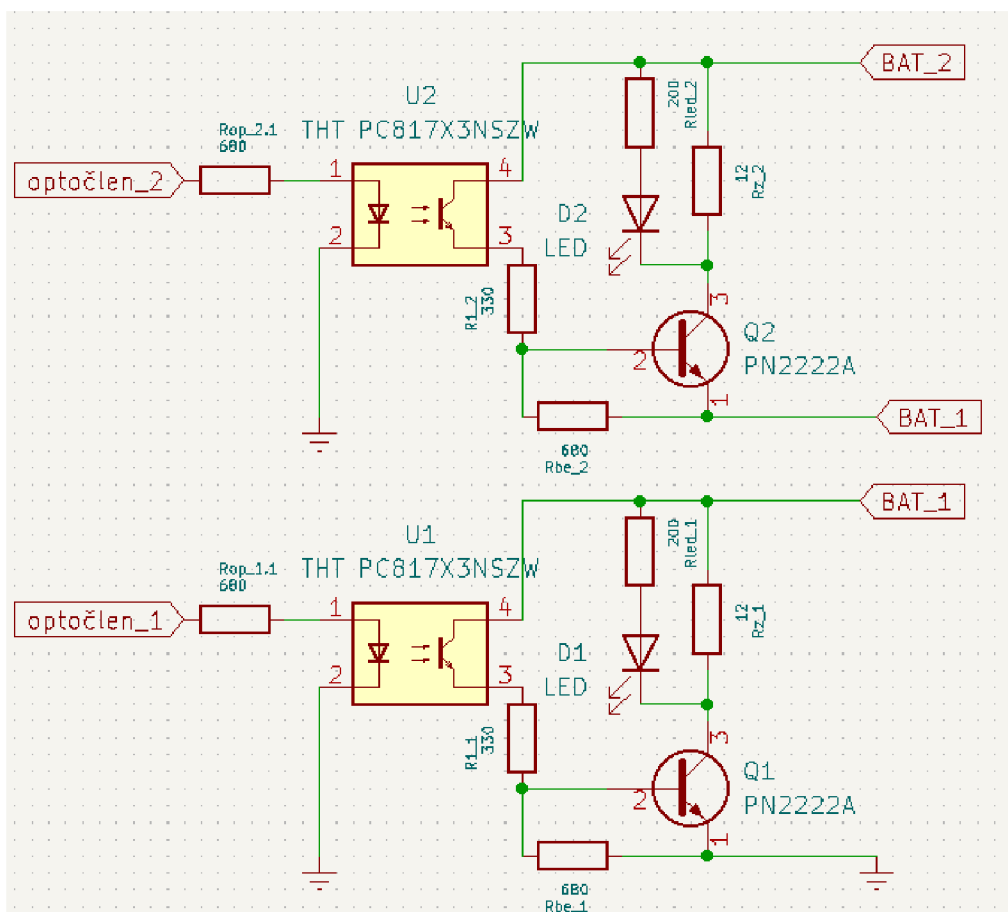
5. Operační zesilovač: Operační zesilovač byl volen tak, aby jej bylo co možná nejlépe využít jako měřící jednotku pro jednotlivé články soustavy. Zvolený typ operačního zesilovače byl TLC272CP, tento model obsahuje 2 operační zesilovače a jeho cena se pohybuje ~33 Kč za kus.



Obrázek 4.6 Operační zesilovač TLC272CP [15]

6. Rezistory: Použité odpory byly voleny tak, aby byly dosaženy požadované proudy, přenosové poměry a aby byl dodržen jmenovitý ztrátový výkon.
7. LED: Použité LED byly zvoleny pouze jako indikace, a tedy na ně nebyly kladeny žádné speciální požadavky.

4.1.3 Část obvodu pro spínání zátěže



Obrázek 4.7 Vybíjecí část obvodu pro 1. a 2. článek soustavy

Návrh součástek

Při návrhu bylo potřeba dbát na požadavky co nejkratší doby, tedy aby při nevyváženosti kapacit mezi články soustavy, např. 10 %, byla doba balancování co nejkratší, maximálně 1 h.

Při znalosti nevyváženosti a potřebné doby je možné zjistit nejmenší potřebný vybíjecí proud.

$$I_{vyb,min} = \frac{nevyváženost}{100} \cdot Q_{článku} \cdot t = \frac{10}{100} \cdot 3100 \cdot 1 \quad (4.1)$$

$$= 310 [mA]$$

Vybíjecí proud má tuto hodnotu pouze za předpokladu, že články jsou plně nabity. Při menší hodnotě napětí klesne hodnota balančního proudu a zvýší se tak doba balancování.

Abyste bylo možné modul Arduino využívat ke spínání tranzistorů, byl obvod navržen tak, že spínání tranzistorů je prováděno pomocí optočlenů. Zvolený optočlen zajistí oddělení zátěžné části obvodu od části obvodu obsahující modul Aduino. Proud na vstupu do optočlenu byl navržen tak, aby se pohyboval kolem 50 % hodnoty proudu do báze tranzistoru. Z datasheetu tranzistoru [16] je možné zjistit, že potřebná hodnota proudu pro spínání vybíjecího proudu 310 mA je ~10 mA, tedy vstupní proud do

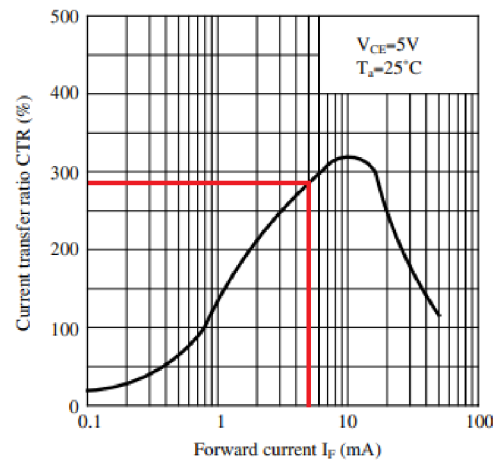
optočlenu by se měl pohybovat kolem 50 % této hodnoty, zvolena hodnota $I_F = 5.5 \text{ mA}$. Mezi digitální pin modulu Arduino a vstup optočlenu je potřeba připojit rezistor pro získání požadovaného proudu, tento rezistor je značen $R_{op_1.1}$. Při návrhu odporu je třeba ještě uvažovat úbytek napětí na diodě v optočlenu, podle datasheetu [16] je tento úbytek při hodnotách $I_F = 5.5 \text{ mA}$ roven 1.2 V .

$$R_{op_1.1} = \frac{5 - U_F}{I_{F,\dot{z}}} = \frac{5 - 1.2}{5.5 \cdot 10^{-3}} = 691 [\Omega] \quad (4.2)$$

Zvolen rezistor o hodnotě 680Ω . Skutečný proud na vstupu optočlenu je poté následující.

$$I_F = \frac{5 - U_F}{R_{op_1.1}} = \frac{5 - 1.2}{680} = 5.59 [\text{mA}] \quad (4.3)$$

Při tomto proudu má CTR optočlenu hodnotu téměř 300 %, což je vyhovující.



