



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## PŘENOSNÁ UNIVERZÁLNÍ NABÍJEČKA AKUMULÁTORŮ

PORTABLE UNIVERSAL BATTERY CHARGER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Martin Škotnár**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Vladimír Levek, Ph.D.**

**BRNO 2025**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Martin Škotnár

**ID:** 230520

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2024/25

**NÁZEV TÉMATU:**

## Přenosná univerzální nabíječka akumulátorů

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte nabíječku akumulátorů, která bude schopna nabíjet vybrané druhy akumulátorů ze širokého rozsahu napájecích napětí. Nabíječka bude disponovat modulem USB-C Power Delivery, bude umožňovat balancování jednotlivých článků. Dále bude nabíječka vybavena grafickým displejem pro umožnění nastavování potřebných parametrů a také pro informaci stavu akumulátorů a celého systému. Nejprve prostudujte patřičné technologie. Dále specifikujte provozní parametry a limity nabíječky, na jejichž podkladě provedte návrh zapojení a následnou realizaci. Rovněž uskutečňte ověřovací provoz spolu s měřením vybraných provozních parametrů. Veškeré kroky návrhu a použité teoretické poznatky, stejně jako návrh a realizaci podrobně popište v textové části diplomové práce.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 10.2.2025

**Termín odevzdání:** 26.5.2025

**Vedoucí práce:** Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fucík, 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**

Predmetom tejto diplomovej práce je návrh a realizácia prenosnej nabíjačky akumulátorov. Text práce popisuje základné princípy fungovania zariadenia a postup jeho návrhu. Zariadenie je navrhnuté pre nabíjanie a vybíjanie rôznych typov akumulátorov. Okrem toho poskytuje množstvo ďalších funkcií, ako sú vyrovnávanie napätí jednotlivých článkov, meranie vnútorného odporu a kapacity akumulátorov. Používateľom je k dispozícii jednoduché a intuitívne nastavenie parametrov prostredníctvom dotykového displeja.

## **Kľúčové slová**

Nabíjačka, dotykový displej, akumulátor, spínaný zdroj, elektronická záťaž, ESP32, USB-C

## **Abstract**

The subject of this thesis is the design and implementation of a portable battery charger. This thesis describes the basic principles of operation of the device and the procedure for its design. The device is designed for charging and discharging various types of batteries. In addition, it provides a number of other functions, such as equalizing the voltages of individual cells, measuring the internal resistance and capacity of batteries. Users have access to simple and intuitive parameter settings via a touch screen.

## **Keywords**

Charger, touchscreen, battery, switching power supply, electronic load, ESP32, USB-C

## **Bibliografická citácia**

ŠKOTNÁR, Martin. Přenosná univerzální nabíječka akumulátorů. Online, diplomová práce. Vladimír LEVEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168692>. [cit. 2025-05-26]..

# Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko študenta:** *Martin Škotnár*

**VUT ID študenta:** *230520*

**Typ práce:** *Diplomová práca*

**Akademický rok:** *2024/25*

**Téma záverečnej práce:** *Přenosná univerzální nabíječka akumulátorů*

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/ho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Zb.

V Brne dňa: 26.5.2025

-----  
podpis autora

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu Diplomovej práce Ing. Vladimírovi Levkovi, Ph.D. za metodickú, pedagogickú, odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa: 26.5.2025

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>1. POUŽÍVANÉ DRUHY AKUMULÁTOROV .....</b>	<b>13</b>
1.1 OLOVENÝ AKUMULÁTOR .....	13
1.2 NI-CD AKUMULÁTOR .....	14
1.3 NI-MH AKUMULÁTOR .....	16
1.4 LI-ION AKUMULÁTOR .....	16
<b>2. TEÓRIA PRE NÁVRH NABÍJAČKY .....</b>	<b>18</b>
2.1 SPÍNANÉ ZDROJE .....	18
2.1.1 Znižujúce meniče napätia .....	18
2.1.2 Zvyšujúce meniče napätia .....	19
2.1.1 Znižujúce-zvyšujúce meniče napätia .....	19
2.2 ŠTANDARD POWER DELIVERY .....	20
2.3 ELEKTRONICKÁ ZÁŤAŽ .....	22
2.3.1 Výber tranzistorov pre lineárne aplikácie .....	23
2.4 MERANIE VNÚTORNÉHO ODPORU AKUMULÁTORA .....	25
2.4.1 DC metóda merania vnútorného odporu .....	25
2.4.2 AC metóda merania vnútorného odporu .....	26
2.5 VYROVNÁVANIE NAPÄTÍ ČLÁNKOV .....	26
2.5.1 Pasívne vyrovnávanie napätí .....	27
2.5.2 Aktívne vyrovnávanie napätí .....	28
2.5.3 Vyrovnávanie napätí metódou spínaných kondenzátorov .....	29
<b>3. NÁVRH UNIVERZÁLNEJ NABÍJAČKY .....</b>	<b>31</b>
3.1 ROZDELENIE NÁVRHU DO BLOKOV .....	31
3.2 PARAMETRE ZARIADENIA .....	32
3.3 VSTUPNÁ OCHRANA .....	32
3.4 VÝSTUPNÁ OCHRANA .....	34
3.5 NAPÁJACIE ZDROJE .....	35
3.6 RIADIACE OBVODY .....	35
3.6.1 Užívateľské rozhranie .....	36
3.6.2 Meranie teploty .....	36
3.6.3 Riadenie otáčok ventilátora .....	37
3.7 SPÍNANÝ ZDROJ .....	38
3.8 ELEKTRONICKÁ ZÁŤAŽ .....	40
3.9 PASÍVNE VYROVNÁVANIE NAPÄTÍ .....	42
3.10 MERANIE NAPÄTIA A PRÚDU .....	43
3.11 NAPÁJANIE POMOCOU USB-C .....	44
3.12 NÁVRH CHLADENIA .....	45
<b>4. REALIZÁCIA ZARIADENIA .....</b>	<b>48</b>
4.1 NÁVRH DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV .....	48
4.2 MECHANICKÁ KONŠTRUKCIA ZARIADENIA .....	49
4.3 PROGRAMOVÉ VYBAVENIE .....	50
4.4 OVLÁDANIE ZARIADENIA .....	52
<b>5. TESTOVANIE ZARIADENIA .....</b>	<b>56</b>

5.1	ZÁKLADNÉ TESTOVANIE ZARIADENIA .....	56
5.2	TESTOVANIE NABÍJANIA A VYBÍJANIA AKUMULÁTORA .....	58
<b>ZÁVER</b>	.....	<b>62</b>

# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Priebeh napätia v závislosti od stavu nabitia oloveného akumulátora [3] .....	14
Obrázok 2 Priebeh napätia v závislosti od stavu nabitia Ni-Cd akumulátora [3] .....	15
Obrázok 3 Metódy ukončenia nabíjacieho cyklu podľa napätia [3] .....	15
Obrázok 4 Priebeh napätia v závislosti od stavu nabitia Ni-MH akumulátora [3].....	16
Obrázok 5 Priebeh napätia v závislosti od stavu nabitia Li-ion akumulátora[3] .....	17
Obrázok 6 Princíp funkcie znižujúceho meniča [4] .....	18
Obrázok 7 Princíp funkcie zvyšujúceho meniča [4] .....	19
Obrázok 8 Princíp znižovania napätia [5].....	19
Obrázok 9 Princíp zvyšovania napätia [5] .....	20
Obrázok 10 Používané druhy USB konektorov[6] .....	21
Obrázok 11 Schéma prúdového zdroja .....	22
Obrázok 12 Bezpečná oblasť použitia tranzistoru[10].....	23
Obrázok 13 Teplotná stabilita tranzistoru [10] .....	24
Obrázok 14 Náhradná schéma akumulátora [11].....	25
Obrázok 15 Princíp merania vnútorného odporu DC metódou.....	25
Obrázok 16 Nabíjanie akumulátorov bez vyrovnávania napätí [13].....	27
Obrázok 17 Vyrovnávanie napätí akumulátorov pomocou pasívnej metódy[13].....	28
Obrázok 18 Schéma zapojenia pasívneho vyrovnávania napätí[15].....	28
Obrázok 19 Vyrovnávanie napätí akumulátorov pomocou aktívnej metódy[13] .....	29
Obrázok 20 Prvá časť cyklu vyrovnávania napätí spínanými kondenzátormi [16].....	29
Obrázok 21 Druhá časť cyklu vyrovnávania napätí spínanými kondenzátormi .....	30
Obrázok 22 Bloková schéma zariadenia.....	31
Obrázok 23 Schéma zapojenia vstupnej ochrany.....	32
Obrázok 24 Schéma zapojenia blokovania DC zdroju napätia .....	33
Obrázok 25 Schéma zapojenia výstupnej ochrany.....	34
Obrázok 26 Bloková schéma napájania .....	35
Obrázok 27 Schéma zapojenia užívateľského rozhrania .....	36
Obrázok 28 Schéma zapojenia termistora.....	37
Obrázok 29 Schéma riadenia otáčok ventilátora.....	37
Obrázok 30 Schéma zapojenia spínaného zdroju.....	38
Obrázok 31 Schéma zapojenia elektronickej záťaže.....	41
Obrázok 32 Schéma zapojenia pasívneho vyrovnávania a merania napätí.....	43
Obrázok 33 Schéma zapojenia merania napätia a prúdu.....	44
Obrázok 34 Schéma zapojenia Power Delivery .....	45
Obrázok 35 Náhradné zapojenie tepelného obvodu.....	46
Obrázok 36 3D model dosky plošných spojov .....	48
Obrázok 37 3D model konštrukcie zariadenia .....	49
Obrázok 38 Osadená konštrukcia zariadenia .....	49
Obrázok 39 Vývojový diagram programu zariadenia.....	50
Obrázok 40 Hlavné menu grafického rozhrania .....	52
Obrázok 41 Menu pre nastavenie parametrov v režime nabíjania .....	53
Obrázok 42 Menu pre ovládanie vyrovnávania napätí.....	53
Obrázok 43 Menu pre nastavenie parametrov testovania akumulátora.....	54
Obrázok 44 Mechanická ochrana zariadenia .....	55
Obrázok 45 Priebehy napätia obvodov elektronickej záťaže pri skokovej zmene prúdu.....	57
Obrázok 46 Zvlnenie napätia na výstupe v režime znižovania napätia.....	57

Obrázok 47 Zvlnenie napätia na výstupe v režime zvyšovania napätia .....	58
Obrázok 48 Graf vybíjania Li-ion akumulátoru.....	59
Obrázok 49 Graf nabíjania Li-ion akumulátoru.....	59
Obrázok 50 Graf vyrovnávania napätí článkov akumulátoru .....	60
Obrázok 51 Priebeh napätia akumulátoru pri meraní vnútorného odporu .....	61

# ZOZNAM TABULIEK

## **Nenalezena položka seznamu obrázků.**

Tabuľka 1 Zozna m USB protokolov [9].....	21
---	----

# ÚVOD

V posledných rokoch sa prenosné elektrické zariadenia stali neoddeliteľnou súčasťou nášho každodenného života. Tento trend má za následok nárast počtu zariadení, ktoré sú závislé od prenosných zdrojov energie, ako sú mobilné telefóny, počítače alebo elektrické vozidlá. Spolu s tým súvisí nárast dopytu po rýchlejšom a efektívnejšom nabíjaní prípadne údržbe a testovaní akumulátorov.

Univerzálna nabíjačka musí spĺňať požiadavky na bezpečné nabíjanie vybraných typov akumulátorov. Dôležitým prvkom sú ochrany voči prehriatiu, prepólovaniu alebo skratovým prúdom. Súčasťou zariadení býva možnosť vybíjať akumulátory na požadovanú hodnotu napätia, čo je nevyhnutné pri ich dlhodobom uskladnení. Medzi základné indikátory stavu akumulátora patrí ich vnútorný odpor a kapacita.

Cieľom práce je navrhnúť univerzálnu nabíjačku akumulátorov s čo najväčším množstvom funkcií. Zariadenie bude schopné nabíjať, vybíjať a testovať rôzne akumulátory. Pre určenie stavu akumulátora bude využívané meranie kapacity pri nabíjaní alebo vybíjaní. Zariadenie bude podporovať meranie vnútorného odporu. Režim vybíjania bude podporovať automatické odpojenie po prekročení stanoveného napätia, aby sa predišlo poškodeniu akumulátora. Celé zariadenie bude ovládané pomocou grafického dotykového displeja.

Komerčne dostupné riešenia sú zvyčajne závislé od napájania z elektrickej siete, čo znižuje ich mobilitu. Režim vybíjania akumulátorov býva často veľmi obmedzený malou výkonovou zaťažiteľnosťou. Výhodou navrhovaného zariadenia je možnosť napájania pomocou protokolu USB-C Power Delivery, alebo druhým akumulátorom s potrebnými ochranami. Taktiež výhodou je možnosť využitia navrhovaného zariadenia ako laboratórneho zdroja alebo elektronickej záťaž.

V prvej časti práce sa nachádza prehľad v súčasnosti najviac používaných akumulátorov. Sú tu popísané výhody a nevýhody jednotlivých technológií, spolu s informáciami o ich možnostiach bezpečného nabíjania a vybíjania. Ďalej práca pojednáva o spôsoboch nabíjania a vybíjania akumulátorov a technológiách využívaných pre tieto účely.

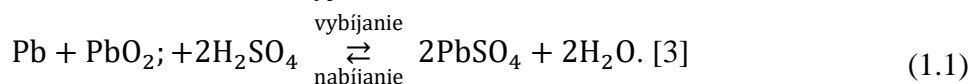
Praktická časť práce opisuje postup návrhu zariadenia a výber správnych komponentov, ktorý je popísaný v jednotlivých kapitolách. Nasledovne je opísaný celý postup realizácie zariadenia. Záver práce obsahuje overenie funkčnosti jednotlivých obvodov a testovanie režimov navrhnutého zariadenia.

# 1. POUŽÍVANÉ DRUHY AKUMULÁTOROV

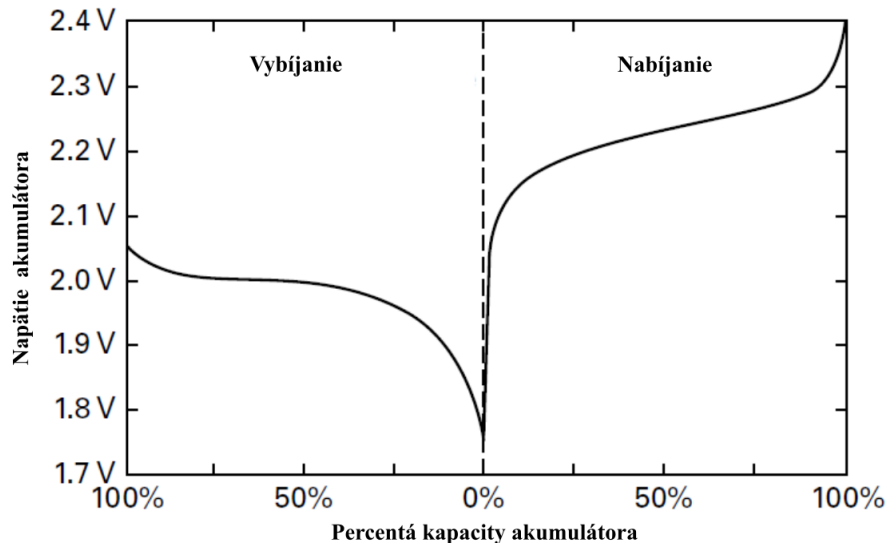
Elektrochemické články rozdeľujeme do dvoch základných kategórií, a to na primárne a sekundárne. Primárne články sú určené pre zariadenia s malou spotrebou energie a bez údržbovou prevádzkou. Po spotrebovaní energie uloženej v batérii je potrebná výmena za novú. To má za následok environmentálnu záťaž. Sekundárne články je možné po ich vybití znovu nabiť a používať ďalej, preto sú vhodné do často používaných zariadení ako sú hračky, ovládače, rádiá a podobne. Naopak nie sú vhodné do zariadení s nízkou spotrebou, ktoré sa starajú o bezpečnosť ako sú núdzové senzory alebo medicínske zariadenia. V týchto prípadoch je rozhodujúcim faktorom životnosť batérie a pokles napätia v závislosti od veku akumulátora. [1]

## 1.1 Olovený akumulátor

Jeden z najstarších a najpoužívanejších sekundárnych článkov funguje na princípe elektrochemických reakcií medzi olovom, oxidom olovičitým a kyselinou sírovou. Tieto reakcie prebiehajú počas nabíjania a vybíjania akumulátora. Pri procese vybíjania, olovo na zápornej elektróde oxiduje na síran olovnatý, čo má za následok uvoľnenie elektrónov, ktoré vytvárajú elektrický prúd. Na kladnej elektróde sa oxid olovičitý redukuje na síran olovnatý, pričom spotrebúva elektróny. Elektrolytom je kyselina sírová, ktorá sa počas opísaného procesu mení na vodu. Pri nabíjaní prebiehajú reakcie opačným smerom. Na zápornej elektróde sa redukuje síran olovnatý späť na olovo a na kladnej elektróde oxiduje na oxid olovičitý, pričom sa kyselina sírová obnovuje. Celková chemická reakcia v olovenom akumulátore sa dá vyjadriť ako:



Nominálne napätie jedného článku oloveného akumulátora je 2 V. Priebeh napätia akumulátora pri nabíjaní a vybíjaní je zobrazený na obrázku 1. Jednotlivé články sú spájané do série, aby vytvorili akumulátor s vyšším napätím. Najčastejšie používané napätia sú 6 V a 12 V. Olovené akumulátory sú často využívané aj dnes hlavne v oblasti automobilov a záložných zdrojov energie. Veľkou výhodou je ich nízka cena, spoľahlivosť a schopnosť dodávať veľké prúdy. Energetická hustota sa pohybuje od 10 do 44 Wh/kg. Samovybíjanie batérii sa líši od konkrétnej použitej technológie. Najlepšie výsledky dosahujú bezúdržbové akumulátory, kde sa pohybuje tento parameter na úrovni 5% na mesiac. [3]



Obrázok 1 Priebeh napätia v závislosti od stavu nabitia oloveného akumulátora [3]

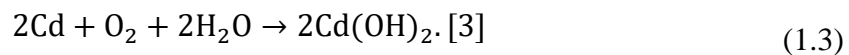
Nabíjací proces olovených akumulátorov je najčastejšie vykonávaný metódou konštantného napätia. Táto metóda môže vyvolať veľké prúdy, ktoré by mohli poškodiť nabíjaný akumulátor, preto býva často zavedený maximálny prúdový limit, ktorým môže byť batéria nabíjaná. Maximálne napätie závisí od konfigurácie akumulátora, avšak nemalo by byť prekročené napätie 2,4 V na článok. [3]

## 1.2 Ni–Cd akumulátor

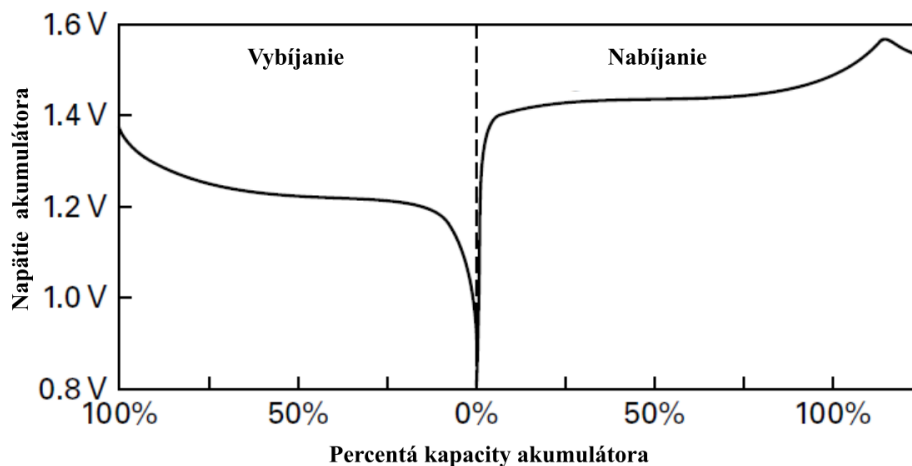
Využitie technológie Ni–Cd akumulátorov má uplatnenie od prenosných zariadení až po výkonové aplikácie. Počas procesu vybijania prebieha na pozitívnej elektróde redukcia niklového oxihydroxidu na niklový hydroxid. Reakcia pozitívnej elektródy:



Negatívna elektróda vyrobená z kadmia reaguje počas vybijania s hydroxidovými iónmi a vytvára kadmiový hydroxid. Reakcia negatívnej elektródy :

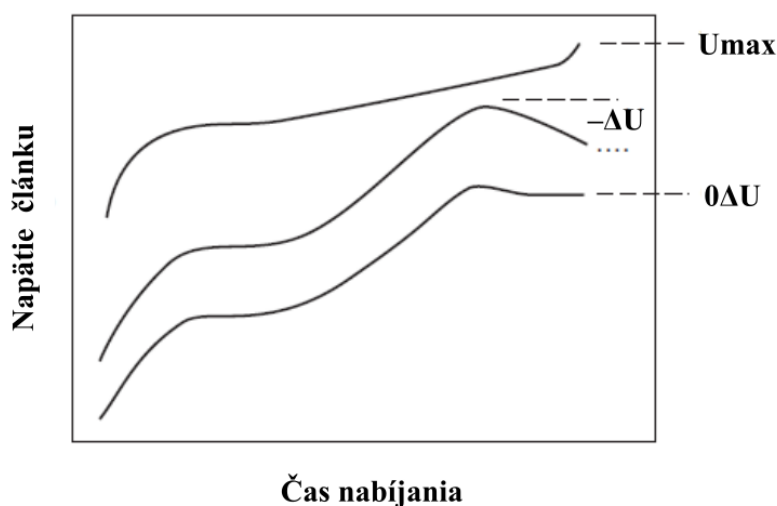


Nominálne napätie jedného článku Ni–Cd akumulátora je 1.3 V. Priebeh napätia akumulátoru pri nabíjaní a vybijaní je zobrazený na obrázku 2. Široké uplatnenie tejto technológie bolo hlavne z dôvodu vyššej energetickej hustoty ako pri olovených akumulátoroch. V dnešnej dobe je táto technológia nahradzovaná technológiou Ni–Mh, a to z dôvodu environmentálnej záťaže. Aj napriek možnosti dodávania vyšších výkonov v porovnaní s Ni–Mh je toxicita kadmia zásadným problémom. Samovybijanie akumulátorov sa pohybuje okolo 10% na mesiac. Energetická hustota sa pohybuje od 18 do 75 Wh/kg. [3]



Obrázok 2 Priebeh napätia v závislosti od stavu nabitia Ni-Cd akumulátora [3]

Nabíjanie prebieha dodávaním konštantného prúdu. Ukončenie nabíjacieho procesu pri technológii Ni-Cd a Ni-MH je znázornené na obrázku 3. Najčastejšie sú využívané metódy tri základné metódy  $U_{max}$ ,  $-\Delta U$  a  $0\Delta U$ .

