

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁRSKA PRÁCA

ZARIADENIE NA AUTOMATICKÉ MERANIE  
CHARAKTERISTÍK AKUMULÁTOROV

DEVICE FOR AUTOMATED MEASUREMENT OF  
BATTERY CHARACTERISTICS

Autor: Adam Karas

Vedúci bakalárskej práce: doc. Ing. Martin Novák Ph.D.

Praha 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Karas** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **483383**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Zařízení pro automatické měření charakteristik akumulátorů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Device for automated battery characteristics measurement**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh a realizace zařízení pro automatické měření charakteristik akumulátorů, zejména vybíjecí křivky a kapacity. Měřená data budou uložena na SD kartě nebo posílána po internetu. Zařízení bude používáno pro dlouhodobé měření

- 1) navrhnete zařízení s mikroprocesorovým řízením, s měřením napětí a proudu a teploty
- 2) zařízení realizujete
- 3) experimentálně prokážete funkčnost měřením charakteristik akumulátorů

Seznam doporučené literatury:

- [1] Lei, Han & Han, Yuan. (2019). The measurement and analysis for Open Circuit Voltage of Lithium-ion Battery. Journal of Physics: Conference Series. 1325. 012173. 10.1088/1742-6596/1325/1/012173.  
[2] Wang S., Fernandez C., Chunmei Y., Yongcun F., Stroe D., Chen Z. Battery System Modeling - 1st edition, ISBN: 9780323904339, Elsevier Inc. 2021

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Martin Novák, Ph.D. odbor elektrotechniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **09.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne, a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

Dátum:

.....

Adam Karas

## **POĎAKOVANIE**

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu mojej bakálarskej práce, doc. Ing. Martinovi Novákovi, Ph.D, za odbornú a pedagogickú pomoc, trpezlivosť, rady a nápady, ktoré som zúžitkoval pri jej vypracovaní.

## **NÁZOV BAKALÁRSKEJ PRÁCE:**

ZARIADENIE NA AUTOMATICKÉ MERANIE CHARAKTERISTÍK AKUMULÁTOROV

## **ANOTÁCIA**

Cieľom tejto práce je navrhnuť a postaviť zariadenie na automatické meranie charakteristík batérií, konkrétne vybíjacia krivka a zostávajúca kapacita. Zariadenie bude riadené mikrokontrolerom, údaje budú prichádzať zo senzorov napätia, prúdu a teploty. Nameraná charakteristika bude uložená na externé pamäťové médium. Zariadenie bude slúžiť na dlhodobé testovanie batérií.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Snímač, Arduino, akumulátor, volt-ampérové charakteristiky, vybíjacia krivka, nabíjacia krivka, kapacita, napätie, regulovaná záťaž, pulzná šírková modulácia, životnosť, nabíjací cyklus.

## **BACHELOR'S THESIS TITLE:**

DEVICE FOR AUTOMATED MEASUREMENT OF BATTERY CHARACTERISTICS

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to design and build a device for automatic measurement of battery characteristics, namely the discharge curve and the remaining capacity. The device will be controlled by a microcontroller, data will be read from voltage, current and temperature sensors. The measured characteristic will be stored on an external storage medium. The device will be used for long-term testing of batteries.

## **KEY WORDS**

Sensor, Arduino, battery, volt-ampere characteristics, discharge curve, charging curve, capacity, voltage, regulated load, pulse width modulation, longevity, charging cycle.

# Obsah

Zoznam skratiek a veličín .....	7
Úvod.....	8
1. Teoretická časť .....	8
1.1. Degradácia kapacity akumulátora.....	8
1.2. Testovanie kapacity a životnosti akumulátorov.....	8
1.3. Druhy akumulátorov .....	9
1.4. Priemyselne používané zariadenia na kapacitné skúšky batériových sád .....	10
1.4.1. Regulovaná záťaž .....	10
1.4.2. Modely A2B RZ-120 a RZ-240.....	11
2. Návrhová časť .....	13
2.1. Návrh vlastného zariadenia.....	13
2.1.1. Bloková schéma zariadenia .....	13
2.1.2. Funkčná schéma zariadenia .....	14
2.1.3. Jednotlivé časti.....	15
2.2. Návrh a model regulovanej záťaže .....	18
2.2.1. Konštrukcia prototypu .....	20
2.3. Návrhový výkres.....	23
2.4. Zoznam súčiastok .....	24
3. Praktická časť .....	24
3.1. Doska plošných spojov .....	24
3.2. Riadiaci kód .....	27
4. Testovanie.....	30
4.1. Regulovaná záťaž .....	30
4.2. Nabíjanie.....	31
4.3. Automatický cyklus .....	32
Záver .....	33
Zoznam použitej literatúry a zdrojov .....	35
Zoznam obrázkov, rovníc, tabuliek a grafov .....	37
Zoznam použitého softvéru .....	38
Zoznam príloh.....	38