Obrázek 4.8 CTR převod optočlenu [17]

Dále je potřeba navrhnout odpor R_{1_1} . Pro tento návrh bylo nejprve potřeba zvolit odpor na přechodu tranzistoru báze-emitor R_{be_1} , zvolen na hodnotu 680Ω , a to z důvodu, aby přes něj protékal velmi malý proud a neovlivňoval tak nějak příliš hodnotu proudu tekoucí do báze tranzistoru.

$$I_{R_{be}} = \frac{0.6}{R_{be_1}} = \frac{0.6}{680} = 882.4 [\mu A] \quad (4.4)$$

Dalším krokem je návrh velikosti odporu R_{1_1} . Pro tento návrh je potřeba nejprve zjistit hodnotu napětí na tomto rezistoru.

$$U_{R_{1_1}} = U_{max} - 0.6 = 4.2 - 0.6 = 3.6 [V] \quad (4.5)$$

Kde U_{max} je napětí článku, při kterém má obvod sepnout/začít balancovat a hodnota 0.6 V je napětí na přechodu báze-emitor tranzistoru. Ze znalosti požadovaného bazového proudu tranzistoru lze poté dopočítat hodnotu proudu tekoucí přes rezistor R_{1_1} .

$$I_{R_{1_1}} = I_{B,\dot{z}} + I_{R_{be}} = 10 \cdot 10^{-3} + 882.4 \cdot 10^{-6} = 10.8824 [\text{mA}] \quad (4.6)$$

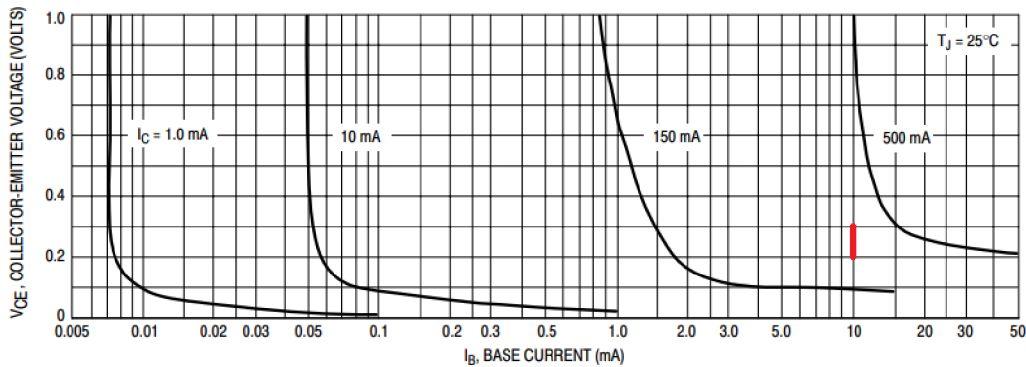
Při znalosti proudu tekoucího přes rezistor R_{1_1} a napětí na tomto rezistoru je možné dopočítat jeho hodnotu.

$$R_{1,1} = \frac{U_{R_{1,1}}}{I_{R_{1,1}}} = \frac{3.6}{10.8824 \cdot 10^{-3}} = 331 [\Omega] \quad (4.7)$$

Hodnota rezistoru zvolena na 330 Ω . Skutečná hodnota bázového proudu je poté.

$$I_B = \frac{U_{R_{1,1}}}{R_{1,1}} - I_{R_{be}} = \frac{3.6}{330} - 882.4 \cdot 10^{-6} = 10.03 [mA] \quad (4.8)$$

Jako další krok je potřeba navrhnout hodnoty rezistorů připojených ke kolektoru tranzistoru. Jsou to rezistor pro LED a zátěžný rezistor. Pro dané hodnoty proudu do báze a vybíjecího proudu je možné z datasheetu [16] vyčíst, že saturační napětí U_{CE} tranzistoru se bude pohybovat mezi hodnotami 0.2 V až 0.3 V.



Obrázek 4.9 $U_{CE} - I_B$ charakteristika tranzistoru PN2222A [16]

Toto jsou ovšem hodnoty pro minimální vybíjecí proud, skutečný vybíjecí proud bude o něco vyšší, proto se pro návrh počítalo s hodnotami saturačního napětí 0.35 V. Návrh odporu pro LED je omezen maximálním proudem, který LED je schopna snést, použité LED mají maximální svítivost při protékajícím proudu 20 mA.

$$R_{led,1} = \frac{U_{max} - U_{CE}}{I_{LED,max}} = \frac{4.2 - 0.35}{20 \cdot 10^{-3}} = 192.5 [\Omega] \quad (4.9)$$

Hodnota rezistoru zvolena na 200 Ω . Hodnota zátěžného rezistoru se poté dopočte podle znalosti minimálního vybíjecí proudu.

$$R_{z,1} = \frac{U_{max} - U_{CE}}{I_{vyb,min}} = \frac{4.2 - 0.35}{310 \cdot 10^{-3}} = 12.42 [\Omega] \quad (4.10)$$

Hodnota rezistoru byla zvolena na 12 Ω . Při znalostech těchto dvou rezistorů je možné dopočtení skutečného vybíjecího proudu.

$$I_Z = \frac{U_{max} - U_{CE}}{R_{z,1}} = \frac{4.2 - 0.35}{12} = 320.83 [mA] \quad (4.11)$$

$$I_{LED} = \frac{U_{max} - U_{CE}}{R_{led,1}} = \frac{U_{max} - U_{CE}}{200} = 19.25 [mA] \quad (4.12)$$

$$I_C = I_Z + I_{LED} = 320.83 + 19.25 = 340.08 [mA] \quad (4.13)$$

Při znalosti skutečného vybíjecího proudu je potřeba zkontrolovat, zda je tranzistor schopen tento proud dlouhodobě spínat a je třeba dopočítat ztrátový výkon na vybíjecím rezistoru R_Z .

Obrázek 4.10 I_{Cmax} tranzistoru PN2222A [16]

Jak lze vidět, celkový vybíjecí proud je nižší než maximální dovolený kolektorový proud pro tranzistor a je tedy možné tento tranzistor použít.

Ztrátový výkon rezistoru se vypočte podle rovnice (4. 14):

$$P_D = I_Z \cdot (U_{max} - U_{CE}) = 320.83 \cdot 10^{-3} \cdot (4.2 - 0.35) = 1.24 [W] \quad (4. 14)$$

Při znalosti ztrátového výkonu bylo třeba zvolit vhodný typ rezistoru R_Z . Zvolen byl rezistor o ztrátovém výkonu 2 W, přesněji rezistor typu THT RMO 12R 2W 5%.

Při znalosti skutečného vybíjecího proudu je možné dopočítat, skutečnou dobu potřebnou pro vybalancování nevyváženosti 10 % kapacity mezi články soustavy, za předpokladu plného nabití článků.

$$t = \frac{\frac{\text{nevyváženost}}{100} \cdot Q_{\text{článku}}}{I_{\text{vyb}}} = \frac{\frac{10}{100} \cdot 3100}{340.08} = 0.912 [h] \quad (4. 15)$$

Skutečná doba balancování bude ve skutečnosti vyšší, hlavním faktorem pro ovlivnění doby balancování jsou míra nabití balancovaných článků a požadovaná přesnost balancování. Pokud do předchozích výpočtů dosadíme místo maximální hodnoty napětí článků, 4.2 V, jmenovitou hodnotu napětí článků, 3.6 V, dostaneme délku balancování přibližně 1 h a 15 min. Opět skutečná doba balancování bude delší, je třeba vzít v potaz stav balancovaných článků, např. opotřebení jednotlivých článků.

Návrh chlazení

Vzdálenosti mezi zatěžujícími součástkami jsou dostatečně velké, kombinace tranzistor + rezistor je natolik velká, aby se navzájem tepelně neovlivňovali, a vzdálenosti mezi zatěžnými obvody pro jednotlivé články jsou taktéž natolik velké, aby se nijak navzájem tepelně neovlivňovali. Je tedy možné uvažovat, že jediné teplo, ovlivňující danou součástku, bude vyprodukováno samotnou součástkou.