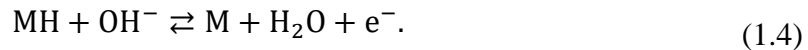


Obrázok 3 Metódy ukončenia nabíjacieho cyklu podľa napätia [3]

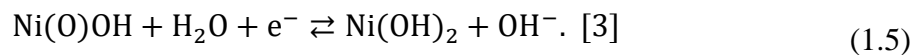
Jednou z najjednoduchších metód je nabíjanie konštantným prúdom počas vopred stanoveného času, ale nevýhodou je nutnosť úplného vybitia akumulátora pred začiatkom nabíjacieho procesu. Nabíjacie prúdy sú kvôli bezpečnosti nízke, okolo  $0,1 \times$  kapacita akumulátora v Ah, čo má za následok dlhé nabíjacie časy. Ďalšou metódou je ukončenie nabíjacieho procesu pri prekročení definovaného napätia  $U_{max}$ . Metóda  $-\Delta U$  je založená na poklese napätia pri konci nabíjacieho procesu. Pokles napätia závisí od používanej technológie pre Ni-Cd, to je približne 10 mV. Po poklese napätia nastáva oblasť, kde je takmer nulová zmena napätia, preto sa táto metóda volá  $0\Delta U$ . Poslednou metódou je monitorovanie teploty, kde v závere nabíjacieho cyklu nastane rapídne zvýšenie teploty. [3]

### 1.3 Ni–MH akumulátor

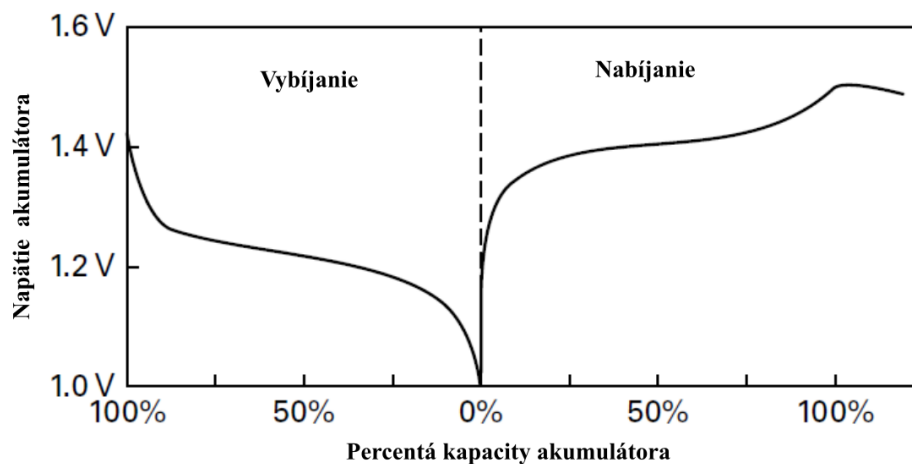
Nikel–metal hydrid (Ni–MH) články sú nástupcami Ni-Cd článkov. Hlavný rozdiel spočíva v materiáli zápornej elektródy, kde je toxické kadmium nahradené za kovové zliatiny, ktoré dokážu viazať alebo uvoľňovať vodík. Pri vybíjaní, negatívna elektróda absorbuje vodík a vytvára kovový hydrid. Reakcia negatívnej elektródy :



Positívna elektróda reaguje s vodou a redukuje sa na hydroxid nikelnatý. Reakcia pozitívnej elektródy :



Nominálne napätie jedného článku Ni–Mh akumulátora je 1.2 V. Priebeh napätia akumulátora pri nabíjaní a vybíjaní je zobrazený na obrázku 4. Hlavným využitím týchto článkov boli v minulosti prvé elektrické autá. V súčasnosti sú využívané v letectve a na vojenské účely. Energetická hustota sa pohybuje od 23 do 92 Wh/kg. Samovybíjanie akumulátora sa pohybuje okolo 20% na mesiac. Taktiež sú viac náchylné na prebitie ako je to v prípade Ni-Cd. [3]



Obrázok 4 Priebeh napätia v závislosti od stavu nabitia Ni-MH akumulátoru [3]

Proces nabíjania a ukončovanie nabíjacieho procesu je takmer totožné s Ni-Cd. Rozdiel nastáva iba pri metóde  $-\Delta U$  pre Ni-MH, kde je pokles napätia približne 5 mV. [3]

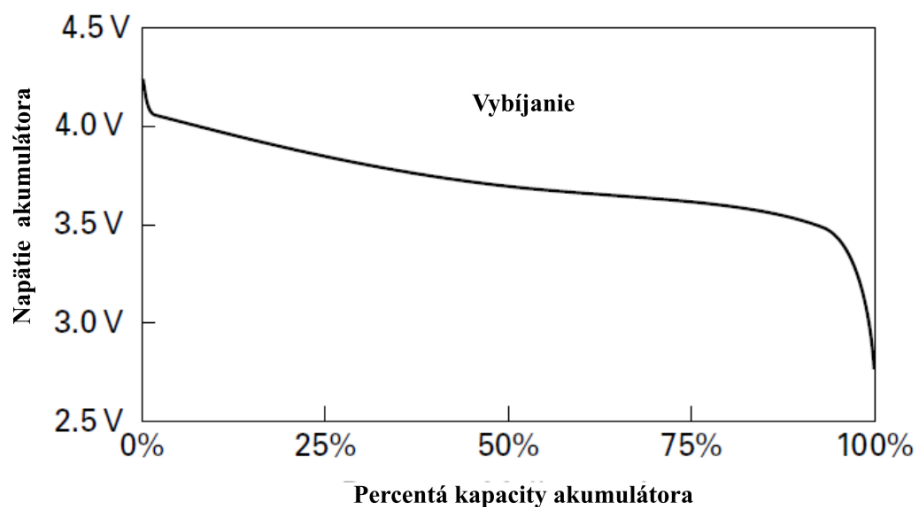
### 1.4 Li-ion akumulátor

Lítiové akumulátory predstavujú jednu z najmodernejších a najpokročilejších technológií. Vďaka ich vysokej energetickej hustote, postupne nahrádzajú staršie typy, ako sú Ni-MH a Ni-Cd akumulátory.

Základné časti lítiového článku sú katóda a anóda pre ukladanie lítiových iónov a elektrolyt pre prenášanie pozitívne nabitých iónov lítia. Medzi najpoužívanejšie materiály katódy patria lítium–kobalt oxid alebo lítium–železo-fosfát. Pre anódu je často

používaný grafit. Pohyb lítiových iónov generuje voľné elektróny v anóde, čo spôsobuje vznik napätia na termináloch článku. Separátor fyzicky oddeľuje anódu a katódu, umožňuje prechod lítiových iónov, ale bráni pohybu elektrónov v batérii. Počas nabíjania sa lítiové ióny pohybujú cez elektrolyt od katódy smerom k anóde. Elektróny sa presúvajú opačným smerom cez nabíjací obvod, aby vyrovnali náboj. Pri procese vybíjania fungujú procesy opačne. [3]

Nominálne napätie jedného článku Li-ion je 3.7 V. Priebeh napätia akumulátora v závislosti od stavu nabitia je zobrazený na obrázku 5. V súčasnosti majú najvyššiu energetickú hustotu v porovnaní s ostatnými technológiami 84 až 210 Wh/kg. Rovnako majú výborné vlastnosti v oblasti samovybíjania, kde priemerne stratia 4% za mesiac. Využitie Li-ion článkov je široké, od oblasti drobnej elektroniky až po elektrické autá. [3]



Obrázok 5 Priebeh napätia v závislosti od stavu nabitia Li-ion akumulátora[3]

Pri nabíjaní lítiových akumulátorov sa používa metóda konštantného prúdu - konštantného napätia (CCVC). Napätie jedného plne nabitého článku Li-ion je 4,20 V. V prvej fáze nabíjania je zvolený maximálny nabíjací prúd. Postupným nabíjaním nastane zvýšenie napätia na úroveň 4,20V, v tomto bode začne prúd klesať až na úroveň ukončovacieho prúdu udávanú výrobcom. Po dosiahnutí ukončovacieho prúdu je nabíjací proces ukončený. Zvyčajne býva ukončovací prúd  $0,05 \times$  kapacita akumulátora v Ah. Lítiové akumulátory nie sú tolerantné na prebíjanie a podbíjanie, preto je potrebné zabrániť vzniku týchto stavov. [3]

## 2. TEÓRIA PRE NÁVRH NABÍJAČKY

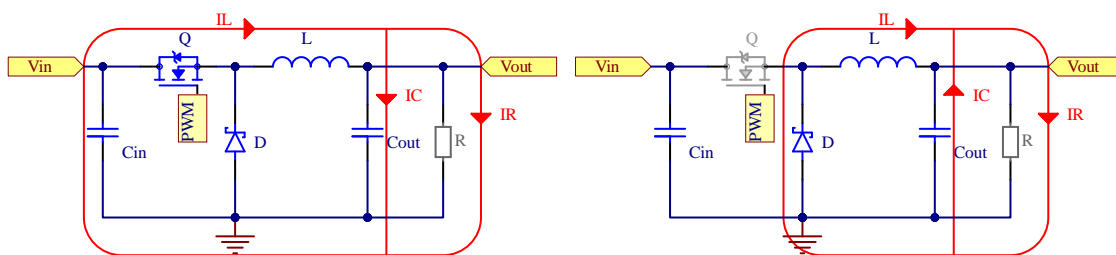
Pre správny návrh zariadenia, je potrebné sa oboznámiť so základnými princípmi funkcie jednotlivých častí nabíjačky. Pochopenie základných princípov umožňuje výber optimálnych zapojení a komponentov pre dosiahnutie čo najlepších výsledkov. V tejto kapitole sú popísané technológie, ktoré využívajú nabíjanie a vybíjanie akumulátorov. Od získania napájania pomocou protokolu Power Delivery, cez jeho spracovanie pomocou spínaných zdrojov napätia. Ďalej je popísaná teória elektronických záťaží pre vybíjanie akumulátorov a meranie ich parametrov. V poslednej časti je rozoberaná problematika vyrovnávania napätia jednotlivých článkov akumulátorov.

### 2.1 Spínané zdroje

Spínané zdroje sú častou voľbou pre výkonové aplikácie, ale aj aplikácie vyžadujúce vysokú efektivitu prevodu napätia. Základné rozdelenie spínaných zdrojov je podľa potreby znižovania alebo zvyšovania napätia. Znižujúce meniče prevádzajú vstupné napätie na menšie výstupné napätie. Pri použití zvyšujúceho napätia je prevádzané malé vstupné napätie na väčšie výstupné. Pre aplikácie s premenlivým vstupným napätím ako sú batériové zdroje, to môže byť problematické. Ideálnym riešením sú meniče schopné zvyšovať aj znižovať napätie podľa potreby.

#### 2.1.1 Znižujúce meniče napätia

Znižujúce meniče napätia (buck convertor) sú určené pre znižovanie vstupného napätia na menšie výstupné napätie. Princíp funkcie meniča je znázornený na obrázku 6.

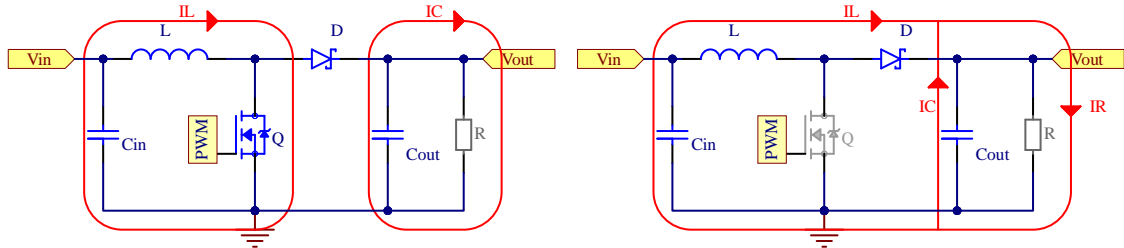


Obrázok 6 Princíp funkcie znižujúceho meniča [4]

Spínacím prvkom je tranzistor, ktorý pripája a odpája vstupné napätie na induktor. V zopnutom stave tečie prúd cez induktor L do výstupného kondenzátora a záťaže. Prúd pretekajúci induktorom vytvára magnetické pole a nabíja výstupný kondenzátor. V druhej polovici cyklu je tranzistor vypnutý, čo má za následok prerušenie prúdu tečúceho do výstupného kondenzátora a záťaže. Magnetické pole cievky skolabuje a vygeneruje napätie opačnej polarity. Obvod je uzavretý cez diódu v priepustnom smere, čo umožňuje napájať záťaž z naindukovaného napätia a energie uloženej v kondenzátore. Tento cyklus je periodicky opakovaný. [4]

### 2.1.2 Zvyšujúce meniče napätia

Topológia zvyšujúceho meniča napätia (boost convertor) je používaná v prípade potreby vyššieho napätia na výstupe ako na vstupe. Princíp funkcie zvyšujúceho meniča je znázornený na obrázku 7.

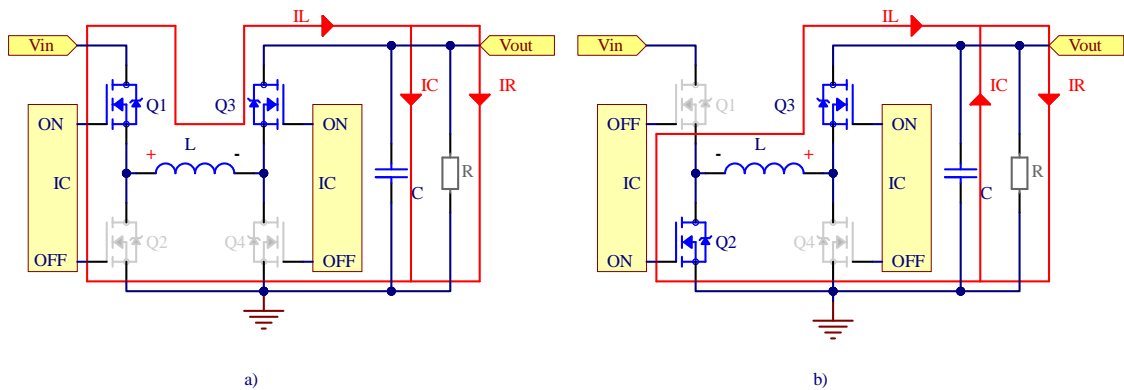


Obrázok 7 Princíp funkcie zvyšujúceho meniča [4]

V prvej časti cyklu je tranzistor zopnutý čo, umožňuje pretekať prúdu cez induktor, ktorý vytvorí magnetické pole. Pripojená záťaž R je napájaná iba z výstupného kondenzátora. V druhej polovici cyklu je tranzistor v stave vysokej impedancie, čo preruší prúd pretekajúci cez induktor. Magnetické pole induktora skolabuje a naindukuje napätie opačnej polarity. Naindukované napätie je zapojené sériovo so vstupným napätím, a preto tieto napätia sú sčítané. To umožní pretekanie prúdu cez priepustne polarizovanú diódu, nabíjať výstupný kondenzátor a napájať záťaž. [4]

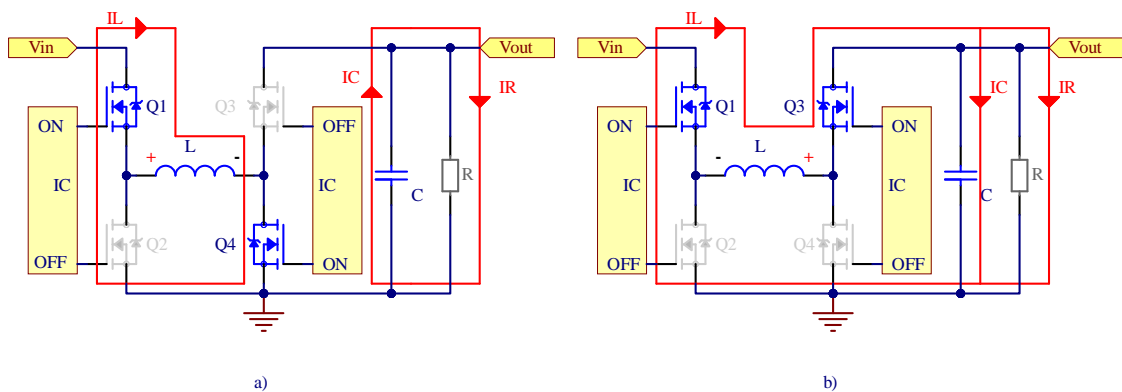
### 2.1.1 Znižujúce-zvyšujúce meniče napätia

Topológia znižujúceho-zvyšujúceho DC/DC meniča (buck-boost converter) je kombináciou znižujúceho a zvyšujúceho meniča napätia, čo vedie k zložitejšiemu zapojeniu komponentov. Výhodou tohoto zapojenia je schopnosť udržiavať konštantné napätie na výstupe, nezávisle od vstupného napätia. Spínacie prvky obvodu sú najčastejšie tranzistory typu MOSFET, pre ich dobré vlastnosti pri vysokých spínacích frekvenciách. Schottkyho diódy, používané v nízko výkonových meničoch, sú často nahradzované spínacími tranzistormi. Následkom toho je zvýšenie celkovej efektivity zapojenia. [4]



Obrázok 8 Princíp znižovania napätia [5]

Ak bude zapojenie pracovať v režime znižovania napätia, tranzistor Q4 bude trvalo vypnutý a tranzistor Q3 trvalo zapnutý. Na obrázku 8 a) v prvej polovici cyklu je tranzistor Q1 zapnutý, čo umožňuje prúdu pretekať cez cievku a tranzistor Q3. Prúd ďalej nabíja výstupný kondenzátor C a dodáva energiu do záťaže. Tranzistor Q2 je v prvej polovici cyklu vypnutý. V druhej polovici cyklu je tranzistor Q1 vypnutý, teda vstupné napätie je odpojené. Magnetické pole induktora skolabuje, čo vedie k naindukovaniu napätia opačnej polarity. Otvorením tranzistoru Q2 umožníme prúdu pretekať smerom k záťaži. Pri poklese prúdu dodávaného induktorom do záťaže, sa postupne začne vybíjať kondenzátor C. Výstupné napätie je možné regulovať pomocou riadenia šírky pulzu na hradlo tranzistoru Q1 a Q2. [5]



Obrázok 9 Princíp zvyšovania napätia [5]

Režim zvyšovania napätia je znázornený na obrázku 9. Tranzistor Q1 trvalo otvorený a tranzistor Q2 trvalo zatvorený. V prvej polovici cyklu je tranzistor Q4 otvorený, čo spôsobí pretekajúce prúdu cez cievku. Tranzistor Q3 je zatvorený, čoho dôsledkom je napájanie záťaže z výstupného kondenzátora, ktorý bol nabitý v predchádzajúcom cykle. V druhej polovici cyklu je tranzistor Q4 zatvorený, čo spôsobí zastavenie pretekajúceho prúdu cez induktor. Po rozopnutí tranzistora Q4 sa induktor začne správať ako zdroj energie s opačnou polaritou. Vstupné napätie a napätie indukované na induktore sú v obvode radené sériovo, výsledkom je ich sčítanie. Zopnutím tranzistoru Q3 je sčítané napätie pripojené na výstup meniča. Kondenzátor C sa v tejto fáze nabíja na hodnotu vstupného napätia v súčte s napätím indukovaným na induktore. Výstupné napätie je možné regulovať pomocou riadenia šírky pulzu na hradlo tranzistoru Q4 a Q3. [5]

## 2.2 Štandard Power Delivery

Všetky elektrické zariadenia potrebujú pre svoju činnosť zdroj elektrickej energie. Z tohto dôvodu existuje široká škála zdrojov s rôznymi parametrami a spôsobmi pripojenia ku koncovým zariadeniam. Tieto zdroje energie sú dodávané spolu s koncovými zariadeniami a často ostávajú nevyužitú po skončení životnosti zariadenia. Pre životné prostredie to predstavuje veľkú ekologickú záťaž. Riešením je využitie univerzálneho

zdroja energie pre rôzne zariadenia, ktorý na základe komunikácie dodá potrebné parametre koncovému zariadeniu. Vývoj USB konektorov je zachytený na obrázku 10. Snaha o zjednotenie napájacích zdrojov viedla k vytvoreniu nových komunikačných protokolov. Súčasne vznikala potreba pre konektor, ktorý dokáže dodávať potrebné výkony a zabezpečovať komunikáciu medzi zdrojom a spotrebičom energie. V posledných rokoch, túto úlohu vykonáva USB-C. [6]



Obrázok 10 Používané druhy USB konektorov [6]

Výkon, ktorý je možné dodať cez USB postupom času narastá. Pre porovnanie USB 2.0 dokáže dodať 5V a 500mA. V dnešnej dobe je to nedostatočné pre moderné zariadenia s vyšším výkonom. Pri použití USB-C 1.2 je možné dodávať do zariadenia 5 V a 3 A. Veľký skok nastal pri protokole Power Delivery 3.0, ktorý je schopný dodať výkon 100 W. Tento protokol vznikol ako odozva na stále rastúce nárok na výkon dodávaný koncovým zariadeniam. Prehľad maximálnych možných výkonov ktoré môžu dodať jednotlivé protokoly je znázornený v tabuľke 1. Najnovší protokol dokáže dodávať výkon až 240 W pri 48 V. Takýto výkon je dostatočný aj pre napájanie výkonných zariadení, ako sú napríklad prenosné počítače. Protokol Power Delivery je však dostupný iba v kombinácii s použitím konektoru USB-C. [8]

Tabuľka 1 Zoznam USB protokolov [9]

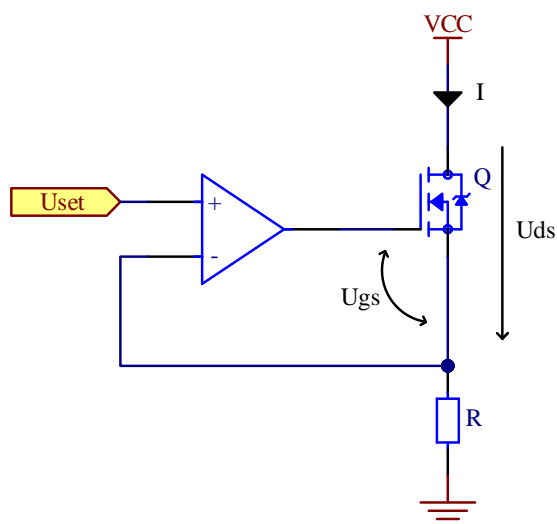
Protokol	Maximálne napätie [V]	Maximálny prúd [A]	Maximálny výkon [W]
USB 2.0	5	0,5	2,5
USB 3.1	5	0,9	4,5
USB-C 1.2	5	3	15
USB PD 3.0	20	5	100

Pri využívaní protokolu Power Delivery je potrebná komplexnejšia komunikácia medzi zariadeniami. Často sa na tento účel používajú dedikované čipy, ktoré majú zakomponované aj ďalšie funkcie na správu napájania. Koncové zariadenie si následne vyžiada výkon potrebný pre jeho správnu funkciu. Na základe toho sú nastavené napäťové a prúdové úrovne. Základné napäťové úrovne v štandardnom napäťovom

rozsahu sú 5 V, 9 V, 12 V, 15 V a 20 V pri maximálnom prúde 3 A. Pre výkonové aplikácie je možné využiť 20 V až do 5 A. Použitím rozšíreného výkonového rozsahu je možné získať napätie 28 V, 36 V a 48 V. Pri používaní prúdov nad 3 A je potrebný elektronicky označený kábel [7]. Toto elektronické označenie oznamuje na aký maximálny prúd je možné daný kábel využiť. [8]

## 2.3 Elektronická zát'az'

Pre možnosť vybijania a testovania akumulátorov je dôležité, aby bolo možné nastaviť vybíjací prúd v širokom rozsahu. Jednoduché metódy ako použitie výkonového rezistoru túto požiadavku nespĺňajú. Riešením je využitie prúdového zdroja, kde je regulovaným prvkom tranzistor. Ak je použitý tranzistor typu MOSFET, je možné ovládať pretekajúci prúd tranzistoru na základe priloženého napätia  $U_{gs}$ . Tranzistor pracujúci v režime saturácie udržiava konštantný prúd, ktorý je závislý od napätia  $U_{ds}$  a teploty, preto je potrebná spätná väzba na regulovanie pretekajúceho prúdu.



Obrázok 11 Schéma prúdového zdroja

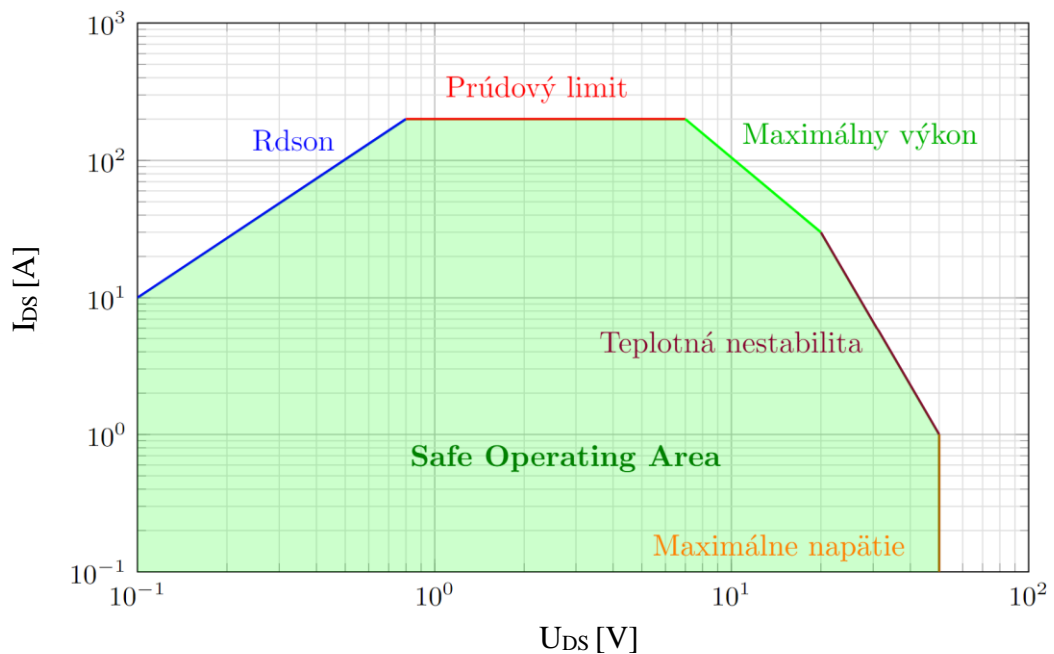
Schéma prúdového zdroja na obrázku 11 znázorňuje rezistor R slúžiaci na meranie pretekajúceho prúdu, ktorý vytvorí na rezistore úbytok napätia v závislosti na veľkosti prúdu a odpore rezistoru. Tento úbytok napätia je privádzaný na invertujúci vstup operačného zosilňovača ako záporná spätná väzba. Operačný zosilňovač je zapojený ako sledovač, preto bude udržiavať napätia na invertujúcom a neinvertujúcom vstupe rovnaké. Výstup operačného zosilňovača je privedený na hradle tranzistora, ktorý podľa priloženého napätia riadi veľkosť pretekajúceho prúdu. Na neinvertujúci vstup operačného zosilňovača je privedené referenčné napätie  $U_{SET}$ , ktoré určuje veľkosť pretekajúceho prúdu podľa rovnice

$$U_{SET} = R \cdot I. \quad (2.1)$$

Pri zvýšení pretekajúceho prúdu sa zvýši úbytok napätia na odpore, na čo následne zareaguje spätná väzba, zníži napätia na hradle tranzistora, čím ho privrie a zvýši jeho odpor, čo sa prejaví znížením pretekajúceho prúdu. V prípade zníženia prúdu sa tranzistor naopak viac otvorí, teda klesne odpor a vzrastie prúd pretekajúci tranzistorom.