# Zoznam skratiek a veličín

I [A]	Current (Prúd)
U,V [V]	Voltage (Napätie)
R [ $\Omega$ ]	Resistance (Odpor)
C [Ah]	Capacity (Kapacita)
P [W]	Power (Výkon)
PWR	Power (Napájanie)
GND	Ground (Zem)
VCC	Voltage at the Common Collector (Napájacie napätie)
PWM	Pulse Width Modulation (Pulzná šírková modulácia)
USB	Universal Serial Bus (Univerzálna sériová zbernica)
SD	Secure Digital card (SD karta)
PCB, DPS	Printed Circuit Board (Doska plošných spojov)
THT	Through-hole technology (Označenie pre komponenty s drôtovým vývodom)
SMD	Surface Mounted Devices (Komponenty pre povrchovú montáž)
AC	Alternating current (Striedavý prúd)
DC	Direct current (Jednosmerný prúd)
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
I2C	Inter Integrated Circuit Bus
SPI	Serial Peripheral Interface
MOSI	Master Out Slave In
MISO	Master In Slave Out
CS	Chip Select
SS	Slave Select
SD	Secure Digital

# Úvod

Životnosť akumulátorov je s nástupom elektromobility pomerne často preberaná téma. Obsahom tejto práce je zostaviť krátky prehľad o technológiách používaných pri testovaní životnosti a v druhej časti návrh a realizácia podobného zariadenia. Zariadenie bude schopné zaznamenávať napätie a prúd v reálnom čase a následne vypočítať kapacitu akumulátora. Z uložených dát potom bude možné vyhodnotiť pokles kapacity s pribúdajúcim počtom nabíjajúcich cyklov. Zariadenie bude obsahovať programovateľnú regulovanú záťaž, ktorá je schopná vybiť batériu vopred nastaveným konštantným prúdom.

Práca je rozdelená do piatich kapitol. V prvej kapitole je rozobratá teória degradácie akumulátorov a následne prehľad zariadení určených na priemyselné účely. Kapitoly 2 a 3 sa venujú návrhu vlastného zariadenia ovládaného mikrokontrolerom, spoločne s jeho konštrukciou. Štvrtá kapitola je venovaná experimentu a zberu dát. Výsledky sú interpretované v závere tejto práce.

## 1. Teoretická časť

### 1.1. Degradácia kapacity akumulátora

Akumulátory začínajú degradovať odo dňa ich výroby. Vo väčšine prípadov sa jedná o lineárny proces a pokles kapacity je hlavne funkciou počtu nabíjajúcich cyklov a veku. V každom akumulátore pracujúcom na elektrochemickom princípe, dochádza k presunu iónov medzi katódou a anódou. Nabíťím akumulátora sa ióny presúvajú z katódy na anódu. Vybíjaním sa tok iónov obracia. Časom sa vplyvom oxidácie (hlavne u lithium-ionových článkov) znižuje počet iónov schopných preniesť elektrický náboj.

Tento dej negatívne ovplyvňuje aj teplota. Podľa spoločnosti Cadex Electronics, ktorá testuje batérie, úplne nabitá lítium-iónová batéria stratí po roku typického skladovania približne 20 percent svojej kapacity. Zvýšením teploty nad 38°C (100 °F) je toto číslo až 35%. [1]

Okrem strát spôsobených starnutím sú hlavnou príčinou degradácie u olovených batérií sulfatácia a korózia mriežky. Podstata tohto javu je postupný vznik kryštálov síranu olovnatého (PbSO<sub>4</sub>) na elektródach. Na rozdiel od pôvodného amorfného síranu sa vzniknuté kryštály zúčastňujú premien aktívnej hmoty elektród len vo veľmi obmedzenej miere. Následkom toho dôjde k zníženiu kapacity akumulátora. Tento proces je čiastočne zvrátiteľný napríklad nabíjaním nesymetrickým striedavým prúdom. [2] , [3]