Tranzistor:

Je potřebné zkontrolovat, zda bude potřeba na tranzistor připojit externí chlazení či nikoliv. To zjistíme podle datasheetu [16] podle hodnoty P_D .

Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625 5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
---	-------	------------	----------------------------

Obrázek 4.11 P_{Dmax} tranzistoru PN2222A [16]

Skutečná hodnota ztrátového výkonu, kterou tranzistor vyprodukuje je.

$$P_D = I_C \cdot U_{CE} = 320.83 \cdot 10^{-3} \cdot 0.4 = 128.33 [mW] \quad (4. 16)$$

Pokud by se uvažovalo, že teplota okolí bude vyšší než 25°C , například 40°C , je třeba maximální hodnotu P_D ponížít o daný koeficient.

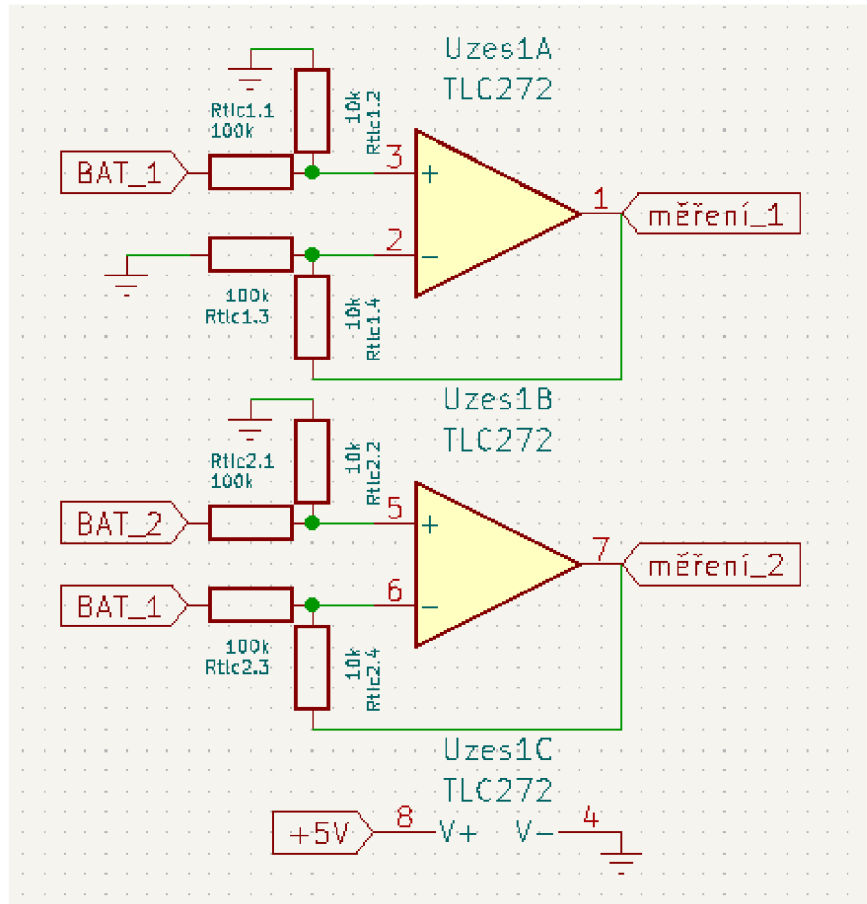
$$P_{D,D} = 625 - 5 \cdot (40 - 15) = 500 [mW] \quad (4. 17)$$

I pro tuto sníženou hodnotu P_D ovšem tranzistor bez problémů vyhovuje neboť P_D je více než 3x menší než $P_{D,D}$. Lze tedy usoudit, že připojení externího chlazení ke tranzistoru nebude třeba.

Zátěžný rezistor:

Jak již byl spočten ztrátový výkon pro zátěžný rezistor R_Z podle rovnice (4. 14), je jeho hodnota 1.24 W. Maximální hodnota ztrátového výkonu rezistoru je 2 W a tedy lze usoudit, že připojení externího chlazení k rezistoru nebude třeba.

4.1.4 Snímací část



Obrázek 4.12 Snímací část obvodu pro 1. a 2. článek soustavy

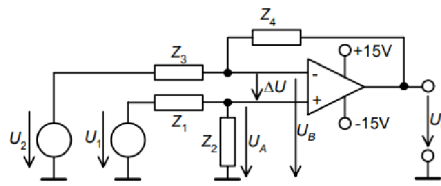
Jako snímač napětí byl použit operační zesilovač typu TLC272CP v diferenciálním zapojení.

Diferenciální zapojení

Používá se obecně jako snímače napětí z plovoucího zdroje. Přenos určuje podmínka podle rovnice (4. 18):

$$\frac{R_{tlc1.2}}{R_{tlc1.1}} = \frac{R_{tlc1.4}}{R_{tlc1.3}} \quad (4. 18)$$

Je potřeba aby byly hodnoty rezistorů totožné! Za dodržení této podmínky je poté přenos operačního zesilovače dán:



Obrázek 4.13 Zapojení diferenciálního zesilovače [18]

$$U_A = U_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4.19)$$

$$U_B = U_2 \cdot \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} + U_0 \cdot \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} \quad (4.20)$$

$$U_0 = (U_2 - U_1) \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \quad (4.21)$$

Poté pro případ tohoto zapojení bude výstupní napětí:

$$U_0 = (U_2 - U_1) \cdot \frac{R_{tlc1.2}}{R_{tlc1.1}} \quad (4.22)$$

Hodnoty odporů byly voleny na 10 kΩ a 100 kΩ, respektive, tak aby bylo dosaženo poměru vstupního napětí ku výstupnímu 1/10. Výstupní napětí tedy bude při plném nabití článku ~0.42 V. Toto bylo uděláno proto, že pro vyhodnocování napětí je použita interní reference modulu Arduino, která je 1.1 V, a že napětí bateriové soustavy má maximální hodnotu ~33.6 V.

Zvolený operační zesilovač TLC272CP může být napájen napětím v rozmezí 4 V – 16 V, všechny operační zesilovače jsou tedy napájeny z modulu Arduino pinem +5V.

4.1.5 Software

Program byl napsán v prostředí Arduino IDE.

Struktura SCellInfo

Informace obsaženy uvnitř struktury jsou použity po celou dobu programu pro vyhodnocování údajů bateriové soustavy.

```
typedef struct SCellInfo
{
    float readCellVoltage;
    float realCellVoltage;
    float cellVoltageOffset;
    bool shouldCellBalance;
    uint8_t cellMeasurePin;
    uint8_t cellControlPin;
}
SCellInfo;
```

Obrázek 4.14 Struktura SCellInfo

Proměnné obsaženy uvnitř struktury:

1. readCellVoltage: Obsahuje informaci o hodnotě napětí, kterou modul Aduino získává z jednotlivých článků, bez aplikovaného korekčního činitele.
2. realCellVoltage: Obsahuje informaci o hodnotě napětí, kterou modul Aduino získává z jednotlivých článků, s aplikovaným korekčním činitelem.