### 2.3.1 Výber tranzistorov pre lineárne aplikácie

Pre správne fungovanie prúdového zdroja je potrebné zohľadniť pracovné parametre v režime vybíjania akumulátorov. Najdôležitejšie parametre sú maximálne povolené napätie  $U_{DS}$  a prúd  $I_D$ , pri prekročení týchto parametrov nastane deštrukcia tranzistora. Pri využívaní MOSFETu v saturácii dochádza k veľkej výkonovej strate, teda ďalším dôležitým parametrom je povolená maximálna výkonová strata. Tento parameter však neurčuje dobu tejto maximálnej záťaže. Preto je potrebné pri výbere tranzistora typu MOSFET zohľadniť odporúčanie výrobcu a prevádzkovať zariadenie v medziach SOA (Safe Operation Area). Toto odporúčanie zohľadňuje všetky nežiadúce mechanizmy, z toho dôvodu je prevádzkovanie v tomto režime bezpečné. [10]

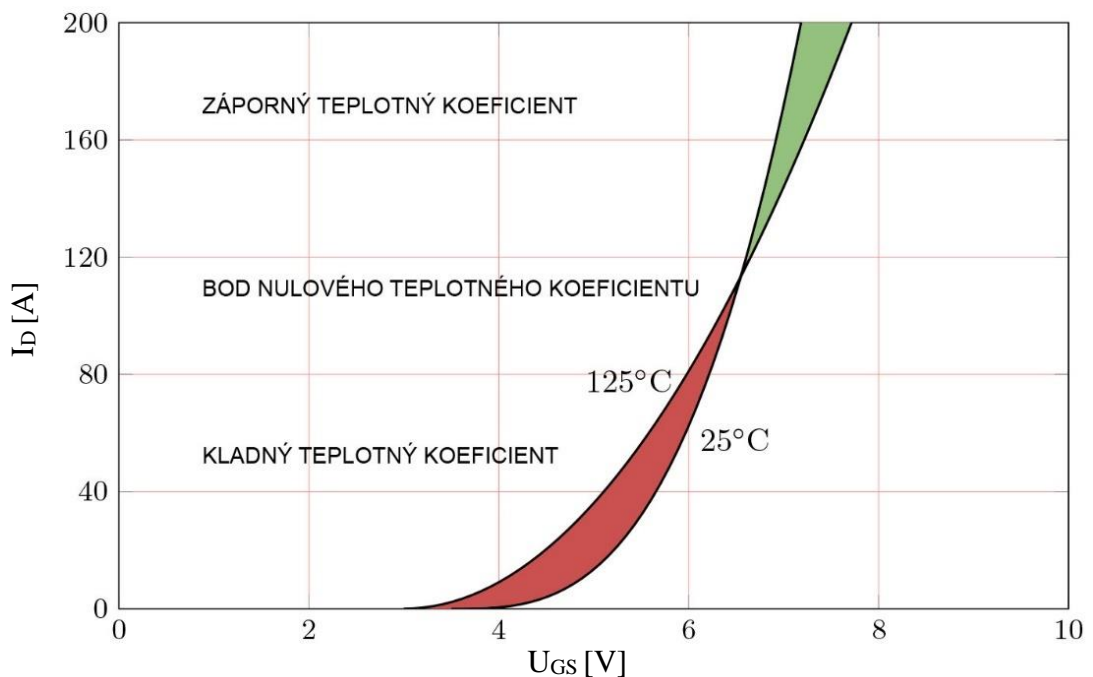


Obrázok 12 Bezpečná oblasť použitia tranzistoru [10]

Graf bezpečnej oblasti použitia tranzistoru znázornený na obrázku 12 a je rozdelený do piatich limitujúcich faktorov kde každý má inú príčinu limitácie:

- 1) V prvej časti grafu je znázornená limitácia v závislosti na odpore tranzistora v zopnutom stave. Obmedzenie predstavuje značné limitácie hlavne pri malých napätiach  $U_{ds}$ . Tento parameter nie je možné prekročiť, je pevne daný vlastnosťami odporu  $R_{DS(ON)}$ . Odpor v zopnutom stave je značne závislý od privedeného napätia  $U_{GS}$  a okolitej teploty. [10]

- 2) V nasledujúcej časti je hlavnou limitáciou puzdro tranzistora, ktoré dokáže zvládnuť maximálny definovaný prúd  $I_D$ .
- 3) Posledná kolmá krivka zobrazuje maximálne napätie, ktoré je možné priviesť medzi drain a source. Po prekročení tohto napätia nastane prieraz v polovodičovej štruktúre. [10]
- 4) Maximálny výkonový limit je daný kombináciou napätia a prúdu pretekajúceho cez tranzistor. Tento parameter je daný odvodom tepla medzi prechodom a puzdrom tranzistora. Teplota prechodu nemôže presiahnuť maximálnu teplotu zvyčajne 150°C. [10]
- 5) Treba zohľadniť aj tepelný odpor medzi puzdrom tranzistora a okolím, avšak teplotná nestabilita obmedzuje využitie výkonového zaťaženia ešte viac. Tento jav nastáva v prípade, ak je generácia tepla rýchlejšia ako jeho odvod. Teplo generované pretekajúcim prúdom nie je rovnomerne rozložené po celej ploche tranzistora, preto vznikajú teplejšie a chladnejšie miesta. Teplotná stabilita unipolárneho tranzistoru je znázornená na obrázku 13.

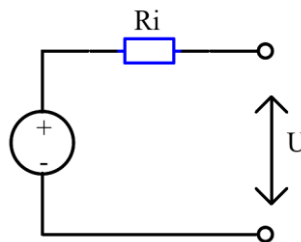


Obrázok 13 Teplotná stabilita tranzistoru [10]

Tento jav vzniká vďaka pozitívnemu teplotnému koeficientu pri nízkych napätiach  $U_{GS}$ . Pre veľké prúdy a napätia  $U_{GS}$  nastáva negatívny teplotný koeficient, ktorý však nevyužijeme pri práci tranzistora v saturácii. [10]

## 2.4 Meranie vnútorného odporu akumulátora

Zdrojom vnútorného odporu sú elektrochemické procesy a odpor vnútorných komponentov. Vnútorný odpor je závislý na faktoroch ako sú vek a stav akumulátora, teplota, alebo pôsobiace zaťaženie. Vysoký vnútorný odpor má za následok, že viac energie z akumulátora sa stratí ako teplo, čo znižuje využiteľnú kapacitu akumulátora. Pri veľkých prúdových špičkách môže nastať odpojenie akumulátora ochranným obvodom pre veľký pokles napätia. Akumulátor s nízkym vnútorným odporom je schopný dodať veľký prúd s minimálnym poklesom napätia. Vnútorný odpor sa pohybuje rádovo v desiatkach až stovkách  $m\Omega$ , v závislosti od konkrétnej technológie akumulátora. Náhradná schéma zapojenia je zobrazená na obrázku 14. [11]

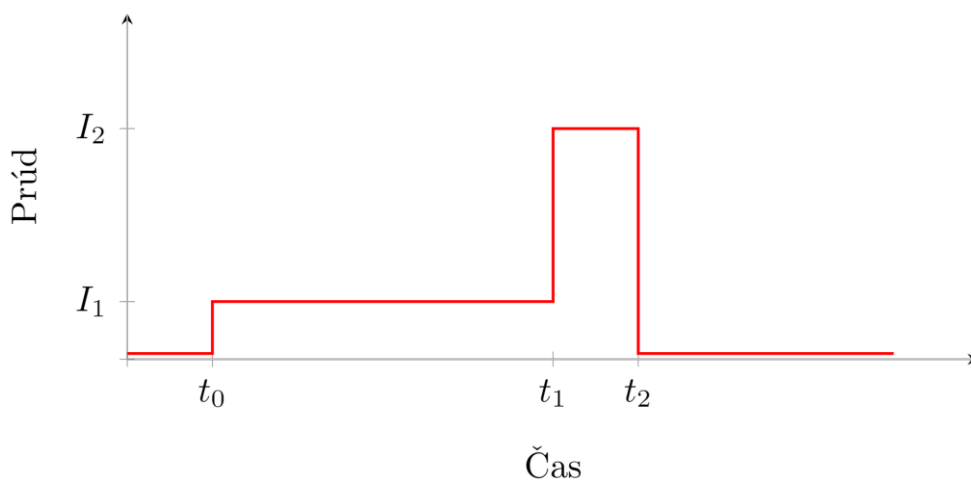


Obrázok 14 Náhradná schéma akumulátora [11]

Veľkosť vnútorného odporu možno považovať za orientačné určenie stavu zdravia akumulátorov. V praxi sa najčastejšie používajú dve metódy merania stavu vnútorného odporu akumulátorov.

### 2.4.1 DC metóda merania vnútorného odporu

Jednou z prvých a najjednoduchších metód na meranie vnútorného odporu je jednosmerná zaťažovacia metóda. Princípom tejto metódy zobrazenej na obrázku 15 je krátkodobé zaťaženie akumulátora a súčasného merania zmeny napätia. Nasledovne podľa Ohmovho zákona je možné dopočítať ako podiel zmeny napätia k zmene prúdu.



Obrázok 15 Princíp merania vnútorného odporu DC metódou

Pre meranie akumulátorov sa používa viacero techník, ktoré sú popísané v normách. Jednou z noriem je IEC 61960-3, v ktorej sa uvádza presný postup merania. Prúd  $I_1$  musí byť konštantne udržiavaný po dobu 10s. Po uplynutí tejto doby nasleduje meranie napätia akumulátora  $U_1$ . Nasleduje skoková zmena prúdu na hodnotu  $I_2$ , ktorú udržujeme po dobu 1s. Na konci tohto cyklu je znova zmerané napätie  $U_2$ . Vnútorý odpor je následne dopočítaný podľa rovnice:

$$R_i = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} \cdot [12] \quad (2.2)$$

Zaťažovacie prúdy sú zvolené podľa normy, ktorá uvádza  $I_1 = 0,2 \times C$  a prúd  $I_2 = 1 \times C$ , kde písmeno C označuje kapacitu akumulátora v Ah. Na základe týchto údajov je možné jednoducho dopočítať zaťažovacie prúdy. V prípade akumulátora s kapacitou 1 Ah budú zaťažovacie prúdy  $I_1 = 0,2$  A a prúd  $I_2 = 1$  A. [12]

#### 2.4.2 AC metóda merania vnútorného odporu

Táto metóda je založená na meraní striedaného napätia po priložení prúdového zdroja striedaného signálu na terminály akumulátora. Frekvencia priloženého napätia je 1kHz. Zvolená hodnota prúdu by nemala generovať na termináloch akumulátora napätie vyššie ako 20mV. Dĺžka merania by nemala prekračovať 5s. Všetky dôležité údaje je možné nájsť v norme IEC 61960-3. Výhodou tejto metódy je opakovateľnosť výsledkov a rýchlosť samotného merania a vyhodnotenia výsledkov. Vnútorý odpor je následovne dopočítaný podľa rovnice:

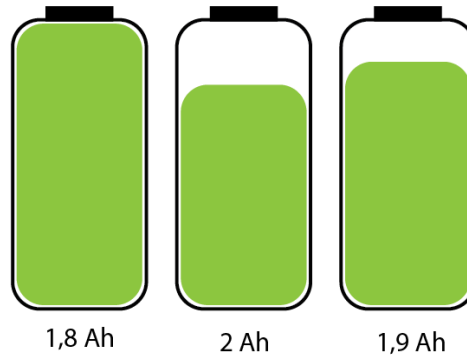
$$R_i = \frac{U_{AC}}{I_{AC}} \cdot [12] \quad (2.3)$$

Najpresnejšia metóda vyhodnocovania vnútorného odporu je použitím elektrochemickej impedančnej spektroskopie. Pri meraní pomocou elektrochemickej impedančnej spektroskopie je frekvencia priloženého napätia menená v rozsahu od jednotiek Hz, až po desiatky kHz. Namerané hodnoty sú často vyhodnocované pomocou Nyquistovho diagramu. Táto metóda je časovo náročná na zmeranie a jej následné vyhodnotenie.

## 2.5 Vyrovnávanie napätí článkov

Akumulátory sa zvyčajne skladajú z jednotlivých článkov zapojených sériovo, paralelne alebo sériovo-paralelne. Paralelne zapojené články sú automaticky napäťovo vyrovnávané prúdom, pretekajúcim medzi článkami. Sériové zapojenie článkov však prináša komplikácie v podobe nutnosti vyrovnania napätí na jednotlivých článkoch. Hlavnou príčinou sú výrobné tolerancie pri výrobe jednotlivých článkov. Tento efekt sa dá eliminovať výberom a testovaním jednotlivých článkov s rovnakými parametrami. Najdôležitejším parametrom pri výbere článkov je kapacita. Pravidelným cyklovaním akumulátora môže nastať rôzny pokles kapacity naprieč jednotlivými článkami

akumulátora. Tento jav môže byť zapríčinený rôznou polohou v akumulátore a teda iným odvodom tepla alebo výrobnou chybou. Článok s najmenšou kapacitou bude pri nabíjaní nabitý ako prvý, teda dosiahne svoje najvyššie povolené napätie pre optimálnu prevádzku. V tomto bode ostatné sériovo zapojené články zobrazené na obrázku 16 nedokončili svoj nabíjací proces. [13]

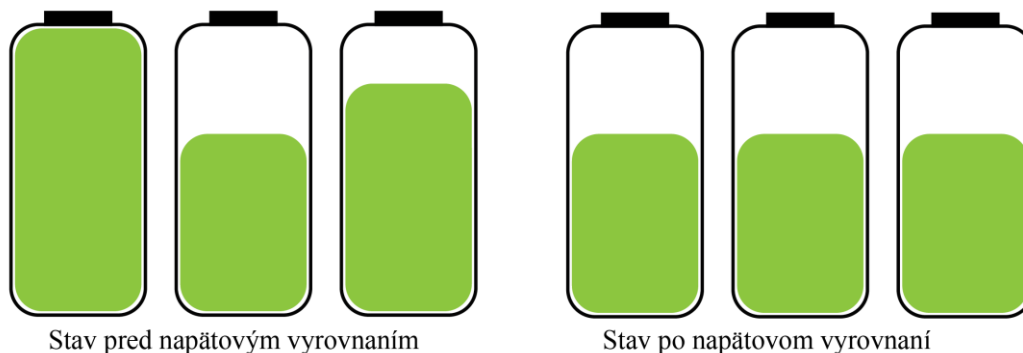


Obrázok 16 Nabíjanie akumulátorov bez vyrovnávania napätí [13]

Pri technológii olovených akumulátorov môžu byť články privedené do stavu prebitia bez trvalého poškodenia. Energia dodávaná do prebitého článku je uvoľnená vo forme plynov. Podobný mechanizmus funguje aj pri technológii Ni-MH, kde sa vyrovnávanie napätí jednotlivých článkov vykonáva prebíjaním malými prúdmi. Tieto mechanizmy sú zakomponované priamo v akumulátore. Avšak technológia Li-ion nie je tolerantná na prebíjanie, preto je prerušenie nabíjacieho procesu nevyhnutné. Pre využitie plného potenciálu Li-ion akumulátorov je potrebné využiť pasívne alebo aktívne vyrovnávanie napätia článkov. Rozhodovanie o nutnosti vyrovnávania napätí je založené na porovnávaní napätí nie kapacity. [14]

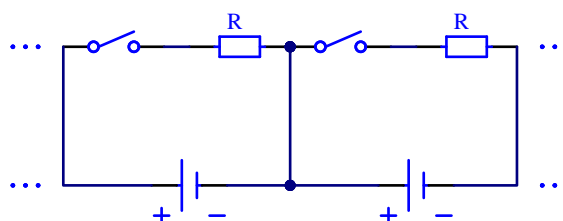
### 2.5.1 Pasívne vyrovnávanie napätí

Ide o najjednoduchšiu a najlacnejšiu metódu vyrovnávania napätí, čo má za následok jej široké uplatnenie v praxi. Princíp zobrazený na obrázku 18 je založený na paralelnom pripojení výkonového rezistoru k článkom s vyšším napätím. Ako akčný člen na pripojenie rezistoru sa zvyčajne používa tranzistor. Proces vyrovnávania napätí je zastavený až keď napätia všetkých článkov sú rovnaké ako najnižšie nabitý článok. Čas vyrovnávania napätí je závislý na kapacite jednotlivých článkov. Všetka prebytočná energia, ktorá je uložená v článkoch je premenená na teplo. Príklad pasívneho vyrovnania napätí je zobrazený na obrázku 17. [15]



Obrázok 17 Vyrovnávanie napätí akumulátorov pomocou pasívnej metódy [13]

Pasívne vyrovnávanie napätí zlepšuje celkovú účinnosť akumulátorov a minimalizuje starnutie článkov akumulátora. Často sa využíva v záverečnej fáze nabíjacieho cyklu, kde je pripojený vyrovnávací rezistor po dosiahnutí stanovanej napät'ovej úrovne. Rezistor zostáva pripojený až do momentu, keď napätie klesne pod stanovanú úroveň. Touto metódou zaistíme nabitie všetkých článkov na maximálnu hodnotu. [14]

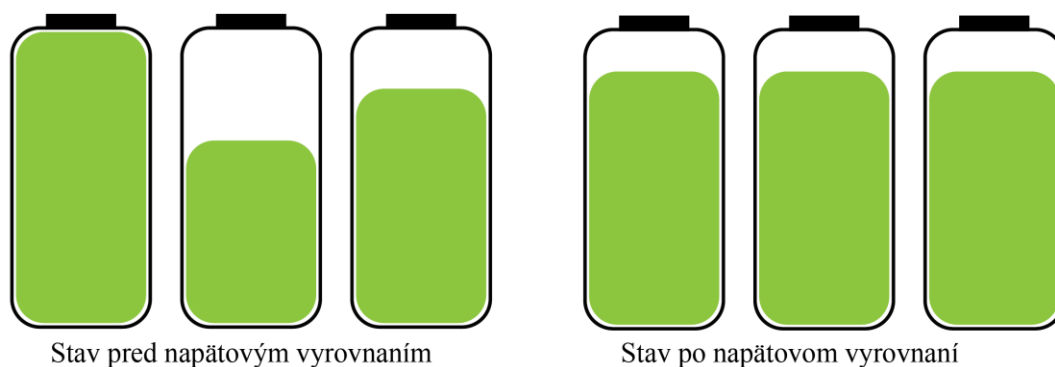


Obrázok 18 Schéma zapojenia pasívneho vyrovnávania napätí [15]

Vyrovnávanie napätí môže byť prebiehať aj v prípade že akumulátor nie je nabíjaný v čase vyrovnávania napätí. V takom prípade sú jednotlivé články vybité na úroveň článku s najnižším napätím.

### 2.5.2 Aktívne vyrovnávanie napätí

Aktívne vyrovnávanie napätí vyžaduje komplexné zapojenia, čoho dôsledkom je vyššia cena. Výhodou je rýchlosť a efektivita prenášania energie medzi jednotlivými článkami. Účinnosť takéhoto prenosu energie sa môže pohybovať až okolo 90%. Na rozdiel od pasívnej metódy, môžeme využívať vyrovnávanie aj v prípade vybíjania akumulátora. Dôsledkom toho je zvýšenie celkovej využiteľnej energie uloženej v akumulátore. V prípade vybíjania akumulátora je prenášaná energia z článku akumulátora s najvyššou kapacitou do článku s najnižšou kapacitou. Bez využitia tejto metódy by ochranné obvody akumulátora museli odpojiť záťaž, aby predišli poškodeniu príliš hlbokým vybitím článku s najnižšou kapacitou. Pri procese nabíjania akumulátora je využívaný prenos energie z článku s najnižšou kapacitou do článku s najvyššou kapacitou. Stav pred a po vyrovnávaní napätí je znázornený na obrázku 19. To spôsobuje rýchlejšie nabíjanie ako v porovnaní s technológiou pasívneho vyrovnávania napätia. [13]

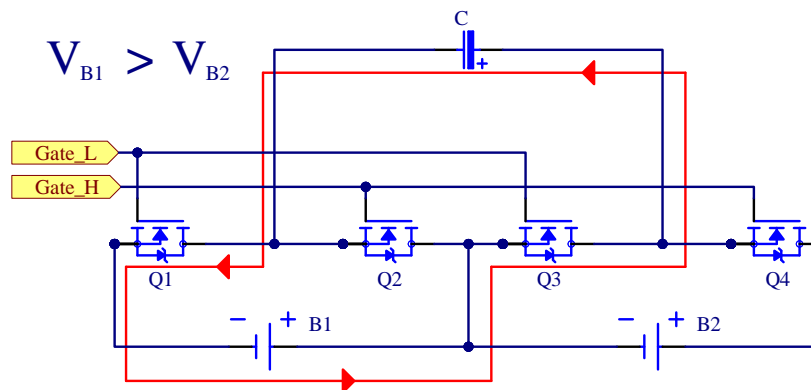


Obrázok 19 Vyrovnávanie napätí akumulátorov pomocou aktívnej metódy [13]

V praxi sa používa viacero metód aktívneho vyrovnávania napätí. Tieto metódy môžu byť rozdelené podľa súčiastok, ktoré tieto obvody využívajú. Prvou možnosťou je využitie induktorov alebo transformátorov. Induktívne metódy vyžadujú komplikovanejšie riadenie a väčší počet komponentov alebo špecializované integrované obvody. Druhou možnosťou sú metódy využívajúce kondenzátory. Najjednoduchšou praxi používanou metódou sú spínané kondenzátory. [13]

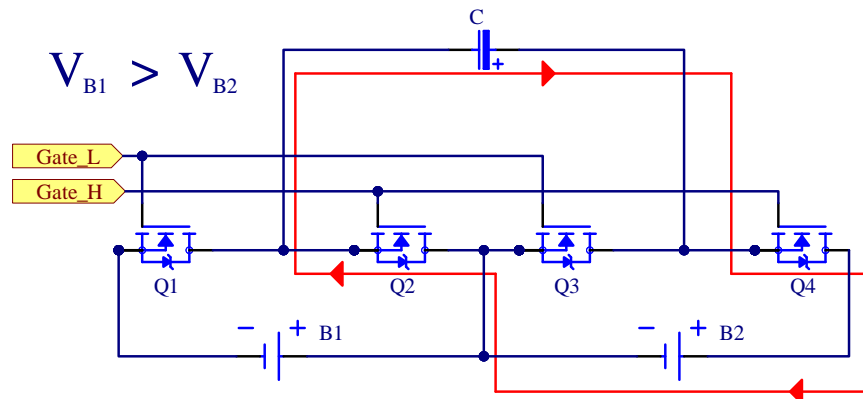
### 2.5.3 Vyrovnávanie napätí metódou spínaných kondenzátorov

Táto metóda je založená na vyrovnávaní napätí medzi dvoma susednými článkami. V základnom zapojení  $n$  článkov akumulátora táto vyžaduje  $2n$  tranzistorov a  $n-1$  kondenzátorov. Často však bývajú paralelne pridané kondenzátory k jednotlivým článkom. Nevýhodou tejto metódy je problém s vyrovnávaním napätia medzi dvoma vzdialenými článkami. Energia musí byť postupne presunutá z článku na článok, až kým nedosiahne cieľový článok. Pri tomto procese vznikajú zbytočné straty a predlžuje sa čas vyrovnávania napätí. S rastúcim rozdielom napätí medzi článkami stúpa vyrovnávací prúd. Najvyššiu efektivitu tohto zapojenia dosiahneme pri malých vyrovnávacích prúdoch a teda malých rozdieloch napätí medzi článkami. Výhodou tejto metódy je automatické vyrovnávanie napätí bez potreby riadenia. Po dosiahnutí rovnakých napätí na článkoch prúd medzi nimi zanikne, čím sa ukončí proces vyrovnávania napätí. [16]



Obrázok 20 Prvá časť cyklu vyrovnávania napätí spínanými kondenzátormi [16]

Samotný proces vyrovnávania napätí je možné rozdeliť do dvoch častí. V prvej časti cyklu sú zopnuté tranzistory Q1 a Q3, čo umožňuje nabitie kondenzátora C na napätie akumulátora VB1. Prúd tečie smerom do kondenzátora. Prvá časť cyklu je vyznačená na obrázku 20. a druhá časť na obrázku 21. V druhej časti cyklu je kondenzátor C pripojený k akumulátoru B2 pomocou tranzistorov Q2 a Q4. Energia uložená v kondenzátore sa vybíja do akumulátora B2. Tento cyklus platí iba v prípade, že napätie VB1 je väčšie ako napätie VB2. V opačnom prípade bude akumulátor B2 nabíjať kondenzátor, ktorý následne nabije akumulátor B1.



Obrázok 21 Druhá časť cyklu vyrovnávania napätí spínanými kondenzátormi

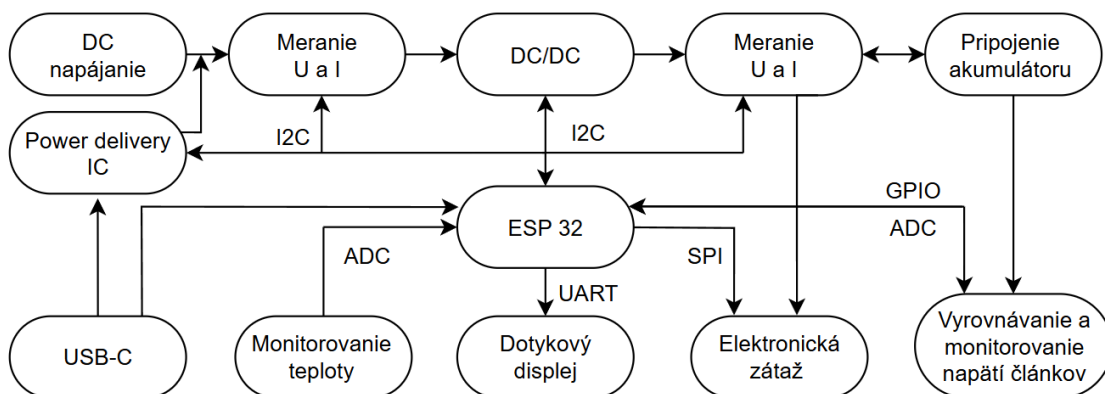
Opísaná metóda má výhodu v jej jednoduchosti a automatickému riadeniu. Ostane metódy vyžadujú aktívne riadenie celého procesu. Nevýhodou tejto metódy je nízka efektivita pri vyrovnávaní medzi vzdialenejšími článkami. [16]

### 3. NÁVRH UNIVERZÁLNEJ NABÍJAČKY

V tejto časti práce je popísaný postup návrhu univerzálnej nabíjačky. Nabíjačka podporuje nabíjanie a vybíjanie akumulátorov spolu s meraním vnútorného odporu a kapacity akumulátora. V prvej časti sa nachádza popis blokového diagramu a stanovené parametre pre návrh zariadenia. Následne sú uvedené riešenia jednotlivých blokov zariadenia. Dôležitou časťou návrhu je riešenie chladenia prebytočného tepla vytváraného pri vybíjaní akumulátorov.

#### 3.1 Rozdelenie návrhu do blokov

Návrh zariadenia je možné rozdeliť do niekoľkých blokov na obrázku 22. Napájanie zariadenia zabezpečuje USB-C s protokolom Power Delivery, alebo externý jednosmerný zdroj. Požadované napätie a prúd na vstupe z USB-C je vyjednávané pomocou integrovaného obvodu. Tieto parametre alebo ostatné prevádzkové hodnoty môžu byť vyčítané a zmenené pomocou zbernice I2C.



Obrázok 22 Bloková schéma zariadenia

Primárnou časťou zariadenia je nabíjací obvod tvorený DC/DC meničom. Jeho parametre ako výstupné napätie a prúd sú nastavované pomocou zbernice I2C. Na meranie napätí a prúdov tečúcich do/z zariadenia je využitý integrovaný obvod. Namerané hodnoty sú vyčítané pomocou zbernice I2C. Na nastavenie zaťažovacieho prúdu elektronickej záťaže je využitá zbernica SPI. Vyrovnávanie napätí jednotlivých článkov akumulátora je ovládané pomocou digitálnych výstupov, meranie napätí je zabezpečené pomocou interného analógovo digitálneho prevodníka ESP32. Monitorovanie teploty chladiča a nabíjaného akumulátora sa vykonáva pomocou termistorov NTC, ktoré sú pripojené do interného analógovo digitálneho prevodníka ESP32. Ovládanie celého zariadenia je možné pomocou dotykového displeja s komunikáciou UART. Hlavným riadiacim prvkom zariadenia je modul ESP32 S3. Programovanie mikrokontroléru je zabezpečené pomocou USB-C a interného prevodníka USB na UART zabudovaného v ESP32.

## 3.2 Parametre zariadenia

Parametre boli zvolené tak, aby navrhované zariadenie bolo cenovo dostupné, prenosné a ponúkalo dostatočné parametre pre rýchle nabíjanie a vybijanie akumulátorov. Nabíjačka je konštruovaná pre nabíjanie olovených, Ni-MH, Ni-Cd a lítiových akumulátorov. Funkcia vybijania akumulátorov je dôležitá pri príprave akumulátorov na uskladnenie a meranie vnútorného odporu. Vyrovnávanie napätí je neoddeliteľnou súčasťou pre starostlivosť o udržanie akumulátorov, zložených z viacerých článkov zapojených sériovo.

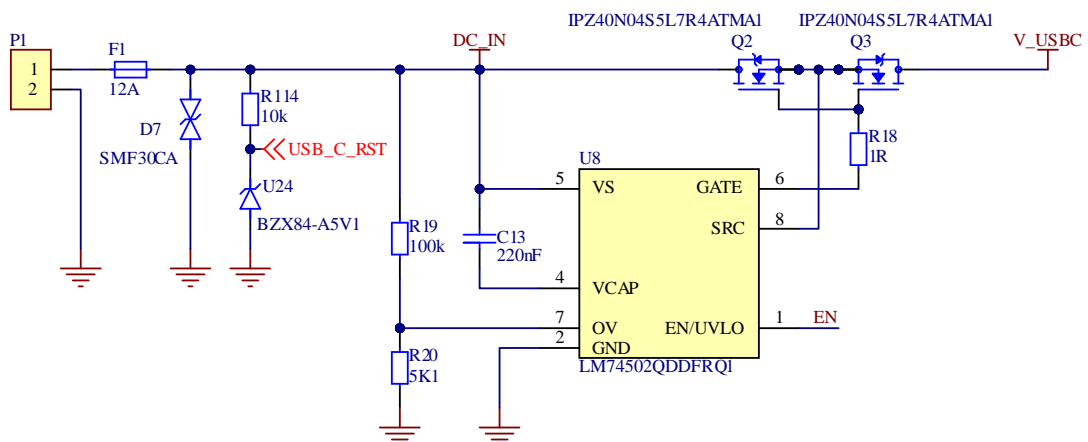
### Základné parametre :

- Napájanie akumulátorov 22V 5A.
- Vybijanie akumulátorov 30V maximálne 70W.
- Pasívne vyrovnávanie napätí článkov.
- Meranie vnútorného odporu.
- Režim elektronickej zát'aže.
- Režim zdroja napätia.
- Monitorovanie teploty akumulátora.

Parametre boli navrhnuté s ohľadom na prenosnosť zariadenia. Zvolené pracovné režimy zariadenia boli navrhnuté tak by postačovali aj náročným užívateľom.

## 3.3 Vstupná ochrana

Správna hodnota napájacieho napätia je dôležitá pre bezproblémovú prevádzku zariadenia. Zariadenie je navrhnuté pre správnu funkciu pri vstupnom napätí od 12 V do 24 V. Maximálny vstupný prúd napájacieho zdroja je navrhovaný na 10 A. Dôležitou funkciou vstupnej ochrany je ochrana proti prepólovaniu a elektrostatickým výbojom. Z toho dôvodu bol zvolený integrovaný obvod LM74502, ktorý v kombinácii s TVS diódou SMF30CA a poistkou splňujú vyššie stanovené funkcie. Schéma zapojenia vstupnej ochrany je na obrázku 23.

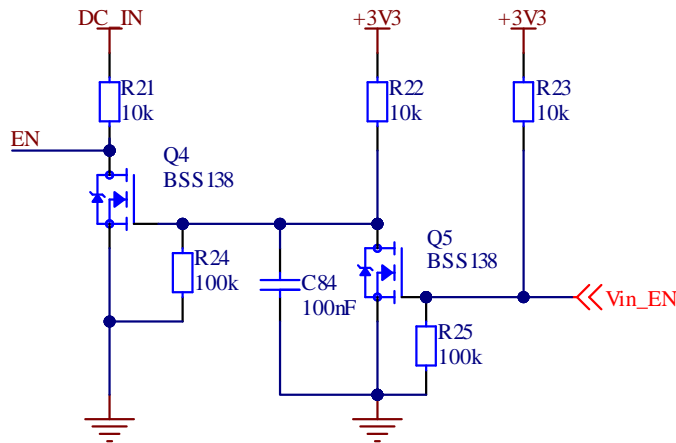


Obrázok 23 Schéma zapojenia vstupnej ochrany

Prúdové obmedzenie je zabezpečené použitím nevratnej poistky typu C1H12, ktorej istiaci prúd je 12 A [17]. Ďalším prvkom v obvode je ochranná TVS dióda na ochranu obvodu proti elektrostatickému výboju. Ochrana proti prepólovaniu a prepätiu je zabezpečená integrovaným obvodom LM74502, ktorý riadi dvojicu výkonových tranzistorov Q2 a Q3. Vstupné napätie je privádzané pomocou napäťového deliča na vstup OV tvoreného rezistormi R19 a R20. V prípade pripojenia napätia vyššieho ako  $U_{Ovref}$  1,25 V na vstup OV nastane zatvorenie dvojice tranzistorov. Napätie pri ktorom zareaguje ochrana proti prepätiu je vypočítané ako:

$$U_{OV} = U_{Ovref} \frac{R_{19}}{R_{19} + R_{20}} = 1,25 \cdot \frac{100 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3 + 5,1 \cdot 10^3} = 25,74V. [18] \quad (3.1)$$

Na eliminovanie oscilovania je v integrovanom obvode zavedená hysterézia 100 mV. Kondenzátor C13 slúži na generovanie napätia pre hradla tranzistorov pomocou integrovanej nábojovej pumpy, bol zvolený podľa doporučení od výrobcu. Výber výkonových tranzistorov bol zameraný na nízku hodnotu odporu v zopnutom stave, hodnotu prierazného napätia a maximálnu prúdovú zaťažiteľnosť. V prípade tranzistoru IPZ40N04S5L7R4ATMA1 je hodnota odporu v zopnutom stave 7,4 mΩ, maximálny prúd 40 A a prierazne napätie 40 V [36]. Zapojenie tranzistorov zabraňuje pretekaniu prúdu smerom do zariadenia, ale aj pretekaniu prúdu smerom zo zariadenia. Toto je veľmi dôležité pre možnosť využitia dvoch nezávislých napájacích zdrojov.



Obrázok 24 Schéma zapojenia blokovania DC zdroja napätia

Pri pripojení USB-C do zariadenia nastane automatické odpojenie jednosmerného zdroja napätia, čím sa zabráni pretekaniu veľkých prúdov pri rozdielnych napätiach zdrojov. Obvod rozhodujúci o pripojení jednosmerného zdroja napätia je na obrázku 24. Po detekcii prítomnosti USB-C je uzemnený signál Vin\_EN, ktorý je privádzaný na hradlo tranzistora Q5, následkom čoho je jeho vypnutie. Vypnutím tranzistora Q5, je na hradlo tranzistora Q4 privádzané napätie 3,3V cez rezistor R22, čo spôsobí zopnutie tranzistora Q4. Zopnutím tranzistora Q4 nastane pokles napätia na signáli EN pod

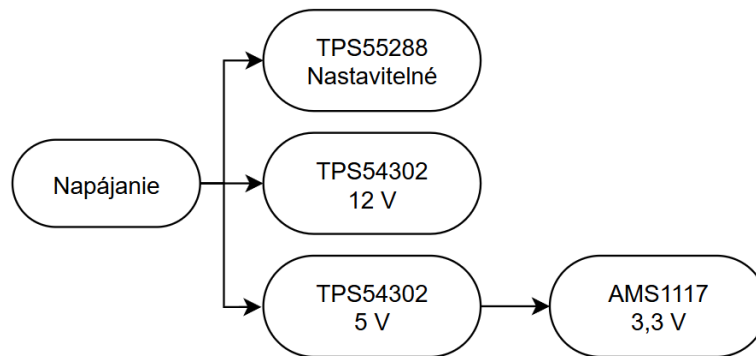


Zopnutie tranzistora Q25 spôsobí pokles napätia na hradle tranzistora Q24, čo spôsobí jeho zopnutie a pripojenie napájania do izolovaného zdroja napätia U25. Izolovaný zdroj generuje výstupné napätie 5 V, ktoré je privádzané na hradlo tranzistora Q23, čo umožní vybíjanie a nabíjanie akumulátora.

V prípade prepólovania akumulátora preteká prúd zenerovou diódou v priepustnom smere, teda je vytvorený napäťový úbytok približne 0,7 V. Pretekajúci prúd je limitovaný rezistorom R103. Napätie vytvorené na zenerovej dióde je z pohľadu hradla tranzistora Q25 záporné, teda tranzistor ostáva zatvorený čo vedie k odpojeniu napájania izolovaného zdroja napätia. Tranzistor Q23 je vo vypnutom stave po odvedení náboja z hradla pomocou rezistora R109.

### 3.5 Napájacie zdroje

Napätie hlavného zdroja energie je potrebné upraviť pre napájanie jednotlivých komponentov podľa požiadaviek výrobcu. Bloková schéma zdrojov napájania je na obrázku 26. Prvým krokom je zníženie napätia na 5 V a 12 V pomocou spínaných zdrojov. Zapojenie pozostáva zo znižujúceho meniču TPS54302DDCR [18]. Hodnoty zvolených komponentov boli zvolené podľa odporúčaní výrobcu. Zmena výstupného napätia je zabezpečená zmenou napäťového deliča spätnej väzby. Ďalšie zníženie napätia z 5 V na 3,3 V je vykonané lineárnym zdrojom AMS1117-3.3 [20]. Indikácia prítomnosti napätia na výstupe meničov je zabezpečená pomocou LED.



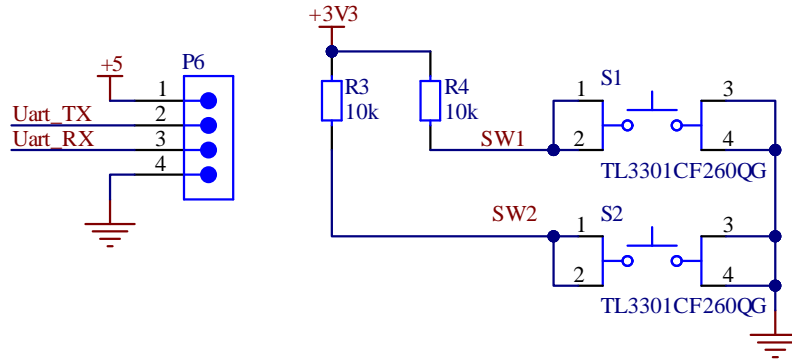
Obrázok 26 Bloková schéma napájania

### 3.6 Riadiace obvody

Hlavným riadiacim prvkom je modul ESP32 S3. Dôvodom výberu bol dobrý pomer ceny a poskytovaných funkcií. Veľkou výhodou je integrovaná podpora štandardov Bluetooth a Wi-Fi, podporuje aj možnosť vyžitia štyroch zberníc SPI, troch UART, dvoch I2C [19]. Programovanie môže byť vykonané pomocou interného prevodníka, čo zjednodušuje konečnú schému zapojenia. Základné zapojenie obsahuje dve tlačidlá, jedno na reštartovanie zariadenia a druhé na nastavenie zariadenia. Programovanie prebieha pomocou integrovaného prevodníku USB na UART. [23]

### 3.6.1 Užívateľské rozhranie

Užívateľské rozhranie na obrázku 27 je tvorené dvojicou tlačidiel a displejom. Hlavným ovládacím prvkom je dotykový displej od spoločnosti *NEXTION* s uhlopriečkou 3,5 palca. Napájacie napätie displeja je 5 V, ale komunikácia UART podporuje aj logickú úroveň 3,3 V [24].



Obrázok 27 Schéma zapojenia užívateľského rozhrania

Programovanie grafického rozhrania prebieha v programe, ktorý poskytuje výrobca. Nahrávanie vytvoreného programu sa uskutočňuje pomocou pamäťovej karty, ktorá je vložená do displeja pri zapnutí. Následným reštartovaním je načítaný nový program a grafické rozhranie displeja.

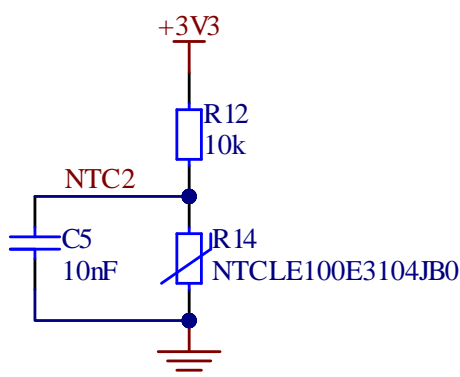
### 3.6.2 Meranie teploty

Meranie teploty prebieha pomocou NTC termistora, ktorý tvorí odporový delič so sériovým zapojením 10 k $\Omega$  rezistorom napájaný napätím  $U_{REF}$  3,3 V. Výstup napäťového deliča je pripojený na interný ADC prevodník ESP32, kde je merané napätie  $U_{NTC}$ . Pre výpočet je zvolené napätie  $U_{NTC}$  1,5V. Výpočet odporu NTC termistora je dopočítaný podľa rovnice:

$$R_{NTC} = \frac{U_{NTC} \cdot R_{12}}{U_{ref} - U_{NTC}} = \frac{1,5 \cdot 10000}{3 - 1,5} = 10 \text{ k}\Omega. \quad (3.2)$$

Použitý termistor NTCLE100E3104JB0 má odpor  $R_{T25} = 10 \text{ k}\Omega$  pri 25 °C a koeficient  $\beta = 3977$  [25]. Parameter  $T_{25}$  je teplota okolia v kelvinoch 25 °C = 298,15 K. Následne je možné dopočítať teplotu pôsobiacu na termistor podľa rovnice:

$$T_R = \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{R_{NTC}}{R_{T25}}\right)}{\beta} + \frac{1}{T_{25}}} = \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right)}{3977} + \frac{1}{298,15}} = 298,15 \text{ K} [26]. \quad (3.3)$$

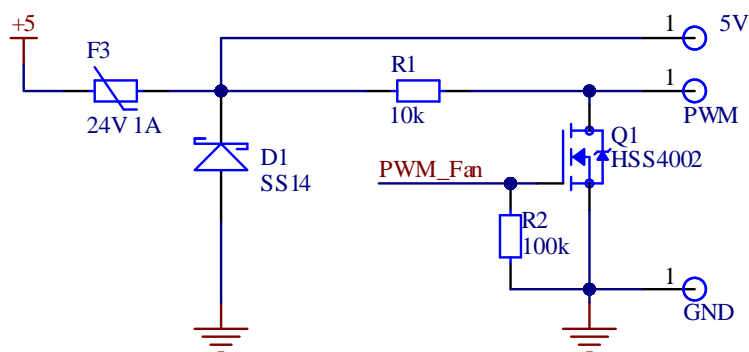


Obrázok 28 Schéma zapojenia termistora

Súčasne sú v zapojení dva termistory zapojené podľa obrázku 28 na meranie teploty chladiča a teploty nabitého akumulátora. Kondenzátor C5 slúži na stabilizáciu napätia.

### 3.6.3 Riadenie otáčok ventilátora

Zariadenie vyžaduje aktívne chladenie niektorých komponentov, preto boli navrhnuté obvody na reguláciu otáčok ventilátora. Ako vhodný typ bol zvolený radiálny ventilátor od spoločnosti *SUNON*, z rady MagLev konkrétne MF60090V1-C550-S9A. Ventilátor vyžaduje napájanie 5 V a poskytuje riadenie a sledovanie otáčok. Sledovanie otáčok je pre túto aplikáciu zbytočné, preto nebude využité. Schéma na obrázku 29 generuje PWM signál pre ovládanie otáčok ventilátora

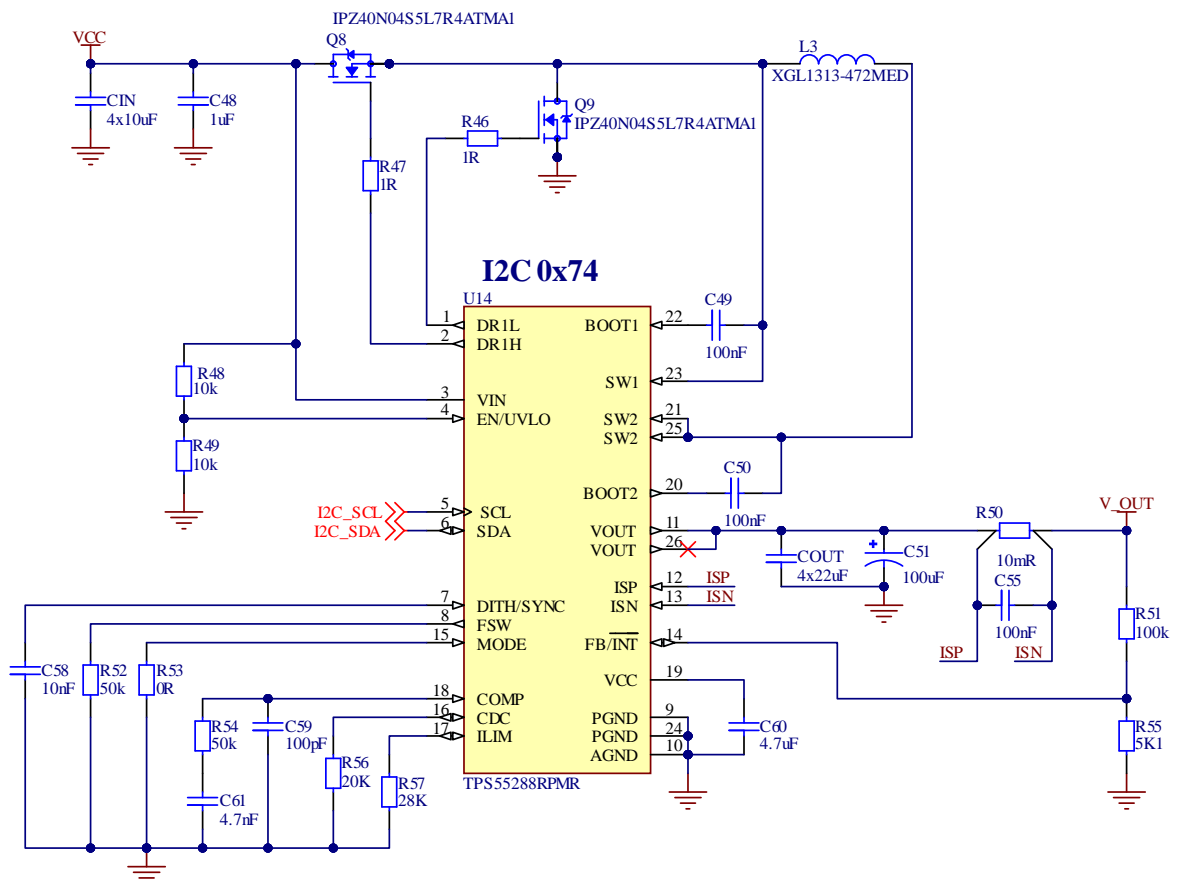


Obrázok 29 Schéma riadenia otáčok ventilátora

Napájanie ventilátora je pripojené cez vratnú PTC poistku, čo zaisťuje ochranu proti skratu a nadprúdom nad 1 A. Pulzná šírková modulácia je privádzaná na hradlo tranzistora Q1, ktorý periodicky skratuje PWM signál privádzaný z ventilátora na zem. Rezistor R2 slúži na odvedenie náboja z hradla tranzistoru pri odpojení napájania. Ochrana pred spätne naindukovaním napätím na cievkach ventilátora je zabezpečená diódou D1.