3. cellBatteryPercentage: Obsahuje informaci o hodnotě kapacity článku v procentech získané podle výpočtu používající proměnnou realCellVoltage.
4. cellVoltageOffset: Korekční činitel. Získané hodnoty z jednotlivých článků přesně neodpovídají skutečnému napětí na těchto člancích, a proto je potřeba zavést tento činitel do výpočtu skutečného napětí, aby se zlepšila přesnost měření.
5. shouldCellBalance: Obsahuje informaci o tom, zda daný článek má být balancován či nikoliv.
6. cellMeasurePin: Obsahuje informaci o použitém měřicím pinu, piny A0 – A7
7. cellControlPin: Obsahuje informaci o použitém řídicím pinu, piny D1 – D13

Struktura SCellInitInfo

Informace obsaženy uvnitř struktury jsou použity pouze pro inicializaci chodu programu.

```
typedef struct SCellInitInfo
{
    uint8_t cell_number;
    float max_cell_voltage;
    float min_cell_voltage;
    float measurement_diff;
}
SCellInitInfo;
```

Obrázek 4.15 Struktura SCellInfo

Proměnné obsaženy uvnitř struktury:

1. cell_number: Obsahuje informaci o počtu článků v soustavě.
2. max_cell_voltage: Obsahuje informaci o maximálním napětí článků v soustavě.
3. min_cell_voltage: Obsahuje informaci o minimálním napětí článků v soustavě.
4. measurement_diff: Obsahuje informaci o rozdílu napětí mezi konkrétním článkem a článkem s nejnižším napětím, kdy nejpozději musí být spuštěno balancování.

Prototyp třídy CBalancer

```
class CBalancer
{
private:
    const uint8_t UNDERVOLTAGE_STATE = 10;
    const uint8_t OVERVOLTAGE_STATE = 11;
    float MAX_CELL_VOLTAGE;
    float MIN_CELL_VOLTAGE;
    float MEASUREMENT_DIFF;
    uint8_t CELL_NUMBER;
    SCellInfo *cells = nullptr;

    void ReadCells();
    uint8_t GetLowestCellIndex();
    void CheckCellsForBalancing();
    void StartCellBalancing();
    void PrintCells();
    bool CheckUndervoltageState();
    bool CheckOvervoltageState();
    void ApplyOffsets();

public:
    unsigned long timeStamp;

    CBalancer( SCellInitInfo *initInfo );
    ~CBalancer();
    void Loop();
};
```

Obrázek 4.16 Prototyp třídy CBalancer

Globální proměnné objektu třídy:

1. `UNDervoltage_State`: Obsahuje informaci o digitálním pinu signalizujícím stav nadměrného vybití článků, pin D10.
2. `OverVoltage_State`: Obsahuje informaci o digitálním pinu signalizujícím stav nadměrného nabití článků, pin D11.
3. `MAX_Cell_Voltage`: Obsahuje informaci o maximálním napětí článků v soustavě. Je definována při inicializaci programu.
4. `MIN_Cell_Voltage`: Obsahuje informaci o minimálním napětí článků v soustavě. Je definována při inicializaci programu.
5. `Measurement_Diff`: Obsahuje informaci o rozdílu napětí mezi konkrétním článkem a článkem s nejnižším napětím. Je definována při inicializaci programu.
6. `Cell_Number`: Obsahuje informaci o počtu článků v soustavě, omezena na maximální hodnotu 8 článků. Je definována při inicializaci programu.
7. `*cells`: Obsahuje informace pro všechny články v soustavě za použití proměnných ve struktuře `SCellInfo`. V závislosti na počtu článků v soustavě je dynamicky definována při inicializaci programu.
8. `timeStamp`: Obsahuje informaci o uběhnutém času od posledního průběhu smyčky programu. Je používána na provádění jednotlivých smyček programu, pomocí příkazu `millis()`, namísto používání příkazu `delay()`. Defaultní hodnota je definována při inicializaci programu a při průběhu každé smyčky je hodnota aktualizována.

Konstruktor a destruktork + funkce objektu třídy:

1. `CBalancer()`: Účelem konstruktoru je inicializování programu. Konstruktor má 1 vstupní parametr. Tento parametr je instance struktury `SCellInitInfo` a jeho údaje ovlivňují výše zmíněné globální proměnné. Prvním úkolem konstruktoru je inicializace sériového monitoru a napěťové reference modulu Arduino. Následuje inicializace výše zmíněných proměnných a zápis defaultních hodnot pro jednotlivé články v soustavě, jejich napětí, korekční činitel, pin pro měření napětí, pin pro spínání vybíjecí části obvodu a zda má článek být balancován. Dále se v konstruktoru nachází inicializace digitálních pinů, sloužících pro vizuální indikaci stavu nadměrného vybití a nabití, získání času spuštění programu a aplikace korekčních činitelů, prováděno voláním funkce `ApplyOffsets()`.
2. `~CBalancer()`: Účelem destruktorku je ukončení programu. Destruktor obsahuje pouze uvolnění paměti dynamicky vytvořené proměnné `cells`.
3. `ReadCells()`: Účelem funkce je přečtení dat ze všech článků v soustavě. Jmenovitě je jejím cílem načtení dat pro výpočet hodnoty napětí a procentuální kapacity článku v podobě proměnných `readCellVoltage`, `realCellVoltage` a `cellBatteryPercentage`.
4. `GetLowestCellIndex()`: Účelem funkce je získání indexu článku s nejnižší hodnotou napětí pro pozdější referenci.

5. `CheckCellsForBalancing()`: Účelem funkce je kontrola všech článků zda je potřeba je balancovat. Prvním krokem je volání funkce `GetLowestCellIndex()` a kontrola zda pro tento článek je potřeba balancovat či nikoliv. Poté je prováděna kontrola pro všechny zbylé články s výjimkou toho s nejnižším napětím, protože u něj není třeba kontrolovat rozdíl napětí vůči jinému článku ale pouze jeho hodnota napětí. Vyhodnocení, zda je třeba článek balancovat či nikoliv, je prováděno pomocí dvou podmínek, podmínka rozdílu napětí dvou článků, kdy jako reference je použit článek s nejnižším napětím, a podmínka maximálního napětí. Pokud alespoň jedna z těchto podmínek je splněna je proměnná článku, `shouldCellBalance`, nastavena na hodnotu „true“. Na konci této funkce je prováděna ještě kontrola, zda se napětí článku pohybuje v bezpečných mezích. Pokud by jeho napětí kleslo pod určitou hodnotu je, z důvodu ochrany článku, potřeba zakázat balancování přepsáním hodnoty proměnné `shouldCellBalance` na hodnotu „false“.
6. `StartCellBalancing()`: Účelem funkce je spuštění balancování pro jednotlivé články v soustavě. Prvním krokem ve funkci je volání funkcí `ReadCells()` a `CheckCellsForBalancing()`. Poté za kontroly proměnné `shouldCellBalance` program vyhodnocuje, zda je třeba daný článek balancovat či nikoliv. Pokud je potřeba článek balancovat a daný článek není balancován je balancování spuštěno, pokud je daný článek již balancován nic se neprovede. Pokud ovšem daný článek není třeba balancovat a je článek balancován tak je jeho balancování ukončeno, pokud není balancován nic se neprovede.
7. `PrintCells()`: Účelem funkce je výpis údajů na sériový monitor modulu Arduino pro přehlednost. Obsahem je napětí na jednotlivých člancích, kapacita článků a výpis všech článků, které jsou zrovna balancovány.
8. `CheckUndervoltageState()`: Účelem funkce je kontrola, zda se hodnota napětí článků pohybuje v bezpečných limitech, pokud klesne jejich napětí pod tuto hodnotu je jejich balancování zakázáno. Při situaci, kdy napětí všech článků v soustavě klesne pod tuto hodnotu, bude spuštěna světelná indikace pomocí zelené LED.
9. `CheckOvervoltageState()`: Účelem funkce je kontrola, zda se hodnota napětí článků pohybuje v bezpečných limitech, pokud stoupne jejich napětí nad tuto hodnotu je potřeba zapnout jejich balancování. Při situaci, kdy napětí všech článků v soustavě stoupne nad tuto hodnotu, bude spuštěna světelná indikace pomocí modré LED.
10. `ApplyOffsets()`: Účelem funkce je nastavení korekčních činitelů pro jednotlivé články.
11. `Loop()`: Účelem funkce je pouze její volání v externí funkci, z tohoto důvodu je na rozdíl od ostatních funkcí typu `public` a ne `private`. Obsahem je volání funkcí

StartCellBalancing(), CheckUndervoltageState(), CheckOvervoltageState() a PrintCells().

Prototyp globálních funkcí

```
void BalancerInit( CBalancer **cellManager, uint8_t cell_number, float max_cell_voltage, float min_cell_voltage, float measurement_diff );
void BalancerLoop( CBalancer *cellManager );
void BalancerClear( CBalancer *cellManager );
```

Obrázek 4.17 Globální funkce v programu

1. BalancerInit(): Účelem funkce je vytvoření objektu třídy CBalancer, a tím tedy volání konstrukturu třídy CBalancer.
2. BalancerLoop(): Účelem funkce je provádění smyčky programu a aktualizace proměnné timeStamp.
3. BalancerClear(): Účelem funkce je uvolnění paměti v programu, nebo-li smazání vstupní proměnné cellManager. Prozatím nevyužita, jelikož program pracuje v nekonečné smyčce a není třeba nikde proměnnou promazávat.

```
/*-----
 * Autor: Bc. Zimčík Václav
 * Datum: 22.5.2022
 * Název: Balancér pro 8S Li-Ion článků
 *-----*/

/*
 * Deklarace použité knihovny, všechny části kódu jsou napsány tam
 */
#include "CBalancer.h"

/*
 * Deklarace proměnných použitých zde v programu
 * *cellManager ..... instance pro knihovnu řídicí balancér
 * USED_CELLS ..... počet použitých článků pro balancér, je možné použít číslo od 2 do 8
 * MAX_CELL_VOLTAGE ... napětí článků, při kterém začne balancér články balancovat
 * MIN_CELL_VOLTAGE ... napětí, pod jehož hodnotou není možné články balancovat
 * VOLTAGE_DIFF ..... rozdíl napětí, při kterém začne balancování článků
 */
CBalancer *cellManager = nullptr;
const uint8_t USED_CELLS = 8;
const float MAX_CELL_VOLTAGE = 4.2;
const float MIN_CELL_VOLTAGE = 2.5;
const float VOLTAGE_DIFF = 0.05;

void setup()
{
    BalancerInit( &cellManager, USED_CELLS, MAX_CELL_VOLTAGE, MIN_CELL_VOLTAGE, VOLTAGE_DIFF );
}

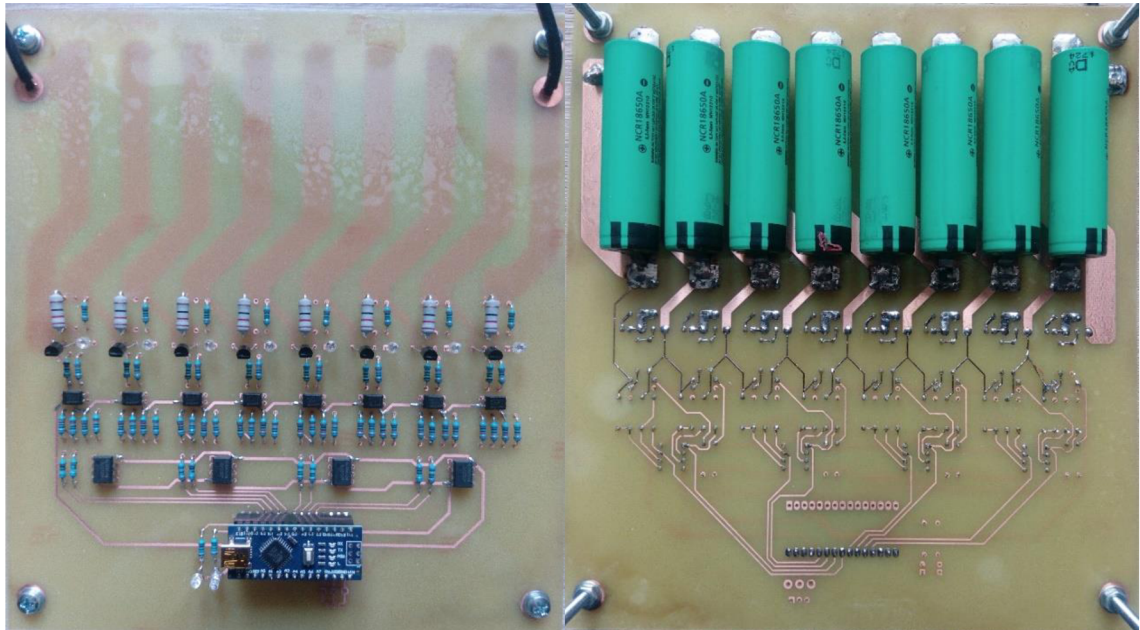
void loop()
{
    BalancerLoop( cellManager );
}
```

Obrázek 4.18 Program v prostředí Arduino IDE

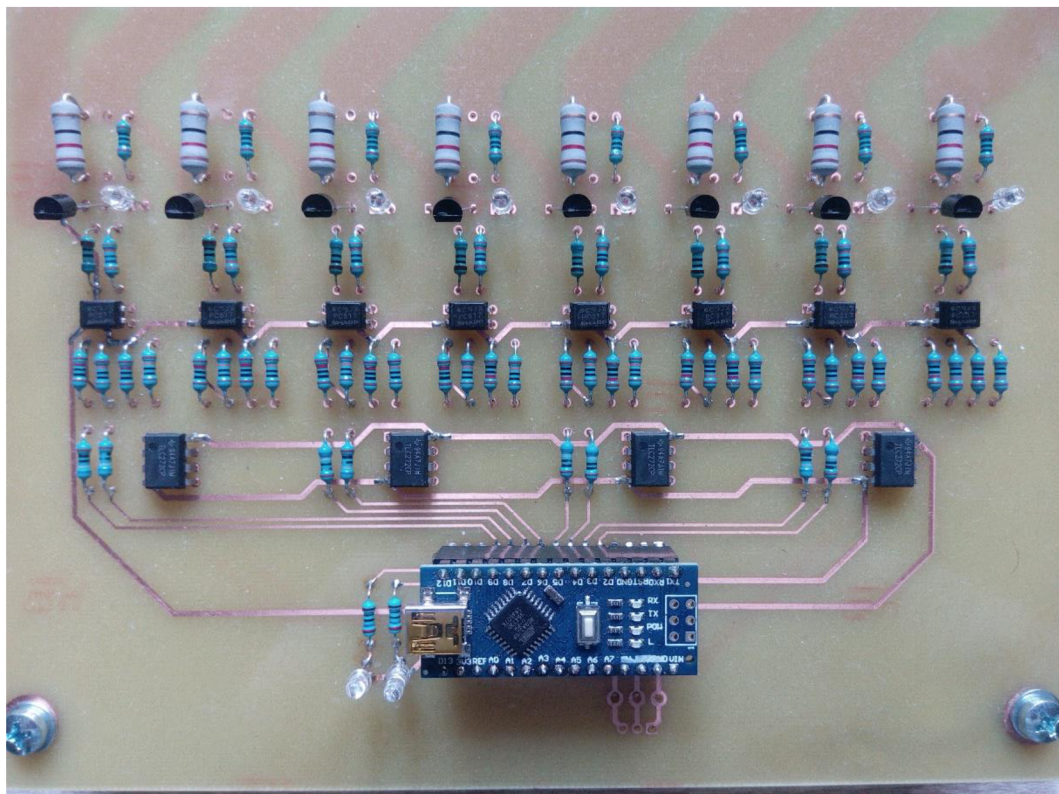
Většina kódu je psána v souborech knihoven a z tohoto důvodu je jako první krok nezbytné zahrnout tuto knihovnu do programu. Proměnné využité pro inicializaci programu jsou popsány a uživatel si je může libovolně měnit. Průběh programu je popsán výše.