### 3.7 Spínaný zdroj

Najdôležitejšou časťou nabíjačky je digitálne nastaviteľný zvyšujúci-znižujúci menič napätia na obrázku 30. Nastavenie parametrov prebieha pomocou komunikácie I2C, kde integrovaný obvod spínaného zdroja TPS55288RPMR má nastavenú adresu 0x74. Vstupné napätie udávané výrobcom je od 2,7 V do 36 V. Výstupné napätie je možné nastaviť maximálne na 22 V. Výstupný prúd môže byť nastavovaný do maximálnej hodnoty 6,35 A. Ďalej poskytuje ochranu proti skratu na výstupe, tepelnú ochranu a prepäťovú ochranu na výstupe. Spínacia frekvencia je pre minimalizáciu spínacích strát nastavená na 400 kHz. [27]



Obrázok 30 Schéma zapojenia spínaného zdroju

Výber spínacích prvkov má veľký vplyv na celkovú efektívnosť zapojenia. Pre minimalizáciu vodivostných strát je dôležitý parameter  $R_{DS(on)}$ . Tento parameter opisuje odpor tranzistoru v zopnutom stave. Ďalším dôležitým parametrom je  $Q_G$ , ktorý opisuje celkovú kapacitu hradla tranzistora, čo ovplyvňuje spínacie straty. Pre vysoké spínacie frekvencie je dôležité vybrať tranzistor s nízkou hodnotou tohto parametra. Zvolené tranzistory IPZ40N04S5L majú  $R_{DS(on)}$  7,4 m $\Omega$  a  $Q_G$  13 nC [36].

Výstupné napätie je privádzané pomocou napäťového deliča R38 a R42 na vstup FB. Toto napätie je následne porovnané s hodnotou nastaviteľnej internej referencie napätia.

Napätie referencie je možné nastaviť v rozsahu 45 mV až 1,2 V s minimálnym krokom 1,129 mV. Výstupné napätie je dané pomerom deliča a referenčným napätím. Nastavenie prúdového obmedzenia je nutné povoliť v registri IOUT\_LIMIT. Prúdové obmedzenie je závislé od veľkosti rezistora R50 a hodnoty referenčného napätia. Použitím 10 mΩ snímacieho odporu dostávame maximálny prúd 6,35 A. [27]

Pre výpočet induktora je potrebné zohľadniť režim znižovania aj režim zvyšovania napätia. Maximálne vstupné napätie  $U_{INmax}$  je 36 V a maximálne výstupné napätie  $U_{OUTmax}$  je 22 V. Minimálne vstupné napätie  $U_{INmin}$  je 12 V a minimálne výstupné napätie  $U_{OUTmin}$  je 0,8V. Spínacia frekvencia  $f_{sw}$  je 400 kHz. Maximálny výstupný prúd je 5 A. Zvlnenie prúdu induktorom  $\Delta I_{LP-P}$  je zvolené ako 40% z maximálneho výstupného prúdu. Hodnota induktora v režime zvyšovania napätia je vypočítaná ako:

$$L = \frac{U_{INmin} \cdot (U_{OUTmax} - U_{INmin})}{\Delta I_{LP-P} \cdot f_{sw} \cdot U_{OUTmax}} = \frac{12 \cdot (22 - 12)}{5 \cdot 0,4 \cdot 400000 \cdot 22} = 6,8 \mu H. \quad (3.4)$$

Induktor v režime znižovania napätia je vypočítaný ako:

$$L = \frac{U_{OUTmin} \cdot (U_{INmax} - U_{OUTmin})}{\Delta I_{LP-P} \cdot f_{sw} \cdot U_{INmax}} = \frac{0,8 \cdot (36 - 0,8)}{5 \cdot 0,4 \cdot 400000 \cdot 36} = 1,3 \mu H. \quad (3.5)$$

Zvolená bola vyššia vypočítaná hodnota, z dôvodu nižšieho zvlnenia prúdu induktorom. Najbližšia štandardná hodnota induktora je 6,8  $\mu H$ . V režime zvyšovania napätia za predpokladu účinnosti 90% je vypočítaný DC prúd induktorom vypočítaný ako:

$$I_{maxDC} = \frac{U_{OUT} \cdot I_{OUT}}{U_{IN} \cdot \eta} = \frac{22 \cdot 5}{12 \cdot 0,9} = 10,2 A. \quad (3.6)$$

Najvyššia hodnota prúdu pretekajúceho cez induktor je vypočítaná ako:

$$I_L = I_{maxDC} + \frac{\Delta I_{LP-P}}{2} = 10,2 + \frac{5 \cdot 0,4}{2} = 11,2 A. \quad (3.7)$$

Zvolený induktor XGL1010-682MED dosahuje saturačný prúd 16 A pri strate indukčnosti o 20%. Limitovanie maximálneho prúdu induktorom je nastavená rezistorom R58 ktorého hodnota 28 kΩ. Maximálny nastavený prúd induktorom je vypočítaný ako:

$$I_{AVG} = \frac{1 \cdot 330000}{R_{58}} = \frac{1 \cdot 330000}{28000} = 11,8 A. [27] \quad (3.8)$$

Výrobcom odporúčaná vstupná efektívna kapacita je 22  $\mu F$ , preto bolo zvolené zapojenie 4 kondenzátorov paralelne s kapacitou 10  $\mu F$ . Nominálna výstupná kapacita odporúčaná výrobcom je 100  $\mu F$ , preto bolo zvolené zapojenie štyroch keramických

kondenzátorov s kapacitou 22  $\mu\text{F}$  paralelne, v kombinácii so 100  $\mu\text{F}$  elektrolytickým kondenzátorom. [27]

Meranie výstupného prúdu spínaného zdroja je možné pomocou úbytku napätia na rezistore R54, ktorý zosilní zmeraný signál na rezistore R50. Použitím rezistoru R54 s hodnotou 20  $\text{k}\Omega$  nastáva zosilnenie 20 krát. Tento signál je ďalej možné použiť na kompenzáciu úbytku napätia na odpore vedenia k spotrebiču. Veľkosť kompenzácie je konfigurovateľná pomocou vnútorných registrov TPS55288. [27]

Nastavenie pracovného módu je vykonané pomocou rezistoru R53. Pri použití nulového odporu je nastavené použitie vnútorného zdroju napätia, ktorý vyžaduje externý kondenzátor C60 s hodnotu 4,7  $\mu\text{F}$ . Pracovná adresa na zbernici I2C je nastavená na 0x74h. Ďalej je nastavený režim pulznej šírkovej modulácie pre prípad nízkej výstupnej záťaže. [27]

Spínacia frekvencia môže byť nastavená od 200 kHz až po 2,2 MHz. Pre minimalizáciu spínacích strát bola zvolená spínacia frekvencia 400k Hz. Výsledná spínacia frekvencia pri použití rezistoru R53 s hodnotou 50  $\text{k}\Omega$  je vypočítaná ako:

$$F_{sw} = \frac{1000}{0,05 \cdot R_{53} + 20} = \frac{1000}{0,05 \cdot 50000 + 20} = 396 \text{ kHz}. \quad (3.9)$$

Na zníženie rušenia je možné periodicky meniť spínaciu frekvenciu v rozsahu  $\pm 7\%$ . Modulačná frekvencia pre účinne potlačenie elektromagnetického rušenia by nemala prekračovať 1 kHz. Nastavenie modulačnej frekvencie nastáva zmenou kapacity kondenzátoru C58. Modulačná frekvencia  $f_m$  je 700 Hz odpovedá kapacite kondenzátoru podľa rovnice:

$$C_{58} = \frac{1}{2,8 \cdot R_{52} \cdot f_m} = \frac{1}{2,8 \cdot 50000 \cdot 700} = 10 \text{ nF}. \quad [27] \quad (3.10)$$

Pre určenie parametrov súčiastok použitých v kompenzačnom obvode bol využitý výpočtový nástroj od výrobcu WEBENCH POWER DESIGNER. Kompenzačný obvod pozostáva z paralelne radeného kondenzátoru C59 a sériovo zapojenej dvojice R54 a C61. Vypočítané hodnoty  $C_{59} = 100 \text{ pF}$ ,  $C_{61} = 4,7 \text{ nF}$  a  $R_{54} = 50 \text{ k}\Omega$  boli implementované do zapojenia.

### 3.8 Elektronická záťaž

Zvolené parametre elektronickej záťaže sú 30 V a 10 A, ale s výkonovým obmedzením na maximálne 70W. Zatiažovaný výkon je rozdelený na dva výkonové tranzistory. Pre rovnomerné rozloženie výkonu je každý tranzistor riadený samostatne.

Správny výber výkonových tranzistorov je pre túto aplikáciu dôležitou súčasťou návrhu. Zvolené tranzistory JMTC035N06D zvládajú trvalú záťaž v saturácii. Maximálne napätie tranzistorov je 60 V a prúd 180 A, avšak tieto parametre platia pri zvýšenom napätí drain-source [28]. Parametre zohľadňujúce prácu v saturácii je možné



na presnej napäťovej referencii LM4040CYM3-2.5. Minimálny prúd referencie udávaný výrobcom je  $45 \mu\text{A}$  [31]. Pri použití odporu  $R_{ref}$   $10 \text{ k}\Omega$  a napájacieho napätia  $U_{INref}$   $12 \text{ V}$  bude prúd referenciou vypočítaný podľa rovnice:

$$I_{ref} = \frac{U_{INref} - U_{ref}}{R_{ref}} = \frac{12 - 2,5}{10 \cdot 10^3} = 950 \mu\text{A}. \quad (3.11)$$

Napätie privedené na neinvertujúci vstup riadiaceho operačného zosilňovača nastavuje pracovný bod. Ak napätie vytvorené pretekajúcim prúdom cez snímací rezistor je po zosilnení menšie ako nastavený pracovný bod nastane zvýšenie napätia na hradle tranzistoru. V prípade, že je vytvorené a zosilnené napätie na odpore väčšie ako nastavený pracovný bod, nastane zníženie napätia na hradle tranzistoru. Nastavené napätie pracovného bodu je privádzané na dva samostatné výkonové stupne, teda zaťažované prúdy sa sčítajú. V prípade výstupného napätia digitálno-analógového prevodníka  $2,5 \text{ V}$  bude prúd jedného výkonového stupňa  $5 \text{ A}$ . Pri prúde  $5 \text{ A}$  rezistorom  $10 \text{ m}\Omega$  je vytvorený úbytok napätia  $50 \text{ mV}$ , ktorý tvorí spätnú väzbu, je zosilnený  $50$ -krát na hodnotu  $2,5 \text{ V}$ . Výsledný prúd oboch výkonových stupňov bude  $10 \text{ A}$ . Táto metóda zaručuje rovnaké prúdy všetkými tranzistormi a eliminuje kladný teplotný koeficient.

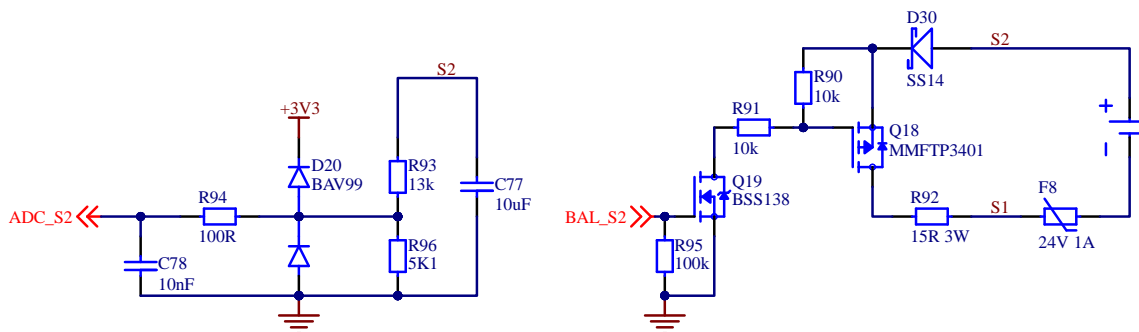
### 3.9 Pasívne vyrovnávanie napätí

Vyrovnávanie napätí jednotlivých článkov akumulátoru je vykonané pomocou metódy pasívneho vyrovnávania napätí. Proces vyrovnávania napätí je riadený pomocou mikrokontroléru. Schéma zapojenia obvodov pasívneho vyrovnávania a merania napätí je na obrázku 32. Proces vyrovnávania zopnutím tranzistoru Q19, ktorý pripojí odporový delič tvorený rezistormi R90 a R91 na zem. Odpor tranzistoru Q19 v zopnutom stave je zanedbateľný. Deliaci pomer napäťového deliču je  $1:2$ , pre optimálne zopnutie tranzistoru Q18. Rezistor R95 zabezpečuje automatické zastavenie vyrovnávania napätí pri strate napájania zariadenia. Nadprúdová a skratová ochrana je zabezpečená pomocou vratnej PTC poistky. Zopnutím tranzistoru Q18 vytvorí pretekajúci prúd výkonovú stratu na rezistore R92. Vyrovnávací prúd  $I_{VYR}$  bol zvolený na hodnotu  $280 \text{ mA}$  pre napätie  $U_{VYR}$   $4,2 \text{ V}$ . Odpor výkonového rezistoru je vypočítaný ako:

$$R_{92} = \frac{U_{VYR}}{I_{VYR}} = \frac{4,2}{280 \cdot 10^{-3}} = 15 \Omega. \quad (3.12)$$

Výkonová strata na rezistore R92 pre pretekajúci prúd  $280 \text{ mA}$  je vypočítaná ako:

$$P_{92} = U_{VYR} \cdot I_{VYR} = 4,2 \cdot 280 \cdot 10^{-3} = 1,18 \text{ W}. \quad (3.13)$$

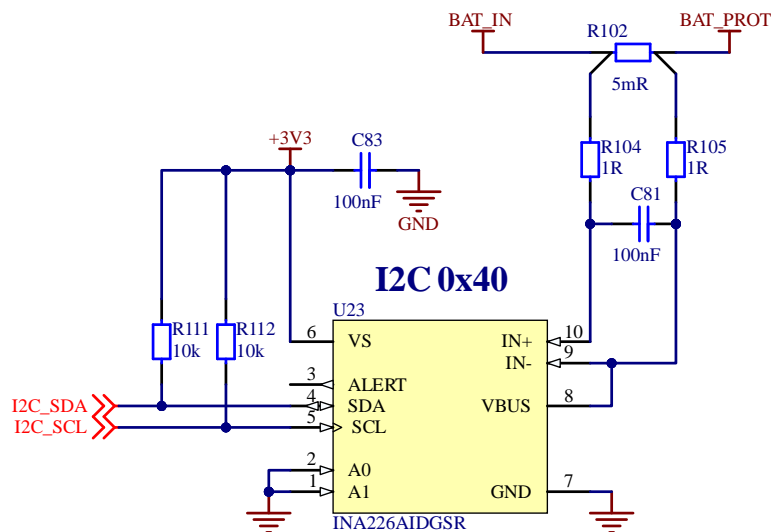


Obrázok 32 Schéma zapojenia pasívneho vyrovnávania a merania napätí

Meranie napätia na jednotlivých článkoch akumulátora prebieha pomocou interného analógovo-digitálneho prevodníka ESP32. Napätie článku akumulátora je privádzané na odporový delič tvorený rezistormi R93 a R96. Napätie je upravené na rozsah 0 V až 2,6 V vhodný pre analógovo-digitálny prevodník. Ochrana voči prepätiu a elektrostatickým výbojom je zabezpečená diódou D20. Odrúsenie signálu privádzaného do analógovo-digitálneho prevodníka je vykonané filtrom dolná priepust. Filter je tvorený rezistorom R94 a kondenzátorom C78. Do obvodu je sériovo zapojená dióda D30, ktorá zabraňuje prechodu priloženého napätia S1 cez vnútornú diódu tranzistora Q18. Týmto sa eliminuje možnosť nežiaduceho napätia na terminály S2 v prípade, že batéria nie je pripojená.

### 3.10 Meranie napätia a prúdu

Meranie napätí, vstupných a výstupných prúdov zo zariadenia je kritické pre správne riadenie jednotlivých režimov zariadenia. Nepresným meraním môže nastať prebíjanie alebo vybíjanie akumulátorov pod ich medzné hodnoty, čo môže viesť k ich poškodeniu. Presnosť meraných hodnôt je dôležitá aj pri meraní kapacity a vnútorného odporu, kde aj malá nepresnosť spôsobí veľkú chybu merania. Zvolený integrovaný obvod INA226 s rozlíšením 16 bitov poskytuje presnosť 1,25 mV pre rozsah 0 V až 36V [32]. Meranie prúdu je zabezpečené snímaním napätia na odpore R102 s hodnotou 5 m $\Omega$  s presnosťou 2,5 uV. Schéma zapojenia merania napätia a prúdu je na obrázku 33.



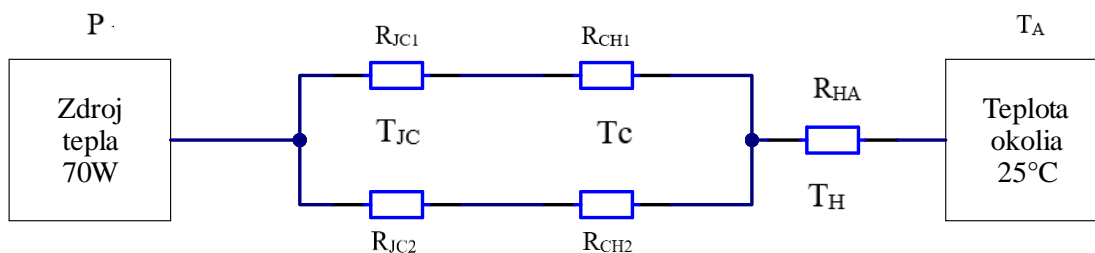
Obrázok 33 Schéma zapojenia merania napätia a prúdu

Vstupný filter tvorený rezistormi R104, R105 a kondenzátorom C81 slúži na potlačenie rušenia v okolí harmonických frekvencií vzorkovacej frekvencie. Zároveň chráni vstupy pred veľkými zmenami  $dV/dt$ , ktoré môžu vzniknúť pri skratoch s veľkými kapacitami. Komunikácia ESP32 a integrovaného obvodu prebieha cez zbernicu I2C. V zapojení je meraný prúd a napätie na vstupe a výstupe zo zariadenia. Adresa každého zariadenia bola individuálne nakonfigurovaná. Integrovaný odvod na vstupe do zariadenia je nastavený adresu 0x40 pripojením vstupov A0 a A1 na zem. Adresa integrovaného obvodu na výstupe zariadenia je nastavená na adresu 0x43 pripojením A1 na zem a A0 na signál I2C\_SCL.

### 3.11 Napájanie pomocou USB-C

Získanie napájania z konektoru USB-C vyžaduje komunikáciu medzi koncovým zariadením a zdrojom energie. Komunikáciu riadi integrovaný obvod STUSB4500QTR. Po pripojení zdroja energie zariadenie dostáva základné napätie 5 V. Následne prebieha komunikácia na základe vopred uložených parametrov. Základné parametre sú uložené v internej pamäti integrovaného obvodu. Ako prvé začne vyjednávanie napájania PDO3, ktoré ma najvyššiu prioritu po neúspešnom pokuse nasleduje PDO2. V prípade neúspechu prvých dvoch pokusov nastáva vyjednanie základného napätia 5 V 1,5 A. Napätia a prúdy PDO3 a PDO2 sú konfigurovateľné aj počas prevádzky zariadenia pomocou zbernice I2C. Integrovaný obvod je schopný vyjednať maximálne 20 V a 5 A. [33]





Obrázok 35 Náhradné zapojenie tepelného obvodu

V reálnych podmienkach treba zohľadniť tepelný odpor  $R_{CH}$  medzi puzdrom tranzistora a chladičom. Tento odpor je závislý od použitých materiálov ako sú izolačné podložky a teplovodivá pasta. Uvažujeme upevnenie tranzistora priamo na chladič s použitím teplovodivej pasty. Náhradné zapojenie tepelného obvodu je na obrázku 35. Tepelná vodivosť pasty  $k$  má hodnotu  $2 \text{ W/mK}$ . Plocha tranzistora  $S$  v puzdre TO-220 je približne  $150 \text{ mm}^2$ . Pre výpočet budeme počítat' s hrúbkou pasty  $H$  o vrstve  $50 \mu\text{m}$ . Podľa rovnice vypočítame tepelný odpor prostredia ako:

$$R_{pasta} = \frac{H}{k \cdot S} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} = 0,17 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad [34]. \quad (3.14)$$

Pre zlepšenie prenosu tepla bola zvolená metóda prispájkovania samotného tranzistora priamo na chladič. Tepelná vodivosť spájky Sn42Bi58 je okolo  $19 \text{ W/mK}$ . Tepelný odpor prostredia po prispájkovaní je vypočítaný ako:

$$R_{SnBi} = \frac{H}{k \cdot S} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{19 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} = 0,018 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad [34]. \quad (3.15)$$

Sčítaním tepelného odporu  $R_{JC}$  a  $R_{SnBi}$  získame celkový teplotný odpor pre jeden tranzistor. Tepelný odpor medzi polovodičovým prechodom a puzdrom tranzistora  $R_{JC}$  je uvedený v katalógovom liste výrobcu [28]. Preto je nutné výsledný tepelný odpor podeliť počtom tranzistorov, v tomto prípade dvoma. Rovnica pre výpočet tepelného odporu medzi polovodičovým prechodom a chladičom vyzerá nasledovne:

$$R_{JCCH} = (R_{JC} + R_{CH})/2 = \frac{0,49 + 0,018}{2} = 0,25 \text{ }^\circ\text{C/W}. \quad (3.16)$$

Následne je možné dopočítat' maximálny tepelný odpor chladiča. Maximálna prevádzková teplota použitých tranzistorov je  $175 \text{ }^\circ\text{C}$ . Z dôvodu správneho fungovania bola zvolená maximálna teplota polovodičového prechodu tranzistora  $T_{JC}$  na  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pre výpočet je predpokladaná teplota okolia  $T_A$  na  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tepelný odpor chladiča je vypočítaný ako:

$$R_{HA} = \frac{T_{JC} + T_A}{P_{max}} = \frac{130 - 25}{70} - 0,25 = 1,25 \text{ }^\circ\text{C/W}. \quad (3.17)$$

Vypočítaná hodnota chladiča je iba teoretická hodnota, pre overenie bude potrebné vypočítané parametre zmerať v reálnom zapojení. Pre relatívne nízku hodnotu tepelného odporu chladiča a minimalizáciu rozmerov bude využité aktívne chladenie. Teplota chladiča pri maximálnom zaťažení bude dosahovať hodnotu vypočítanú z rovnice:

$$T_{HA} = T_{JC} - (R_{JCCH} \cdot P_{max}) = 130 - (0,25 \cdot 70) = 112 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.18)$$

Maximálna teplota ktorú dosiahne chladič bude 112 °C, pri teplote polovodičového prechodu 130 °C. Zníženie teploty chladiča sa dá dosiahnuť znížením jeho teplotného odporu.

## 4. REALIZÁCIA ZARIADENIA

Realizácia a testovanie zariadenia patrí k najdôležitejším krokom overenia návrhu. V tejto kapitole je rozobraná problematika návrhu dosky plošných spojov, testovania a programovania zariadenia. Súčasťou práce je oživenie navrhnutých obvodov a overenie ich funkčnosti.

### 4.1 Návrh dosky plošných spojov

Návrh dosky plošného spoja bol realizovaný v programe Altium Designer, je zobrazený na obrázku 36. Rozmery 140mm × 80mm boli dané mechanickou konštrukciou zariadenia. Z dôvodu ceny, dostatku miesta pre komponenty a prepojovacie cesty bola zvolená dvojvrstvová doska plošných spojov. V ľavej dolnej časti sa nachádza mikrokontrolér a jeho podporné obvody. Horná časť obsahuje konektor USB-C a obvody na podporu Power Delivery. Nasleduje vstupný konektor pre napájanie zariadenia a ochranné obvody. Stredná časť dosky je využitá na spínané zdroje napätia. Pravá horná časť slúži pre obvody elektronickej záťaže. Obvody na vyrovnávanie napätí sa nachádzajú v pravej spodnej časti dosky. Konektor na pripojenie akumulátora a NTC článku pre monitorovanie teploty sa nachádza v pravej strednej časti dosky.

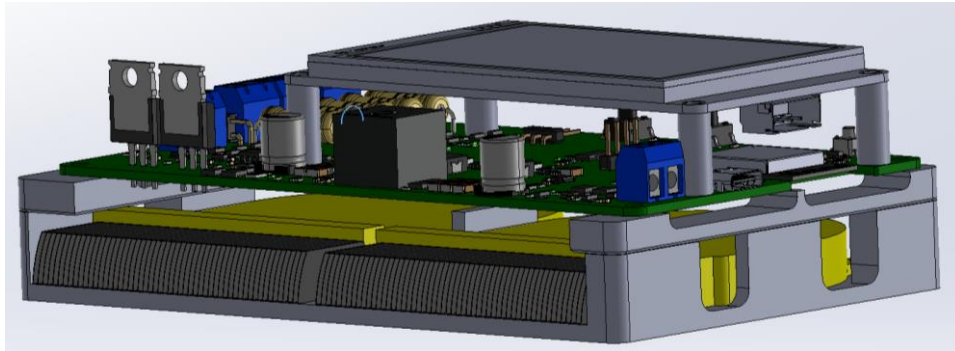


Obrázok 36 3D model dosky plošných spojov

Osadenie dosky plošných spojov prebiehalo ručne s použitím spájky Sn63Pb37. Návrh pozostáva z 304 komponentov z toho sa 27 nachádza na spodnej strane. V zapojení boli použité prevažne súčiastky s poruchovou montážou.

## 4.2 Mechanická konštrukcia zariadenia

Zariadenie pozostáva z dosky plošného spoja, ventilátorov a chladiča. Pre uchytenie všetkých prvkov zariadenia je potrebná mechanická konštrukcia. Konštrukcia bola zhotovená pomocou 3D tlače, najmä pre cenovú dostupnosť. Návrh prebiehal v programe Solidworks a je rozdelený na menšie časti z dôvodu jednoduchšej 3D tlače, zobrazený na obrázku 37. Z dôvodu tepelnej odolnosti bol zvolený materiál ASA (Akrylonitril-styrén-akrylát).



Obrázok 37 3D model konštrukcie zariadenia

Na základni zariadenia sa nachádzajú dva radiálne ventilátory, ktoré nasávajú vzduch zo spodnej strany zariadenia. Ventilátory sú upevnené pomocou skrutiek ku skeletu zariadenia, ktorý je postavený na nožičkách vysokých 8 mm, aby nebol obmedzený prietok vzduchu.

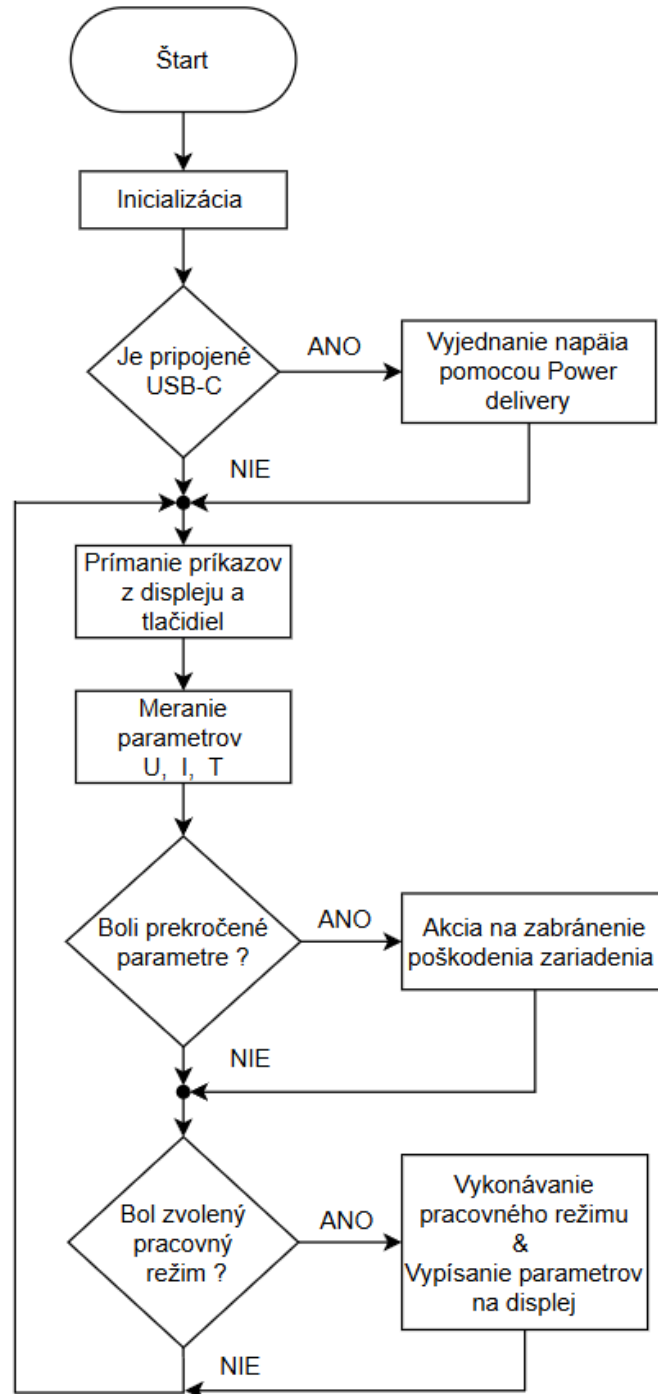


Obrázok 38 Osadená konštrukcia zariadenia

V zadnej časti zariadenia pred ventilátormi sú umiestnené chladiče. Uchytenie chladičov je realizované pomocou teplotne odolnej obojstrannej pásky, kvôli chýbajúcim montážnym otvorom. Na obrázku 38 je osadená spodná časť mechanickej konštrukcie. Plošný spoj je uchytený pomocou skrutiek do držiakov, ktoré sú prilepené na základňu zariadenia. Displej sa nachádza vo vrchnej časti zariadenia pripevnený pomocou distančných stĺpikov k doske plošných spojov.

### 4.3 Programové vybavenie

Pre úplnú funkčnosť zariadenia je potrebné naprogramovať jednotlivé časti zariadenia. Programovanie mikrokontroléru prebiehalo vo vývojovom prostredí Arduino IDE. Vývojový diagram hlavného programu je znázornený na obrázku 39. Návrh grafického rozhrania a programu pre dotykový displej bol realizovaný v prostredí Nextion Editor.



Obrázok 39 Vývojový diagram programu zariadenia

Po spustení programu nastáva inicializácia procesora a všetkých pripojených periférií. Na I2C zbernici sa nachádzajú celkovo štyri zariadenia s rôznymi adresami. Meranie prúdu a napätia na vstupe a výstupe zariadenia je realizované pomocou dvojice integrovaných obvodov INA226. Adresa integrovaného obvodu na vstupe zariadenia je 0x43 a na výstupe 0x40. Pre správne meranie parametrov je dôležitá kalibrácia obvodu na základe použitého odporu pre snímanie pretekajúceho prúdu. Maximálna hodnota pretekajúceho prúdu  $I_{MAX}$  cez snímací rezistor  $R_{SENSE}$  s hodnotou 5 mΩ je 10A. Kalibračná hodnota je vypočítaná ako:

$$CAL = \frac{0,00512}{\frac{I_{MAX}}{2^{15}} \cdot R_{SENSE}} = \frac{0,00512}{\frac{10}{2^{15}} \cdot 0,005} = 3355 [28]. \quad (4.1)$$

Vypočítaná hodnota je následne zapísaná do vnútorného registra s adresou 0x05. Táto hodnota vnútorne používaná na dopočet pretekajúceho prúdu a celkového výkonu.

Pre prípad napájania zariadenia z USB-C prebieha komunikácia medzi mikrokontrolérom a integrovaným obvodom STUSB4500 na zbernici I2C s adresou 0x28. Požadované hodnoty napätia a prúdy sú nastavené do registrov. Následne integrovaný obvod samostatne vyjedná zvolené napätia.

Ovládanie spínaného zdroju napätia TPS55288 je riadené pomocou zbernice I2C s adresou 0x74. Výstupné napätie meniča je ovládané pomocou registra s adresou 0x00 a 0x01, počiatočné napätie je nastavené na 0 V. Nasledovne je potrebné nastaviť využitie externého deliča napätia pre napätie spätnej väzby. Zmena interného na externý delič napätia je vykonaná zapísaním logickej jednotky do 7. bitu v registri 0x04. Prúdové obmedzenie je možné nastaviť v registri 0x02. Nastavenie ďalších režimov a módov je možné v registri s adresou 0x06. Najdôležitejším nastavením je povolenie funkcie spínaného zdroja po zápise logickej jednotky do 7. bitu. Pre režim nabíjania akumulátorov je nutné vypnúť režim automatického odpojenia záťaže pri dosiahnutí maximálneho stanoveného prúdu, zápisom logickej nuly do 5. bitu.

Zbernica SPI je využívaná na komunikáciu medzi mikrokontrolérom a digitálno-analógovým prevodníkom MCP4921. Konfigurácia a nastavenie výstupnej hodnoty prevodníka sú riadené pomocou 16 bitového registra. Pri inicializácii je nastavená hodnota registra tak aby bolo výstupné napätia nulové a teda elektronická zaťaž vypnutá.

Hlavná slučka programu periodicky prijíma príkazy z displeja a tlačidiel. Tlačidlá slúžia na rýchly návrat do hlavného menu a nulovanie počítadla kapacity akumulátora. Následne sú periodicky merané prevádzkové parametre ako sú vstupné a výstupné napätia, prúdy a teploty. V prípade prekročenia teploty alebo ostatných kritických parametrov nastane reakcia na zabránenie poškodenia zariadenia alebo pripojeného akumulátora. V prípade prehriatia chladiča alebo akumulátora nastane okamžité zastavenie vybíjania alebo nabíjania akumulátora. Ďalej je monitorované vstupné napätie, ktoré v prípade jeho poklesu pod užívateľom stanovenú hodnotu bezpečne odpojí

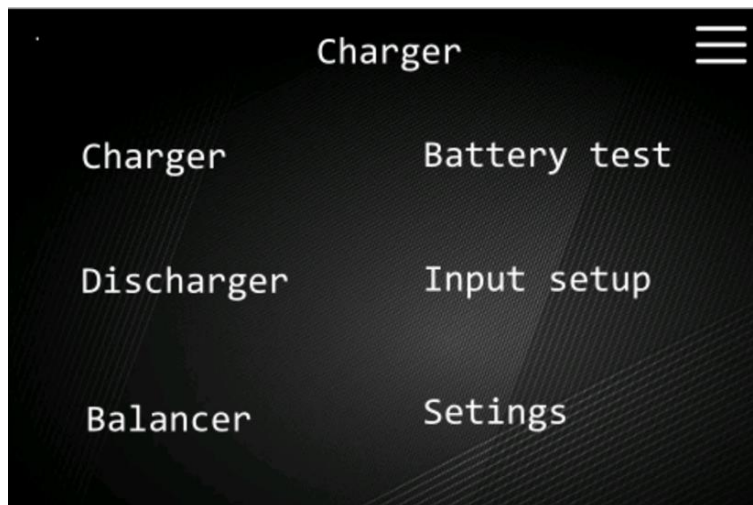
zariadenie. Program pokračuje podľa zvoleného pracovného režimu a druhu akumulátora a zobrazuje zmerané dáta každých 500 ms na displeji.

## 4.4 Ovládanie zariadenia

Zariadenie je ovládané pomocou dotykového displeja. Pri návrhu grafického užívateľského rozhrania bolo dbané na jednoduchosť ovládania a prehľadné usporiadanie ovládacích prvkov. Základné menu je tvorené šiestimi možnosťami zvolenia pracovného režimu a nastavenia pracovných parametrov ako sú:

1. **Charger** – pracovný režim nabíjania akumulátorov.
2. **Discharger** – pracovný režim vybíjania akumulátorov.
3. **Balancer** – pracovný režim vyrovnávania napätí článkov akumulátora.
4. **Battery test** – pracovný režim testovania vnútorného odporu akumulátora.
5. **Input setup** – nastavenie limitácie vstupného napätia a prúdu.
6. **Setings** – nastavenie zariadenia.

Po zvolení jednej z možností je užívateľ automaticky presmerovaný na zvolený pracovný režim. Ak sa užívateľ nachádza v hlavnom menu na pozadí sú zastavené všetky prebiehajúce procesy nabíjania alebo vybíjania. Hlavné menu je zobrazené na obrázku 40.

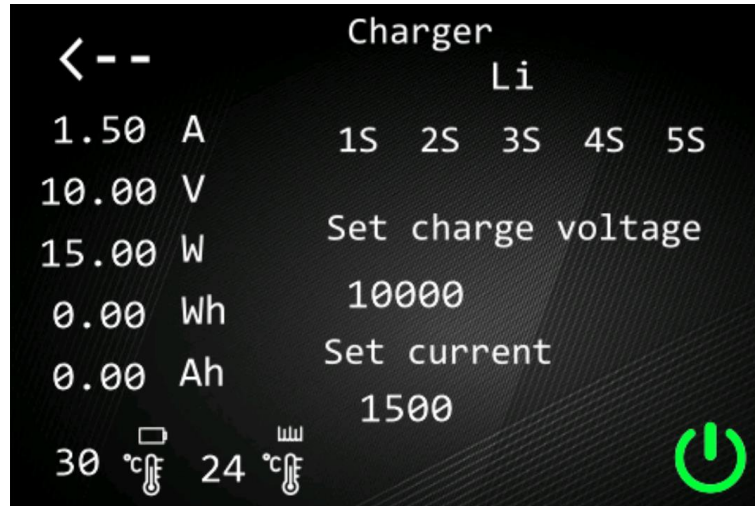


Obrázok 40 Hlavné menu grafického rozhrania

Zvolením pracovného režimu nabíjania akumulátorov je automaticky zobrazené menu s voľbou typu akumulátora. Užívateľ si zvolí konkrétny typ akumulátora, alebo režim zdroja napätia.

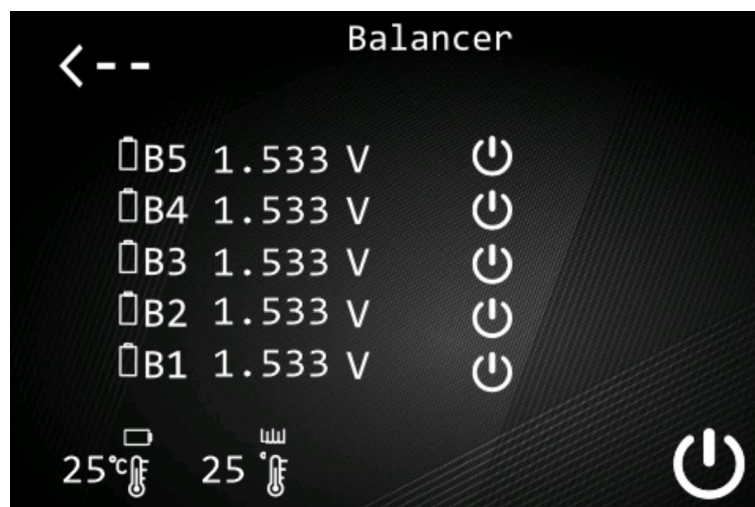
Po výbere druhu akumulátora je zobrazené menu na obrázku 41 pre nastavenie parametrov v režime nabíjania. Ľavá časť obrazovky je zameraná na zobrazovanie aktuálnych parametrov zariadenia, ako sú pracovné napätie, prúd, výkon a počítadlo dodanej energie. Spodná časť obrazovky zobrazuje aktuálnu teplotu chladiča a akumulátora. Jednotlivé teploty sú rozlíšené pomocou piktogramov. Pravá horná časť obrazovky slúži na zobrazenie zvoleného typu akumulátora. Nasleduje päť tlačidiel pre

rýchle nastavenie pracovných parametrov S1 až S5. Označenie 2S znamená zapojenie dvoch článkov sériovo, čo má vplyv na hodnotu nabíjacieho napätia. Užívateľ môže meniť hodnoty prevádzkových parametrov zvolených rýchlou voľbou, ale aj zadať nové v rozmedzí pracovných limitov zariadenia.



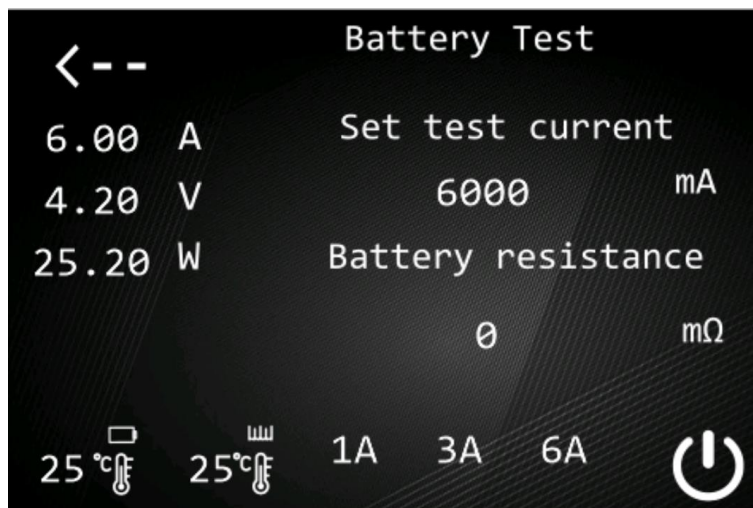
Obrázok 41 Menu pre nastavenie parametrov v režime nabíjania

Po dotyku v oblasti zvoleného napätia, alebo prúdu je zobrazené menu s numerickou klávesnicou pre zadanie hodnoty. Tlačidlo na zapnutie a ukončenie nabíjacieho procesu sa nachádza v pravom dolnom rohu. Farba tlačidla je menená na základe stavu, v ktorom sa nachádza zariadenie. Zelená farba tlačidla signalizuje aktuálnu prevádzku zariadenia, biela zodpovedá pohotovostnému režimu. V prípade režimu vybíjania akumulátora je menu na nastavenie parametrov vybíjania takmer rovnaké. Rýchla voľba parametrov nastavuje v tomto prípade vybíjací prúd a napätie pri ktorom je vybíjací proces ukončený. Ďalej je možné zvoliť variantu vybíjania pre uskladnenie, pomocou na to určeného tlačidla.



Obrázok 42 Menu pre ovládanie vyrovnávania napätí

Režim vyrovnávania napätí meria napätia na jednotlivých článkoch akumulátora, zmerané hodnoty sú zobrazené v strednej časti displeja na obrázku 42. Spustenie automatického procesu vyrovnávania napätí je možné tlačidlom v pravej dolnej časti. Po opätovnom stlačení tlačidla nastane ukončenie procesu vyrovnávania napätí. Pre každý článok je možné manuálne zapnúť proces vybíjania samostatne, stlačením tlačidla na pravej strane v úrovni zobrazovaného napätia článku. Signalizácia vybíjania jednotlivých článkov je uskutočnená pomocou zmeny farby tlačidla pre spustenie manuálneho vybíjania článku.



Obrázok 43 Menu pre nastavenie parametrov testovania akumulátora

Režim testovanie vnútorného odporu akumulátora je zobrazený na obrázku 43. Pomocou rýchlej voľby v dolnej časti obrazovky, tlačidlá 1A, 3A a 6A nastavujú testovací prúd akumulátora. Užívateľ môže zadať ľubovoľnú hodnotu zaťažovacieho prúdu v rozsahu 0 A až 10 A. Po nastavení testovacieho parametra a stlačení tlačidla v pravom dolnom rohu nastane zaťaženie akumulátora a následne je zmeraný pokles napätia. Po ukončení merania je meraný akumulátor automaticky odpojený od záťaže. Výsledný odpor je vypočítaný a zobrazený na displeji v miliohmoch.



Obrázok 44 Mechanická ochrana zariadenia

Zariadenie je uzavreté v plastovom obale pre minimalizáciu náhodných dotykov užívateľa s elektronikou zariadenia. Obal zariadenia ďalej chráni jednotlivé komponenty voči mechanickému poškodeniu počas používania zariadenia. Plastový obal je zobrazený na obrázku 44.

## 5. TESTOVANIE ZARIADENIA

Zariadenie bolo paralelne testované s osadzovaním jednotlivých funkčných blokov. Ako prvé boli osadené a otestované ochranné obvody zariadenia, následne boli osadené pomocné zdroje napätia a výstupná ochrana. Otestovaním jednotlivých blokov bola dokázaná ich funkčnosť. Doska plošného spoja bola osadená všetkými súčiastkami a boli otestované ďalšie funkcie zariadenia.

### 5.1 Základné testovanie zariadenia

Vstupná ochrana bola otestovaná spolu s blokom USB-C. Testovanie bolo zamerané na správne limitovanie vstupného napätia a overenie funkčnosti blokovania dvoch zdrojov zapojených súčasne. Pripojením jednosmerného zdroja napätia a následným pripojením USB-C bolo overené, že napájanie z USB-C nebolo pripojené do obvodu. V tomto prípade je USB-C využívané iba na komunikáciu a programovanie zariadenia. Pre prípad zapojenia USB-C ako prvého a následné pripojenie jednosmerného zdroja je zariadenie napájané z USB-C. Základné testovanie USB-C nevyžaduje pripojenie mikrokontroléra.

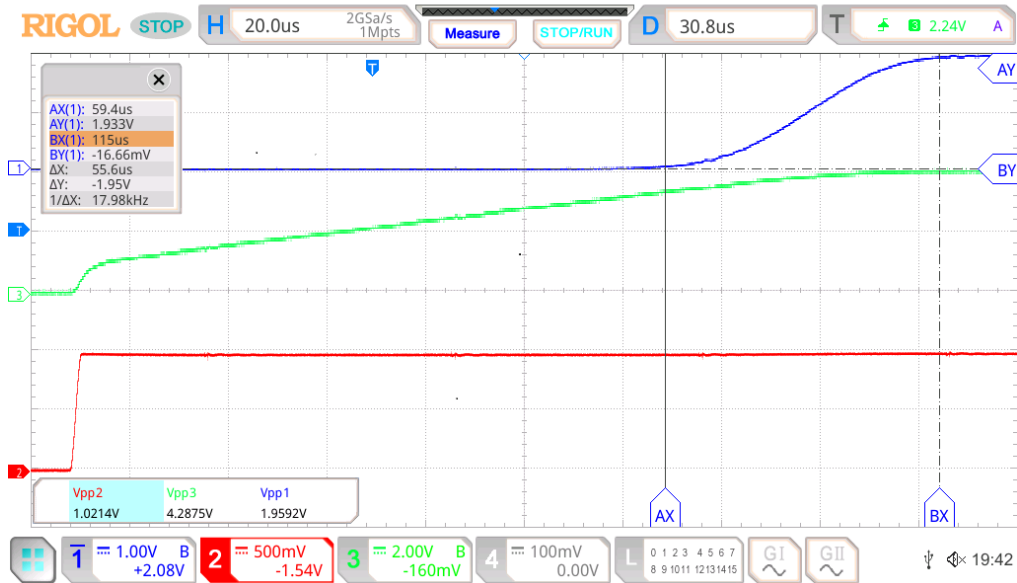
Napät'ové zdroje boli osadené a následne testované bez záťaže a pod záťažou. Spínané zdroje na 5 V a 12 V boli testované pod záťažou 1 A, kde bolo zmerané výstupné zvlnenie napätia. Zmerané zvlnenie pre zdroj napätia 5 V pod záťažou bolo 25 mV a pre zdroj 12 V pod záťažou bolo 28 mV. Lineárny regulátor z 5 V na 3,3 V bol zaťažený 300 mA a následne bolo zmerané napätie na výstupe. Všetky zmerané napätia pre pomocné zdroje boli v rámci tolerancií. Následne bola osadená napät'ová referencia 2,5 V, ktorá bola testovaná v stave bez zaťaženia. Zmeraná hodnota odpovedala špecifikácii výrobcu.

Overenie funkčnosti výstupných obvodov s ochranou voči prepólovaniu akumulátora boli otestované pre celý rozsah napätia. Testovanie prebiehalo v priepustnom aj blokovacom režime. Napätie z hlavného spínaného zdroja sa nedostane na výstup pre záverne zapojenie parazitnej diódy tranzistora. Výstupná ochrana reaguje na napätie na výstupe zariadenia, pre režim zdroja napätia je potrebné túto ochranu vypnúť. Vypnutím výstupnej ochrany bolo možné využívať zariadenie ako zdroj napätia.

Následne boli osadené všetky komponenty a otestovaný režim elektronickej záťaže. Testovanie prebiehalo v rozsahu napätí od 1 V do 30 V s prúdovým obmedzením na 10 V a výkonovým obmedzením na 70 W. Stabilita zapojenia bola overená pomocou osciloskopu zo skokovou zmenou z 0 A na 3,8 A. Červený priebeh na obrázku 45 znázorňuje napät'ovú zmenu na výstupe digitálno-analógového prevodníka. Zelený na obrázku 45 priebeh zobrazuje priebeh napätia na hradle tranzistora. Modrý priebeh na obrázku 45 znázorňuje úbytok napätia na rezistore 0,5  $\Omega$  zapojeného sériovo so zdrojom napätia. Skoková zmena prúdu trvala 115  $\mu$ s, čo postačuje na vybíjanie akumulátorov

a meranie ich vnútorného odporu. Zmerané priebehy napätia potvrdzujú stability zapojenia pri skokovej zmene zaťažovacieho prúdu.