5. PROTOTYP BALANCÉRU

Fotodokumentace



Obrázek 5.1 Prototyp balancéru: horní vrstva (vlevo) / spodní vrstva (vpravo)



Obrázek 5.2 Prototyp balancéru: horní vrstva – přiblížený pohled

```

Battery pack informations
C1:3.97V-[91.20%]|C2:3.99V-[92.76%]|C3:3.99V-[92.77%]|C4:4.00V-[93.18%]|C5:4.01V-[94.35%]|C6:3.98V-[91.81%]|C7:3.98V-[91.91%]|C8:4.04V-[96.05%]
Current cells that are being balanced: C8

Battery pack informations
C1:3.97V-[91.20%]|C2:3.98V-[91.86%]|C3:3.99V-[92.77%]|C4:4.01V-[94.03%]|C5:4.00V-[93.51%]|C6:4.01V-[94.35%]|C7:4.01V-[94.41%]|C8:3.98V-[92.10%]
Current cells that are being balanced: None

Battery pack informations
C1:3.96V-[90.23%]|C2:3.98V-[91.86%]|C3:3.98V-[91.86%]|C4:4.00V-[93.18%]|C5:4.00V-[93.51%]|C6:4.01V-[94.35%]|C7:4.01V-[94.41%]|C8:4.03V-[95.34%]
Current cells that are being balanced: C6, C7, C8

Battery pack informations
C1:3.98V-[92.12%]|C2:3.99V-[92.76%]|C3:4.00V-[93.63%]|C4:4.02V-[94.85%]|C5:4.02V-[95.15%]|C6:3.99V-[92.69%]|C7:3.98V-[91.91%]|C8:4.01V-[93.79%]
Current cells that are being balanced: None

```

Obrázek 5.3 Výpis sériového monitoru modulu Arduino

Měření

Naměřené hodnoty odpovídají, s určitou odchylkou, hodnotám spočteným/zvoleným. Při měření, v závislosti na momentu měření, bylo napětí U_{CE} jednotlivých tranzistorů v rozmezí hodno $\sim 0.25 \text{ V} - \sim 0.4 \text{ V}$. Hodnoty zátěžných rezistorů nebyly stejné ale pohybovaly se v rozmezí $11.75 \Omega - 12.25 \Omega$. Tím pádem i vybíjecí proud se měnil v závislosti na momentu měření a na konkrétním článku, při napětí na konkrétním článku $\sim 3.6 \text{ V}$ byla hodnota zátěžného proudu:

$$I_c = \frac{3.6 - 0.3}{R_Z} + \frac{3.6 - 0.3}{R_{led_1}} = \frac{3.3}{12} + \frac{3.3}{200} = 291.5 \text{ [mA]} \quad (5.1)$$

Při zvyšování napětí jednotlivých článků rostl i jejich vybíjecí proud až na maximální spočtenou hodnotu $\sim 340 \text{ mA}$, vypočteno podle rovnice (4. 13).

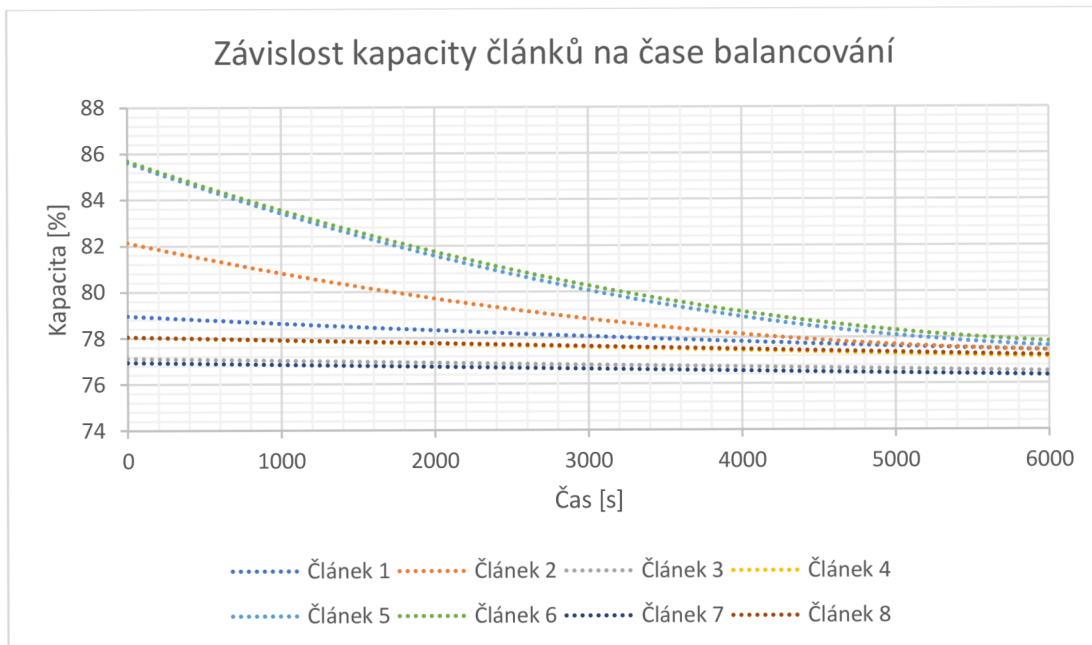
Teploty tranzistorů a zátěžných rezistorů se pohybovaly v dovolených hodnotách i po delší dobu využívání obvodu, externí chlazení tedy není třeba připojovat, jak již bylo zmíněno.

Byl proveden test balancéru při rozbalancování kapacity článků $\sim 10 \%$ při kapacitě $\sim 80 \%$, tedy $\sim 3.8 \text{ V} - \sim 4.0 \text{ V}$ na článek. Závislost je vyobrazena na obrázku 5.3. Při tomto testu byla požadovaná přesnost balancéru 30 mV .

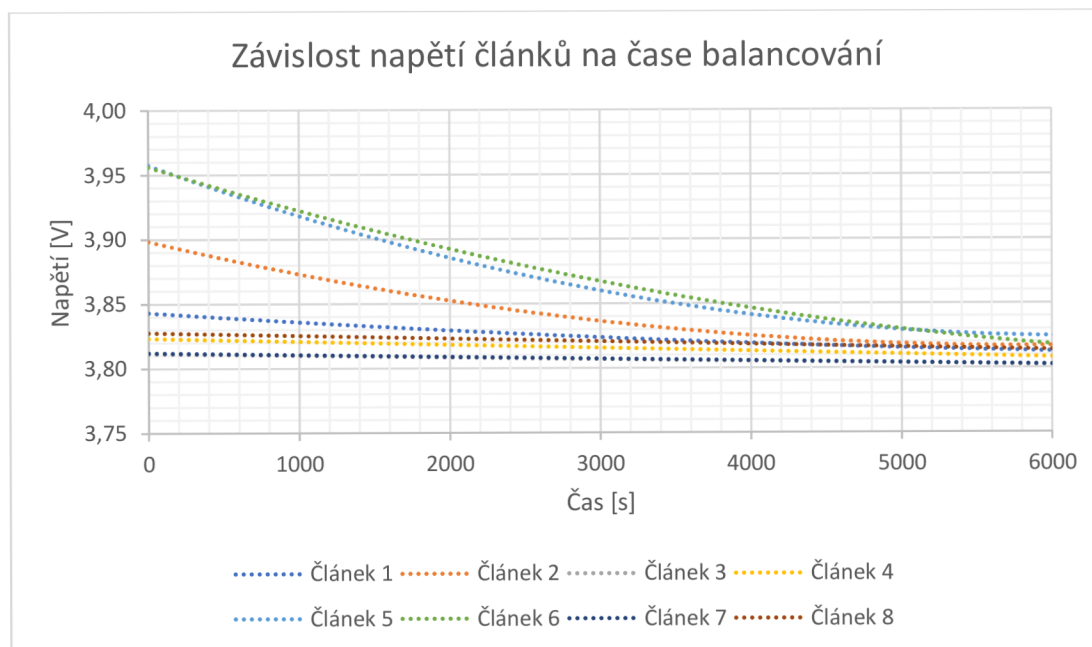
Porovnání časů balancování:

- Výpočet: podle výpočtu by doba balancování byla 1 h a 15 min
- Přesnost 30 mV : při požadované přesnosti 30 mV je doba balancování 1 h a 40 min
- Přesnost 50 mV : při požadované přesnosti 50 mV je doba balancování 1 h

Při porovnání různých dob balancování lze usoudit, že vlastnosti realizovaného balancéru odpovídají vypočteným hodnotám. V závislosti na požadované přesnosti se velmi mění doba balancování. Při změně přesnosti balancování o 20 mV , tedy ze 30 mV na 50 mV , se doba balancování snížila o 40 min, pokud by se požadovaná přesnost snížila ještě více, např. na 100 mV , doba balancování by podle obrázku 5.4 byla pouze necelých 30 min. Nicméně, čím menší přesnost bude požadována, tím větší rozdíl v kapacitách článků bude na konci balancování. Při přesnosti 30 mV je tento rozdíl necelé 2% , avšak při přesnosti 100 mV je tento rozdíl přibližně 6% . Větší přesnost balancování tedy zajistí lepší vybalancování článků soustavy za cenu delšího času balancování.



Obrázek 5.4 Závislost kapacity článků na čase balancování



Obrázek 5.5 Závislost napětí článků na čase balancování

Porovnání s komerčním balancérem

Pro porovnání bude využit model využívající mikrokontrolér LTC6804 – 1 popsáno v kapitole 3, obrázek 3.1.

Pro porovnávání obvodů je třeba první vypočítat vybíjecí proud komerčního obvodu. V obvodu jsou použité články s jmenovitou hodnotou napětí 3.6 V, tedy jsou zde taktéž použity Li-Ion akumulátory s maximálním napětím 4.2 V. Zátěžný odpor je pro

toto konkrétní zapojení použit o hodnotě 33 Ω, je možné použít i jiné hodnoty odporů. Napětí U_{DS} pro tento výpočet je zanedbáno, neboť jeho hodnota bude velmi malá a neovlivní tak příliš výpočet.

$$I_{C, \text{komerční}} = \frac{4.2}{33} = 127.3 \text{ [mA]} \quad (5.2)$$

Výhody komerčního balancéru:

- Možnost balancování až 12 článků při použití jednoho modulu LTC6804.
- Možnost zapojení více obvodů LTC pro balancování velkého bateriového systému.
- Rozměry, dáno použitím SMD součástek.

Výhody prototypu balancéru:

- Vybíjecí proud je téměř 3x větší než vybíjecí proud u balancéru komerčního, rychlejší balancování soustavy.
- Světelná indikace pro daný článek, zda je balancován či nikoliv.

Nevýhody navrženého balancéru by bylo možné eliminovat například těmito způsoby:

- Velikost prototypu: dala by se zmenšit za použití SMD součástek, v tomto případě by ale bylo potřeba provést znovu výpočty pro chlazení, zde by nebylo potřeba přiřadit externí chlazení.
- Limit 8 článků pro balancování: dalo by se ovlivnit použitím více modulů Arduino a nastavit mezi nimi komunikaci MASTER – SLAVE, šlo by použít i MASTER – MULTIPLE SLAVES. Zde by ovšem byl problém v přesnosti měření diferenciálních zesilovačů, čím více článků by mělo být snímáno moduly Arduino, tím méně by diferenciální zesilovače musely „zesilovat“, tím by se snižovala přesnost měření. Daleko lepším řešením by bylo použití výkonnějšího mikrokontroléru pro řízení balancování.

Finanční náklady

Tabulka 5.1 Finanční náklady výroby prototypu balancéru

Součástka [-]	Počet kusů [-]	Cena za kus [Kč]
Arduino Nano	1	325
Optočlen	8	6
Tranzistor	8	5
Operační zesilovač	4	36
Rezistory Pz < 1W	65	3
Rezistory Pz > 1W	8	4.6
LED	9	4.6
Celkem		830.2

6. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl návrh, realizace a ověření funkčnosti balančního obvodu pro 8S Li-Ion akumulátorovou baterii.

Realizace zařízení byla, z důvodu současného nedostatku integrovaných obvodů a mikrokontrolérů, provedena jako pasivní balancér, řízený modulem Arduino, využívající k balancování rezistory spínané bipolárními tranzistory. Ke spínání tranzistorů pomocí modulu Arduino jsou použity optočleny. Funkčnost zařízení byla ověřena měřením a zařízení fungovalo v pořádku. V porovnání s komerčním balancérem je výhoda realizovaného balancéru v jeho rychlosti, maximální vybíjecí proud je zde ~340 mA, kdežto u komerčních balancérů bývají tyto proudy daleko nižší, například 100 mA – 150 mA. Na rozdíl od komerčních balancérů je zde ale nevýhoda v jeho velikosti, nicméně, jak již bylo výše zmíněno, tento nedostatek lze eliminovat. Další nedostatek realizovaného balancéru je ten, že umožňuje balancování maximálně 8 článků. Opět, jak již bylo zmíněno výše, je ale možné tento nedostatek eliminovat.

Všechny zvolené součástky byly dimenzovány s dostatečnou rezervou pro jejich použití s ohledem na dlouhodobé využívání a nebylo tedy nutno řešit teplotní ochranu obvodu, jelikož maximálních teplot součástek nebude při normálním provozu nikdy dosaženo.

Možným vylepšením realizovaného balancéru by bylo přidání přepětové a podpětové ochrany. Ta by mohla být řešena nahrazením signalizačních stavů nadměrného vybití a nabití za spínací obvod, který by byl v normálním provozu sepnut a v momentu, kdy by napětí soustavy bylo vyšší než maximální dovolená hodnota nebo nižší než minimální dovolená hodnota, by rozeplnul, čímž by rozpojil obvod a zamezil tak dalšímu nabíjení či vybíjení článků soustavy.

Dalším možným vylepšením by bylo použití výkonnějších součástek pro zvýšení rychlosti balancování, jmenovitě použití výkonnějších tranzistorů a nižších hodnot zatěžných rezistorů. Zde by ale bylo potřeba přidat externí chlazení pro tyto součástky. Limit pro maximální vybíjecí proud by byl dán samotnými články, většina Li-Ion akumulátorů je dimenzována na vybíjení v podobě 1 C. Maximální proud by ovšem stačilo dimenzovat na hodnoty nabíjecího proudu, a to proto aby balancér stíhal při nabíjení spotřebovávat všechnu nadbytečnou energii z článků.