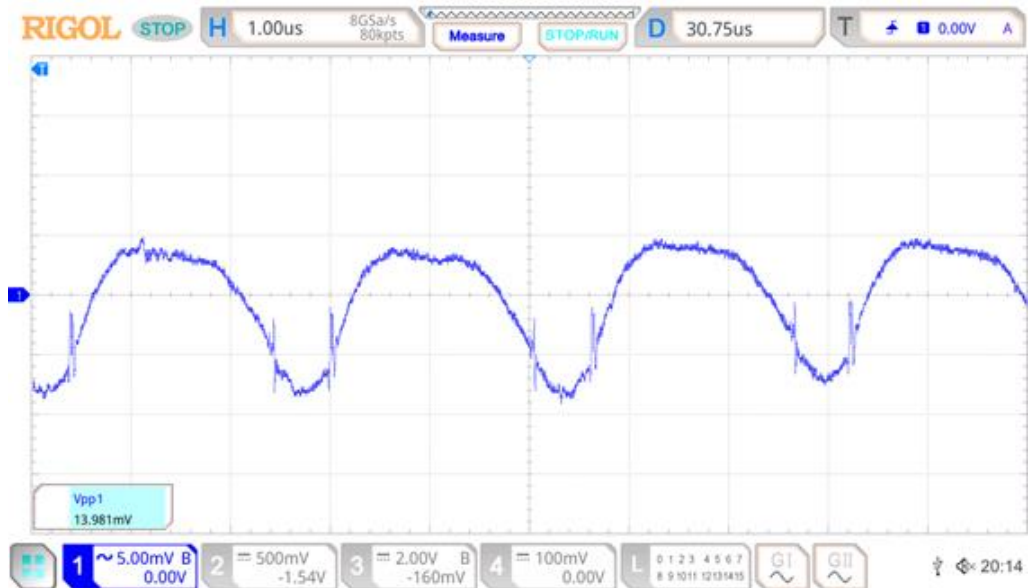
MSO5074 Wed May 07 19:43:15 2025



Obrázok 45 Priebehy napätia obvodov elektronickej zátáže pri skokovej zmene prúdu

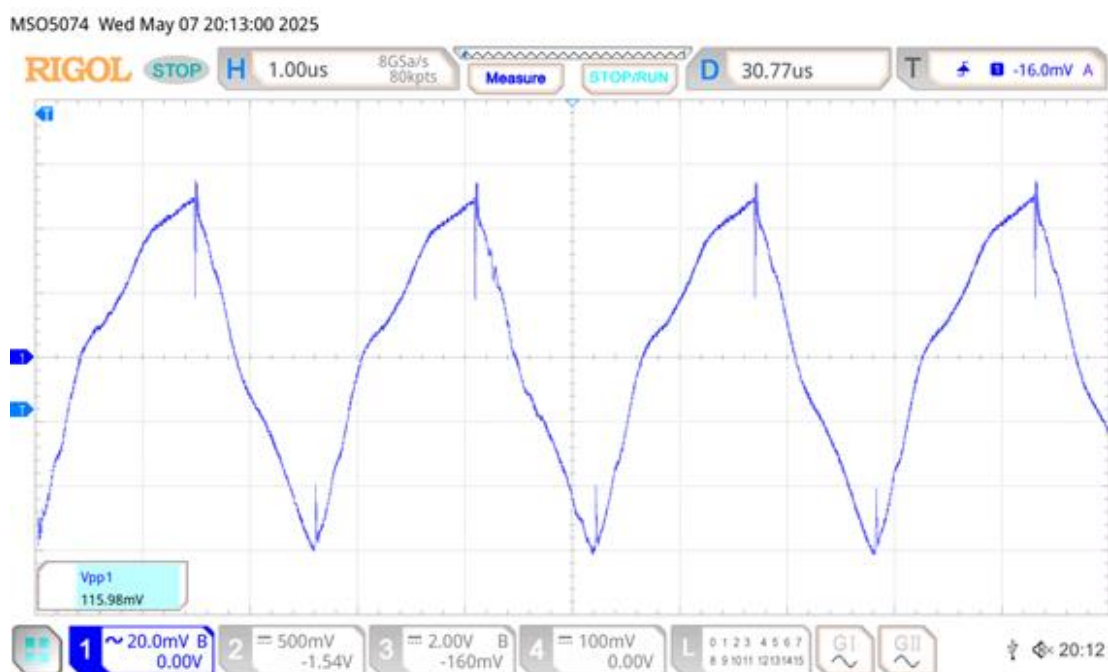
Teplota chladiča dosahovala teplotu 60 °C pri výkonovej strate 70 W a aktívnom chladení. Rýchlosť ventilátora je riadená teplotou chladiča. Po prekročení teploty 40 °C sú nastavené ventilátory na maximálny výkon. Táto regulácia zabezpečuje bezpečnú prevádzku zariadenia aj pri maximálnej výkonovej strate spôsobenej vybíjaním akumulátora.

MSO5074 Wed May 07 20:15:09 2025



Obrázok 46 Zvlnenie napätia na výstupe v režime znižovania napätia

Overenie funkcie hlavného spínaného zdroja prebehlo pripojením externej elektronickej záťaže. Meranie prebiehalo pre režim zvyšujúceho aj znižujúceho meniča napätia. Prvé meranie overovalo správnu funkčnosť meniča v režime znižovania napätia. Napájacie napätie bolo 24 V, výstupné napätie bolo nastavené na 12 V. Prúdové zaťaženie bolo nastavené na 2 A. Zvlnenie výstupného napätia bolo zmerané pomocou osciloskopu s obmedzením šírky pásma na 20 MHz. Pre presnosť merania a minimalizáciu rušenia bolo meranie vykonané priamo na výstupných keramických kondenzátoroch meniča napätia. Výsledné zvlnenie v režime znižovania napätia je zobrazené na obrázku 46 kde bolo zmerané na hodnotu 13,98 mV.

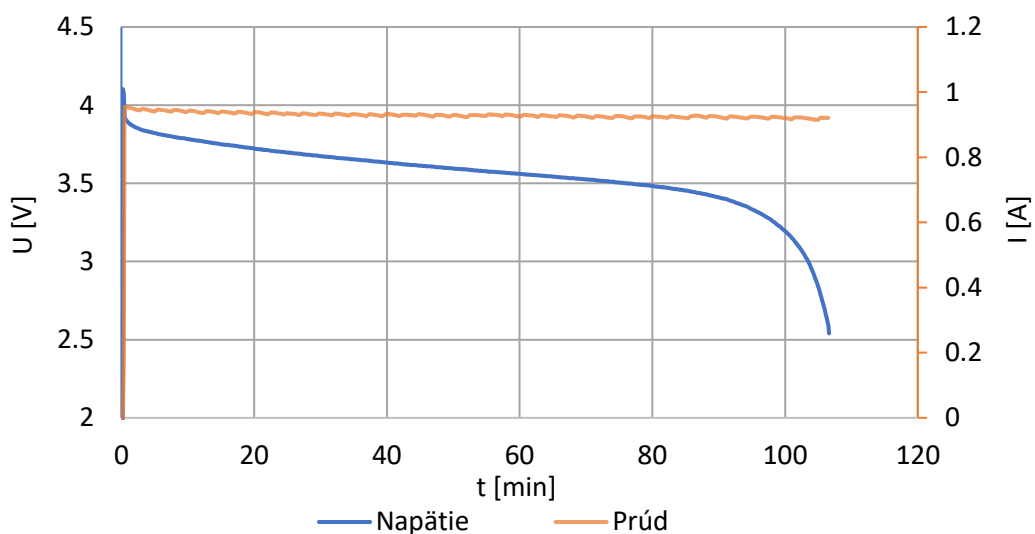


Obrázok 47 Zvlnenie napätia na výstupe v režime zvyšovania napätia

Meranie v režime znižovania napätia prebiehalo pri napájacom napätí 12 V. Výstupné napätie bolo nastavené na 20 V. Zaťažovací prúd bol nastavený na 2 A. Zvlnenie výstupného napätia v režime zvyšovania napätia je zobrazené na obrázku 47, kde bolo zmerané na 115,98 mV.

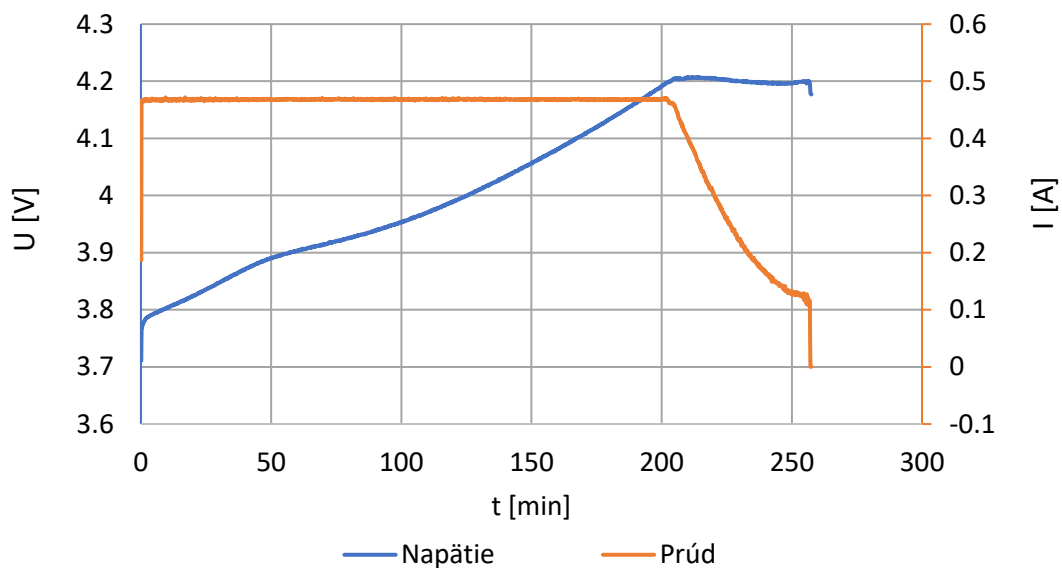
## 5.2 Testovanie nabíjania a vybíjania akumulátora

Konečné testovanie zariadenia bolo zameraná na overenie funkčnosti zariadenia v reálnych podmienkach. Skúška prebiehala na akumulátore LG 18650 HE2, ktorého nominálna kapacita je 2,5 Ah. Akumulátor bol nabitý na napätie 4,1 V. Ukončenie procesu vybíjania nastalo automaticky pri poklese napätia pod 2,5 V ako je možné vidieť na obrázku 48. Meraním bola zistená dlhodobá nestabilita zaťažovacieho prúdu. Nestabilita je spôsobená teplotnou závislosťou napäťovej referencie D/A prevodníku. Riešením by bola výmena napäťovej referencie s menšou teplotnou závislosťou.



Obrázok 48 Graf vybíjania Li-ion akumulátora

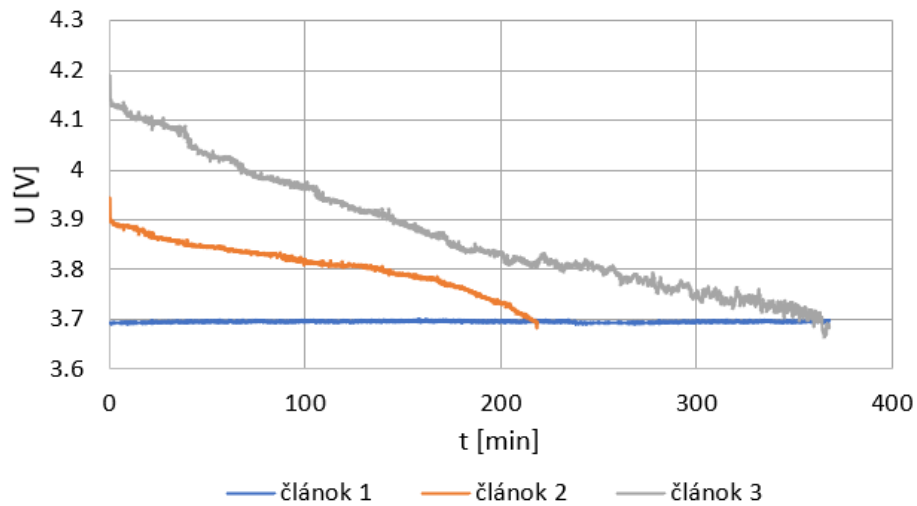
Proces nabíjania začínal s napätím akumulátora 3,7 V a bol ukončený pri napätí 4,2 V a prúde 100 mA ako je možné vidieť na obrázku 49. Proces nabíjania prebiehal podľa očakávania, teda začínal v režime konštantného prúdu a následne prešiel do režimu konštantného napätia. Nabíjací prúd v oblasti konštantného prúdu bol udržiavaný počas celého obdobia na stabilnej hodnote 0,47 A.



Obrázok 49 Graf nabíjania Li-ion akumulátora

Overenie správnej funkcie obvodnou vyrovnávania napätí bolo testované pripojením troch Li-ion článkov k zariadeniu. Najmenej nabitý článok mal napätie 3,7 V, ktorého napätie ostalo konštantné počas celého procesu. Druhý článok mal napätie 3,9 V, teda bol vybíjaný na úroveň najmenej nabitého článku. Tretí článok mal najvyššie napätie

4,15 V, teda bol vybíjaný na úroveň napätia prvého článku. Proces vyrovnávania napätí článkov bol ukončený po 6 hodinách a 6 minútach. Proces vyrovnávania napätí je zaznamenaná na obrázku 50.



Obrázok 50 Graf vyrovnávania napätí článkov akumulátoru

Overenie správnosti merania vnútorného odporu bolo testované zmeraním priebehu pomocou osciloskopu. Testovací prúd bol 2,99 A a spôsobil pokles napätia o 526 mV. Zmeraný odpor akumulátoru pomocou priebehu na osciloskope bol 176 mΩ. Priebeh zmeraného napätia je zaznamenaný na obrázku 51. Hodnota zmeraná pomocou zariadenia bola 186 mΩ. Rozdiely v nameraných hodnotách mohli byť zapríčinené chybou merania alebo odporom vodičov.



Obrázok 51 Priebeh napätia akumulátora pri meraní vnútorného odporu

Testovanie zariadenia prebehlo podľa očakávaní. Bola overená funkcie nabíjania akumulátorov, ako aj automatické ukončenie procesu nabíjania. Maximálne namerané napätie na výstupe bolo 22 V a maximálny prúd 5 A, čo odpovedá zadaným parametrom. Funkcia vybíjania a automatického odpojenia po dosiahnutí stanoveného napätia bola otestovaná v reálnej prevádzke. Po kontrolnom meraní bola zistená rezerva v možnom zaťažovacom výkone, kde je možné využívať zariadenia až do výkonu 100 W bez prekročenia maximálnej teploty chladiča. Maximálny zaťažovací prúd 10 A bol overený kontrolným meraním. Režim vyrovnávania napätí bol overený kontrolným meraním na obrázku 55. Režim merania vnútorného odporu fungoval podľa očakávania.

## ZÁVER

Diplomová práca je zameraná na problematiku nabíjania a vybíjania akumulátorov. Cieľom práce bolo vytvoriť funkčné prenosné zariadenie pre nabíjanie, vybíjanie a testovanie akumulátorov. Navrhované zariadenie je schopné zmerať vnútorný odpor akumulátorov ako aj vyrovnávať napätia jednotlivých článkov. Užívateľské rozhranie zabezpečuje dotykový displej.

Úvodná časť práce sa zameriava na opis najpoužívanejších technológií v oblasti akumulátorov. Porovnané sú jednotlivé technológie ich výhody, nevýhody a princíp funkcie. Ďalej práca opisuje princíp funkcie spínaných zdrojov a elektronickej záťaže. Popísané metódy merania vnútorného odporu a kapacity umožňujú určenie orientačného stavu akumulátorov. Metódy vyrovnávania napätí jednotlivých článkov akumulátora sú opísané z pohľadu efektivity a rýchlosti.

Praktická časť práce obsahuje blokovú schému pre lepšie pochopenie a orientáciu v zapojení. V jednotlivých kapitolách sú popísané navrhnuté schémy, rozdelené do samostatných blokov. Návrh obsahuje popis zvolených komponentov ako aj opis ich integrácie do zapojenia. V závere praktickej časti bol vykonaný výpočet potrebného chladiča pre elektronickeú záťaž.

Na základe navrhnutých schém zapojenia bola navrhnutá doska plošného spoja. Po ručnom osadení boli otestované základné funkcionality a parametre zariadenia. Mechanická konštrukcia zariadenia má za úlohu uchytenie všetkých komponentov a ochranu pre ich poškodením. Obal zariadenia bol vytvorený pomocou 3D tlače z teplotne odolného materiálu. Ďalej bol vytvorený riadiaci program pre hlavný mikrokontrolér a displej.

Testovanie všetkých režimov zariadenia prebiehalo pripojením akumulátoru a následným kontrolným meraním počas celej doby prevádzky. Režim nabíjania, merania vnútorného odporu a vyrovnávania napätí fungoval podľa očakávania a splňoval zadané parametre. Režim vybíjania akumulátorov prekročil zadané parametre. Toto bolo dosiahnuté predimenzovaním chladiaceho systému zariadenia.

Výsledkom je plne funkčné prednostné zariadenie ktoré dokáže bezpečne nabíjať vybíjať a testovať rôzne druhy akumulátorov. Zariadenie splňuje všetky zadané parametre a pracovné režimy.

## LITERATÚRA

- [1] *Rechargeable Batteries Fact Sheet*. Online. In: . Dostupné z: [https://www.stopwaste.org/sites/default/files/Rechargeable-Batteries-Factsheet-20161121.1\\_0.pdf](https://www.stopwaste.org/sites/default/files/Rechargeable-Batteries-Factsheet-20161121.1_0.pdf). [cit. 2024-12-31].
- [2] BUCHMANN, Isidor. *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers*. 3. vyd. Richmond: Cadex Electronics, 2011. ISBN 978-0-9682118-3-0.
- [3] ROOT, Michael. *The TAB Battery Book*. 2011. ISBN ISBN: 978-0-07-173990-0. Switching regulator fundamentals.
- [4] *Switching regulator fundamentals*. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/snva559c/snva559c.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [5] *Multimode control for a four-switch buck-boost converter*. Online. Roč. 2019. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slyt765/slyt765.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [6] *The Next Generation of Chargers*. Online. Dostupné z: <https://blog.ugreen.com/power-delivery-3-1/>. [cit. 2025-01-02].
- [7] *Identifying USB-C E-Mark Cables*. Online. Dostupné z: <https://satechi.net/blogs/identifying-usb-c-e-mark-cables>. [cit. 2025-01-01].
- [8] *USB Power Delivery*. Online. Dostupné z: <https://usb.org/document-library/usb-power-delivery>. [cit. 2025-01-01].
- [9] *A Primer on USB Type-C and Power Delivery Applications and Requirements*. Online. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/wp/slyy109b/slyy109b.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [10] *Linear Mode Operation and Safe Operating Diagram of Power-MOSFETs*. Online. Dostupné z: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_Linear\\_Mode\\_Operation\\_Safe\\_Operation\\_Diagram\\_MOSFETs-AN-v01\\_00-EN.pdf](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_Linear_Mode_Operation_Safe_Operation_Diagram_MOSFETs-AN-v01_00-EN.pdf). [cit. 2025-01-01].
- [11] *Research on Calculating the Internal Resistance of Battery Cell*. Online. Dostupné z: <https://francispress.com/uploads/papers/21heo8Noetb4KE62X5w9Rg3uCSYtUlsNqIKtBdgu.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [12] IEC 61960-3, *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Secondary lithium cells and batteries for portable applications*. 2017.
- [13] *Comparison of Battery balancing methods: Active cell balancing vs Passive cell balancing*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.mokoenergy.com/battery-balancing-methods/>. [cit. 2025-01-01].
- [14] *A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems*. Online. Dostupné z: [https://www.americansolarchallenge.org/ASC/wp-content/uploads/2013/01/SAE\\_2001-01-0959.pdf](https://www.americansolarchallenge.org/ASC/wp-content/uploads/2013/01/SAE_2001-01-0959.pdf). [cit. 2025-01-01].

- [15] *Passive Battery Cell Balancing*. Online. 2016. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/passive-battery-cell-balancing.html>. [cit. 2025-01-01].
- [16] *Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/6/4/2149>. [cit. 2025-01-01].
- [17] *Type C1H High Current Rated Fast Acting Chip Fuse*. Online. In: . 2023. Dostupné z: [https://eu.mouser.com/datasheet/2/643/ds\\_cp\\_c1h\\_series-1313146.pdf](https://eu.mouser.com/datasheet/2/643/ds_cp_c1h_series-1313146.pdf). [cit. 2025-01-01].
- [18] *LM74502, LM74502H Low IQ High Side Switch Controller with Reverse Polarity and Overvoltage Protection*. Online. In: . 2025. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm74502.pdf> [cit. 2025-01-01].
- [19] *TPS54302 4.5-V to 28-V Input, 3-A Output, EMI-Friendly Synchronous Step-Down Converter*. Online. In: . 2024. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54302.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [20] *1117 1A LOW DROPOUT VOLTAGE REGULATOR*. Online. In: . 2009. Dostupné z: <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [21] *Unregulated DC/DC Converter*. Online. In: . 2024. Dostupné z: <https://www.tracopower.com/tme-datasheet>. [cit. 2025-01-01].
- [22] *RUC002N05HZG* . Online. Dostupné z: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/transistor/mosfet/ruc002n05hzgt116-e.pdf> . [cit. 2025-01-02].
- [23] *ESP32-S3 Series*. Online. In: . 2024. Dostupné z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf). [cit. 2025-01-01].
- [24] *NX4832K035*. Online. Dostupné z: <https://nextion.tech/datasheets/nx4832k035/>. [cit. 2025-01-01].
- [25] *NTC Thermistors, Radial Leaded, Standard Precision*. Online. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/29049/ntcle100.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [26] *Measuring the temperature with NTCs*. Online. Dostupné z: <https://www.giangrandi.org/electronics/ntc/ntc.shtml>. [cit. 2025-01-01].
- [27] *TPS55288 36-V, 16-A Buck-boost Converter with I2C Interface*. Online. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps55288.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [28] *JMTC035N06D*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.jjwdz.com/pdf/MOSFET/pdf/JMTC035N06D%20Datasheet%20%20Version%201.0.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [29] *INAx181 Bidirectional, Low- and High-Side Voltage Output, Current-Sense Amplifiers*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [30] *MCP4921/4922 12-Bit DAC with SPI Interface*. Online. 2021. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21897B.pdf>. [cit. 2025-01-01].

- [31] *LM4040/LM4041 Precision Micropower Shunt Voltage Reference*. Online. 2018. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/LM4040-41-Precision-Micropower-Shunt-Voltage-Reference-DS20005757B.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [32] *INA226 36V, 16-Bit, Ultra-Precise I2C Output Current, Voltage, and Power Monitor With Alert*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [33] *STUSB4500*. Online. 2021. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/stusb4500-1851894.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [34] *The Complete Guide to Thermal Management*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.sameskydevices.com/catalog/resource/the-complete-guide-to-thermal-management-ebook.pdf>. [cit. 2025-01-01].
- [35] *IPZ40N04S5L-7R4*. Online. Dostupné z: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPZ40N04S5L-7R4-DS-v01\\_01-EN.pdf](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPZ40N04S5L-7R4-DS-v01_01-EN.pdf). [cit. 2025-01-02].

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

### Skratky:

DC/DC	Jednosmerný menič napätia
USB	Universal Serial Bus
SOA	Safe operation area
MOSFET	Tranzistor riadený elektrickým polom
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
A/D	Analógovo-digitálny prevodník
NTC	Negatívny teplotný koeficient
ASA	Akrylonitril-styrén-akrylát

### Symboly:

U	napätie	(V)
I	prúd	(A)
R	odpor	( $\Omega$ )
U <sub>SET</sub>	nastavené napätie	(V)
R <sub>i</sub>	interný odpor	( $\Omega$ )
R <sub>ref</sub>	odpor pred referenciou napätia	( $\Omega$ )
R <sub>NTC</sub>	odpor termistora	( $\Omega$ )
P	stratový výkon tranzistora	(W)
U <sub>ref</sub>	napäťová referencia D/A prevodníka	(V)
U <sub>OV</sub>	napätie povolenia vstupnej ochrany	(V)
U <sub>ds</sub>	napätie drain-source	(V)
U <sub>gs</sub>	napätie gate-source	(V)
U <sub>INref</sub>	vstupné napätie referencie napätia	(V)
U <sub>ref</sub>	napätie referencie	(V)
U <sub>NTC</sub>	napätie na termistore	(V)
U <sub>VYR</sub>	napätie na článku akumulátora	(V)
U <sub>IN</sub>	vstupné napätie	(V)
U <sub>OUT</sub>	výstupné napätie	(V)
U <sub>OUTmax</sub>	maximálne výstupné napätie	(V)
U <sub>INmax</sub>	maximálne vstupné napätie	(V)
I <sub>ref</sub>	prúd referenciou napätia	(A)
I <sub>VYR</sub>	vyrovnávací prúd článku akumulátora	(A)
I <sub>AVG</sub>	maximálny nastavený prúd induktorom	(A)
I <sub>L</sub>	najvyšší prúd cez induktor	(A)

$I_{\max DC}$	DC prúd induktorom	(A)
$\Delta I_{IP-P}$	zvlnenie prúdu induktorom	(%)
$T_A$	teplota okolia (25°C)	(°C)
$T_{JC}$	teplota PN prechodu	(°C)
$T_H$	teplota chladiča	(°C)
$T_c$	teplota obalu tranzistora	(°C)
$T_R$	teplota pôsobiaca na termistor	(°C)
$T_{25}$	teplota 25°C	(K)
$R_{JC}$	tepelný odpor od PN prechodu k puzdru tranzistora	(W/°C)
$R_{CH}$	tepelný odpor od puzdra tranzistora ku chladiču	(W/°C)
$R_{HA}$	tepelný odpor chladiča	(W/°C)
$R_{JCCH}$	celkový tepelný odpor	(W/°C)
$R_{pasta}$	tepelný odpor teplovodivej pasty	(W/°C)
$R_{SnBi}$	tepelný odpor spájky SnBi	(W/°C)
CAL	kalibračná hodnota	(-)
H	hrúbka teplo vodivej pasty	(m)
k	tepelná vodivosť	(W/m·K)
S	plocha tepelného prechodu	(m <sup>2</sup> )
$\beta$	koeficient NTC termistora	(-)
$f_m$	modulačná frekvencia	(Hz)
$F_{sw}$	spínacia frekvencia	(Hz)

# ZOZNAM PRÍLOH

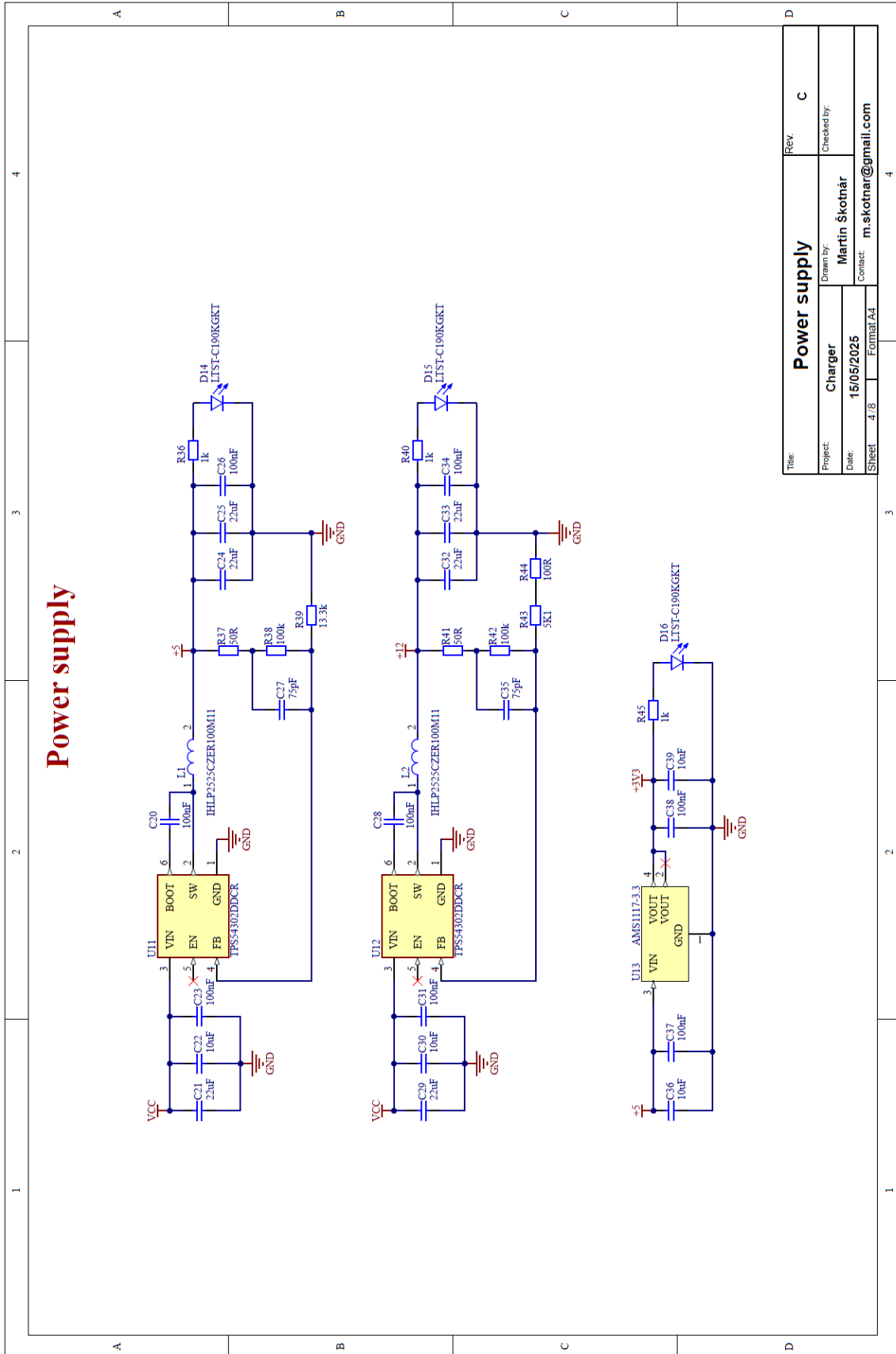
PRÍLOHA A SCHÉMY ZAPOJENIA .....	69
PRÍLOHA B NÁVRH DOSKY PLOŠNÉHO SPOJA.....	77





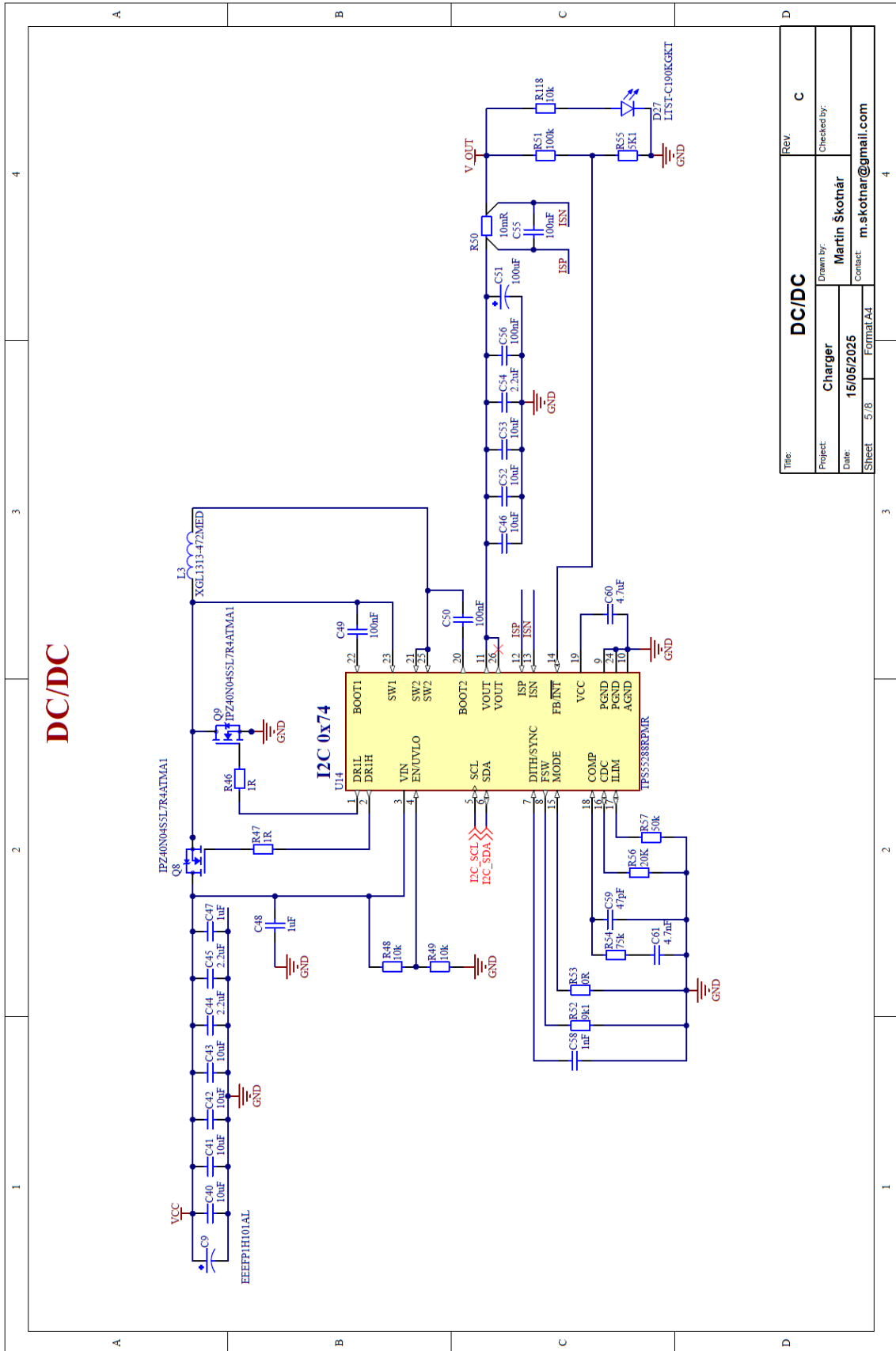


# A.4 Zapojenie zdrojov napätia



Title: <b>Power supply</b>		Rev. <b>C</b>
Project: <b>Charger</b>	Drawn by: <b>Martin Skotnar</b>	Checked by:
Date: <b>15/05/2025</b>	Contact: <b>m.skotnar@gmail.com</b>	
Sheet <b>4/8</b>	Format <b>A4</b>	

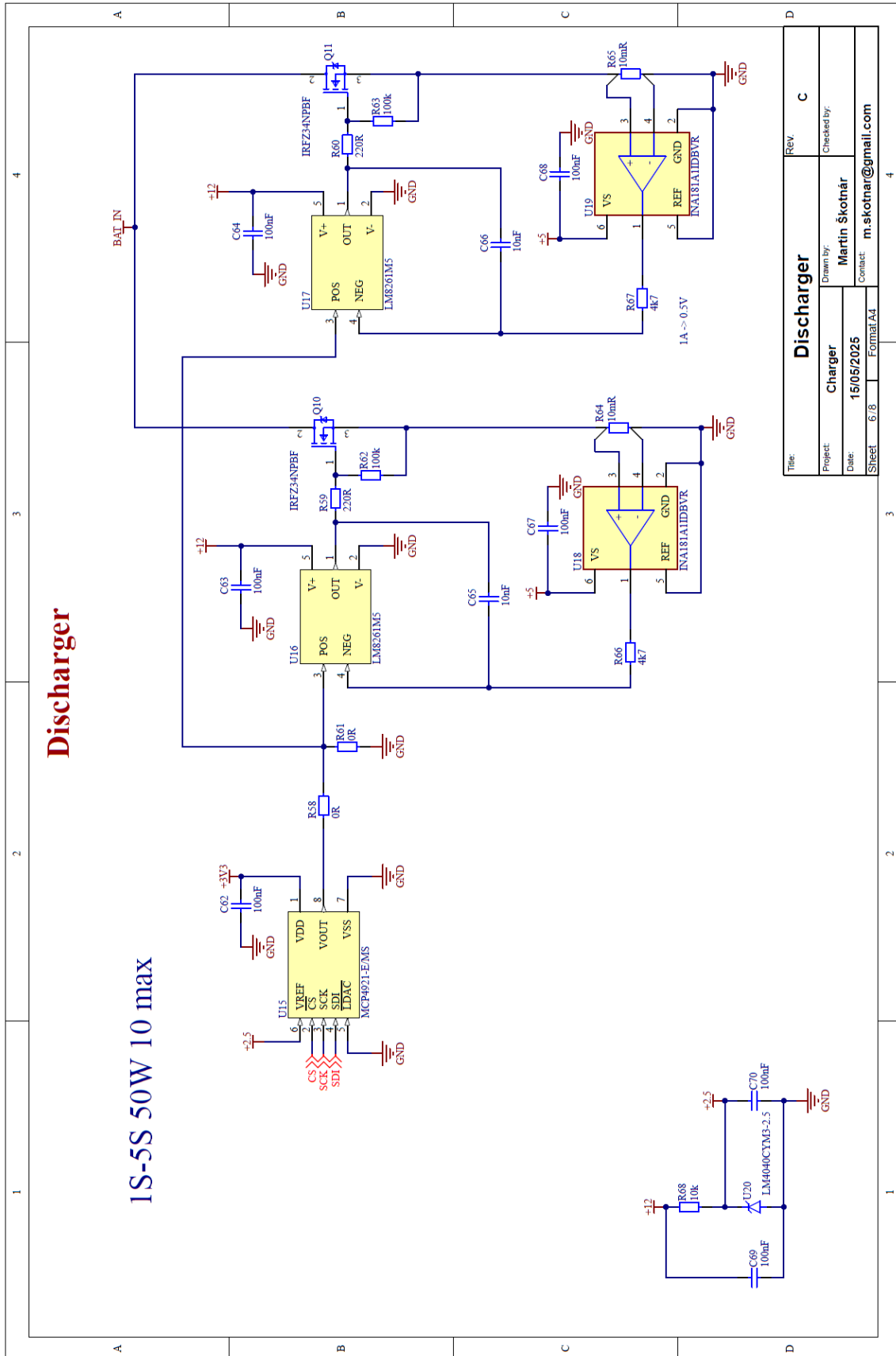
# A.5 Zapojenie DC/DC meniču



DC/DC

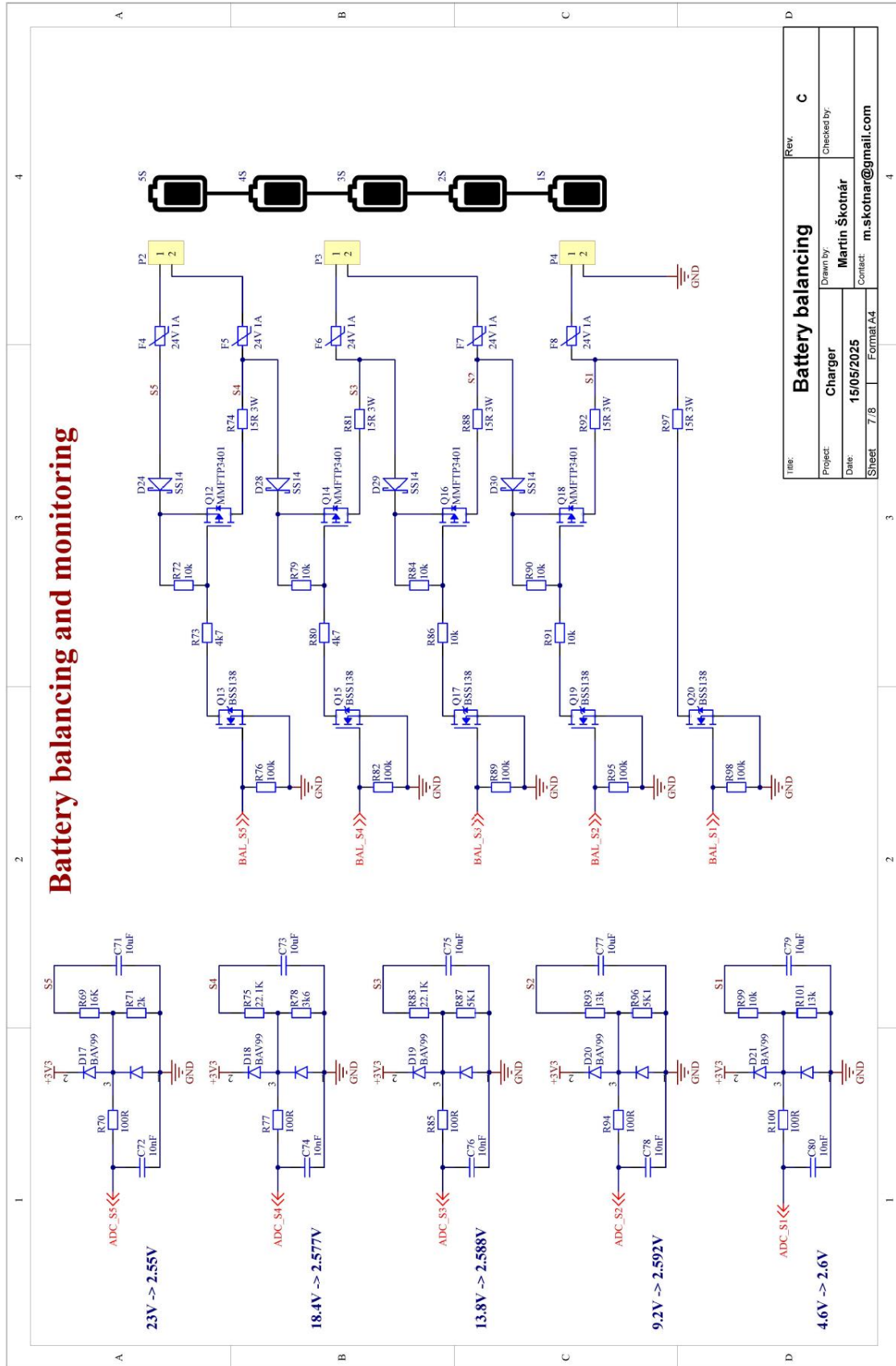
Title: <b>DC/DC</b>		Rev. <b>C</b>
Project: <b>Charger</b>	Drawn by: <b>Martin Skotnar</b>	Checked by:
Date: <b>15/05/2025</b>	Format: <b>A4</b>	Contact: <b>m.skotnar@gmail.com</b>
Sheet: <b>5/8</b>		

# A.6 Zapojenie elektronickej zát'aže

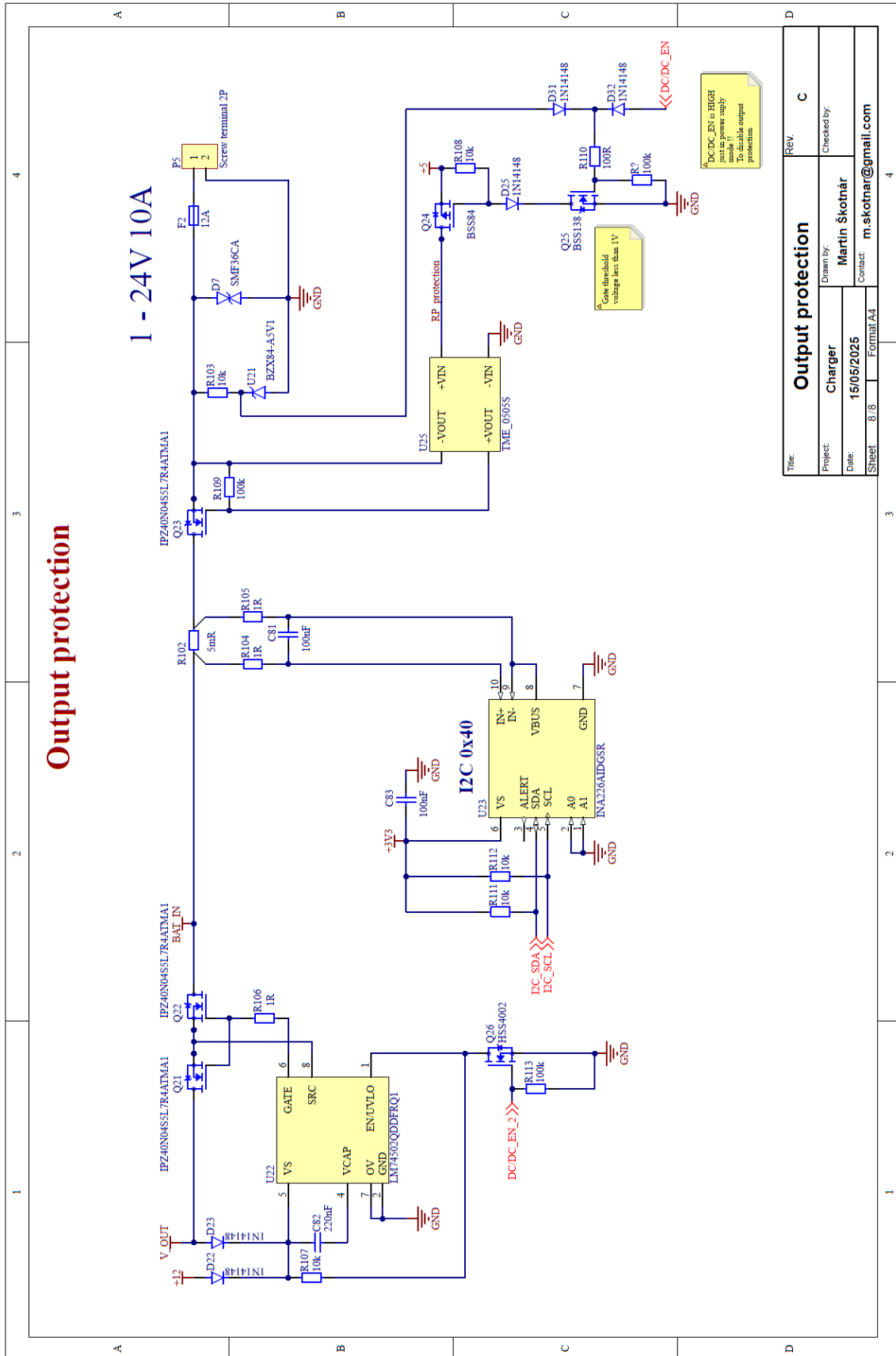


Title: <b>Discharger</b>		Rev: <b>C</b>
Project: <b>Charger</b>	Drawn by: <b>Martin Škotnár</b>	Checked by:
Date: <b>15/05/2025</b>	Contact: <b>m.skotnar@gmail.com</b>	
Sheet: <b>6 / 8</b>	Format: <b>A4</b>	

# A.7 Zapojenie vyrovnávanie napätí



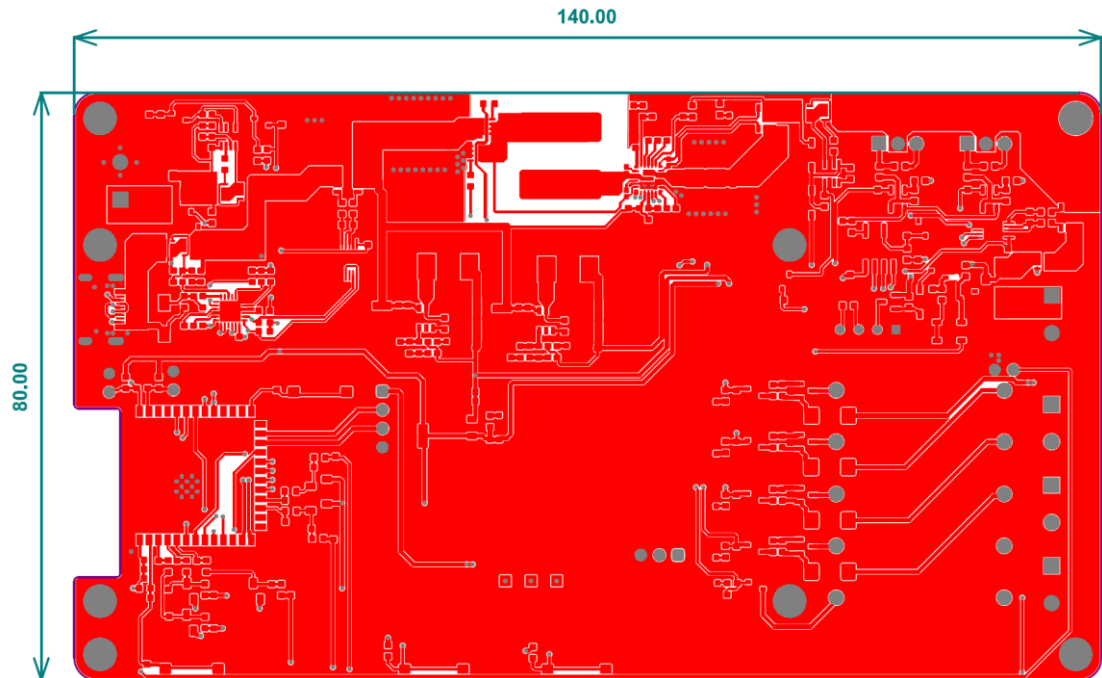
# A.8 Zapojenie výstupnej ochrany



Title:	Rev.	C
Project:	Drawn by:	Checked by:
	<b>Charger</b>	<b>Martin Škotnar</b>
Date:	15/05/2025	Contact:
Sheet:	8 / 8	Formel A4

## Príloha B Návrh dosky plošného spoja

### B.1 Vrchná strana DPS



### B.2 Spodná strana DPS