LITERATURA

- [1] LINDEN, David.; REDDY, Thomas. *Handbook of batteries by David Linden and Thomas B.*, Third edition, McGraw-Hill Publ. Comp, 2001, 1200s., ISBN 0071359788.
- [2] HARRIS, Joshua. *Graphitized Carbon for Lithium Ion Capacitor*, [online] University of Massachusetts. [cit. 2021-2-4]. Dostupné z: <http://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch471/documents/Lithium%20Air%20Presentation%20josh.pdf>
- [3] TICHÝ, Jiří. *Lithiové akumulátory, Přehled základních typů a jejich vlastností*, [online] UETE FEKT VUT v Brně, [cit. 2021-2-4]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory#:~:text=Z%C3%A1kladn%C3%AD%20v%C3%BDhodou%20je%20vy%C5%A1%C5%A1%C3%AD%20energetick%C3%A1,negativn%C3%ADho%20vlivu%20na%20v%C3%BDkony%20akumul%C3%A1tor%C5%AF.>
- [4] BARSUKOV, Yevgen. aj. QIAN. *Battery Power Management for Portable Devices*. Artech House Power Engineering. Artech House, 2013. ISBN 9781608074914
- [5] BARSUKOV, Yevgen. *Challenges and Solutions in Battery Fuel Gauging*. [online] Unpublished [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ml/slyp086/slyp086.pdf>
- [6] BARSUKOV, Yevgen. *Battery Cell Balancing: What to Balance and How.*, Texas Instruments. [online] [cit. 2021-4-4]. Dostupné z : <https://www.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20%20-%20Battery%20Cell%20Balancing%20-%20What%20to%20Balance%20and%20How.pdf>
- [7] JIAN, Cao.; SCHOFIELD, Nigel.; EMADI, Ali. *Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2008. ISBN 978-1-4244-1848-0.
- [8] MOORE, W. Stephen.; SCHNEIDER, J. Peter. *A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems*, SAE Tech. Pap., 2001. [online] [cit. 2021-4-4]. Dostupné z: https://www.americansolarchallenge.org/ASC/wp-content/uploads/2013/01/SAE_2001-01-0959.pdf
- [9] DAOWD, Mohamed.; OMAR, Noshin.; VAN DEN BOSSCHE, Peter.; VAN MIERLO, Joeri. *Capacitor Based Battery Balancing System*. EVS26, 2012
- [10] N, H, Kutkut. *A MODULAR NON DISSIPATIVE CURRENT DIVERTER FOR EV BATTERY CHARGE EQUALIZATION*. pp. 686–690, 1998.
- [11] D. M. Divan.; N. H. Kutkut, *DYNAMIC EQUALIZATION TECHNIQUES FOR SERIES BATTERY STACKS*, pp. 514–521, 1996.
- [12] *Types of Lithium-ion*. [online][cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

- [13] *LTC6804-1/LTC6804-2 Multicell Battery Monitors*. [online][cit. 2021-20-11].
Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680412fc.pdf>
- [14] *LT8584 2.5A Monolithic Active Cell Balancer with Telemetry Interface*
[online][cit. 2021-4-12].
Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/8584fb.pdf>
- [15] *GM Electornics online shop* [online][cit. 2022-5-13].
Dostupné z: <https://www.gme.cz/>
- [16] *Tranzistor datasheet* [online][cit. 2022-5-13].
Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.215-373.1.pdf>
- [17] *Optočlen datasheet*
Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.523-202.2.pdf>
- [18] *Skripta: Průmyslová elektronika* [online][cit. 2022-5-14].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

BMS	Battery Management System
SOC	Stav nabití (State of Charge)
OCV	Napětí v otevřené smyčce (Open Circuit Voltage)
DOD	Míra vybití akumulátoru (Depth of Discharge)
LCO	Lithium Cobalt Oxide
LMO	Lithium Manganese Oxide
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt
LFP	Lithium Iron Phosphate
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum
LTO	Lithium Titanate
BDR	Pasivní balancér s rezistorem (Basic Dissipative Resistor)
ADS	Pasivní balancér při přepětí (Analog Dissipative Shunting)
SSC	Přepínaný kondenzátor (Single Switched Capacitor)
STSC	S přepínanými kondenzátory (Single-Tiered Switched Capacitors)
DTSC	S dvěma stupni přepínaných kondenzátorů (Double-Tiered Switched Capacitors)
MBB	S měniči buck-boost (Multiple Buck-Boost)
MFB	S měniči flyback (Multiple FlyBack)
MWFB	S měničem flyback a transformátorem s více vinutími (Multi-Winding FlyBack)
MSFB	S přepínaným měničem flyback (Multi-Switch FlyBack)
CRG	Configuration Register Group
CTR	Current Transfer Ratio

Symboly:

Q_j	jmenovitá kapacita článku	(mAh)
Q_c	celková kapacita článku	(mAh)
q_s	odebraná kapacita z článku	(mAh)
U_b	napětí článku	(V)
I	proud protékající článkem	(A)
R	vnitřní odpor článku	(Ω)
T	teplota	(K)
n	počet článků v soustavě	(-)
U_s	celkové napětí soustavy	(V)
Q_s	celková kapacita soustavy	(mAh)
$I_{F(AVG)}$	maximální propustný proud	(A)
V_{RRM}	maximální opakované napětí	(V)
$I_{vyb,min}$	minimální požadovaný vybíjecí proud	(mA)
$R_{op,1.1}$	odpor na vstupu do optočlenu	(Ω)
I_F	proud na vstupu do optočlenu	(mA)
I_{Rbe}	proud odporem mezi bází a emitorem tranzistoru	(mA)
$R_{l,1}$	řídící odpor tranzistoru	(Ω)

U_{R1_1}	napětí na řídicím odporu tranzistoru	(V)
I_{R1_1}	proud na řídicím odporu tranzistoru	(mA)
$I_{B,z}$	žádaný proud báze tranzistoru	(mA)
I_B	skutečný proud báze tranzistoru	(mA)
U_{CE}	napětí kolektor-emitor tranzistoru	(V)
U_{max}	maximální napětí bateriového článku	(V)
$I_{LED,max}$	maximální proud přes LED	(mA)
R_{led_1}	odpor pro LED	(Ω)
R_{z_1}	zátěžný odpor	(Ω)
I_Z	proud přes zátěžný odpor	(mA)
I_{LED}	skutečný proud přes LED	(mA)
I_C	kolektorový proud tranzistoru/zátěžný proud	(mA)
P_D	ztrátový výkon	(W)
t	doba balancování	(h)
$P_{D,D}$	ponížený ztrátový výkon	(W)
$R_{tlc_1.1}$	odpor operačního zesilovače	(Ω)
$R_{tlc_1.2}$	odpor operačního zesilovače	(Ω)
$R_{tlc_1.3}$	odpor operačního zesilovače	(Ω)
$R_{tlc_1.4}$	odpor operačního zesilovače	(Ω)
U_2	napětí na vstupu operačního zesilovače	(V)
U_1	napětí na vstupu operačního zesilovače	(V)
U_0	napětí na výstupu operačního zesilovače	(V)
Z_1	impedance operačního zesilovače	(Ω)
Z_2	impedance operačního zesilovače	(Ω)
Z_3	impedance operačního zesilovače	(Ω)
Z_4	impedance operačního zesilovače	(Ω)
$I_{C,komerční}$	vybíjecí proud komerčního balancéru	(mA)

PŘÍLOHY

- A. Kód programu, Arduino IDE, hlavičkové soubory
- B. Zapojení obvodu, schéma zapojení, rozložení součástek, KiCad soubor