### 1.2. Testovanie kapacity a životnosti akumulátorov

Kapacita akumulátora predstavuje mieru energie, ktorú dokážeme do akumulátora uložiť. Pri testovaní kapacity sa kontroluje schopnosť batérie dodávať určité množstvo prúdu pri požadovanom napätí počas stanoveného času.

$$W = U \cdot I \cdot t [J] \quad (1.1)$$



Pri akumulátoroch sa väčšinou kapacita udáva v Ampérhodinách [Ah] alebo miliampérhodinách [mAh]. Táto jednotka poskytuje lepšiu predstavu o využití daného akumulátora. Napríklad, akumulátor s kapacitou 2 Ah, teoreticky dokáže dodávať konštantný prúd 2 A po dobu 1 hodiny.

$$C = I \cdot t \text{ [Ah, A, h]} = \frac{U}{R} \cdot t = \text{[Ah, V, } \Omega, \text{ h]} \quad (1.2)$$

Existuje viacero noriem, ktoré predpisujú postup, ako akumulátory testovať. Napríklad norma ČSN EN 60623 ed. 3 (36 4350) - Akumulátorové články a baterie obsahujúci alkalické alebo jiné nekyselý elektrolyty – Uzavrený větraný nikel-kadmiový hranolový akumulátorový články

Tieto normy napríklad stanovujú, pri akej relatívnej kapacite sa akumulátor považuje za nevyhovujúci a je nutné ho vymeniť.

$$SoH = \frac{\text{aktuálna kapacita}}{\text{pôvodná kapacita}} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

#### Hlavné dôvody testovania:

- Určenie, kde sa akumulátor nachádza na jeho krivke životnosti.
  - Určenie nutnosti výmeny
  - Detekcia slabých/chybných článkov a chybných medzičlánkových spojení
  - Zber a analýza dát
  - Experimentálne overenie nových technológií
- [4]

### **1.3. Druhy akumulátorov**

Akumulátory sa najčastejšie rozdeľujú podľa ich chemického zloženia, a to na:

- Olovené (Pb)
- Nikel-kadmiové (NiCd)
- Nikel-metal hybridové (NiMH)
- Lithium-iónové (Li-ion)
- Lithium-polymérové (Li-pol)
- Ostatné

Každý nich má svoje zdanlivé výhody a nevýhody, preto sa rôzne typy používajú v rôznych aplikáciách.

Typ	Napätie na 1 článok [V]	Životnosť (počet cyklov)	Energetická hustota [Wh/kg]	Samovybíjanie [% /deň]
Pb	2	>1000	30	0,1
NiCd	1,2	1000	39	1
NiMH	1,2	500	57	1,5
Li-ion	3,6	600-1000	100	0,5
Li-pol	3,6	600-1000	150-200	0,5

Tab. 1.1 - Prehľad parametrov batériových článkov rôzneho chemického zloženia [5]

Typ	Výhody	Nevýhody
Pb	+ vysoká kapacita + dlhá životnosť + nízke samovybíjanie + schopnosť dodávať vysoké nárazové prúdy	- vysoká hmotnosť - väčšie rozmery - ekologicky nešetrné (olovo)
NiCd	+ vysoký počet nabíjajúcich cyklov + prevádzkové podmienky (teploty až do -40°C) + cena + rýchle nabíjanie	- vyššia hmotnosť - menšia kapacita - ekologicky veľmi závadné (kadmium) - pamäťový efekt - samovybíjanie
NiMH	+ vyššia kapacita oproti NiCD + nižšia hmotnosť oproti NiCD + rýchle nabíjanie + ekologicky šetrnejšia	- samovybíjanie - neschopnosť dodávať vysoké prúdy - nižší počet nabíjajúcich cyklov
Li-ion	+ vysoká pomerná kapacita + veľmi malé samovybíjanie + vysoký počet nabíjajúcich cyklov	- cena - náročná recyklácia - pri poškodení riziko explózie/vznietenia - citlivosť na teplotu - zložitejšie nabíjanie
Li-pol	+ najvyššia hustota uchovávanej energie + veľmi malé samovybíjanie + vysoký počet nabíjajúcich cyklov	- cena - náročná recyklácia - pri poškodení riziko explózie/vznietenia - citlivosť na teplotu - zložitejšie nabíjanie

Tab. 1.2 - Výhody a nevýhody batériových článkov rôzneho chemického zloženia [6], [7], [8]

## 1.4. Priemyselne používané zariadenia na kapacitné skúšky batériových sád

### 1.4.1. Regulovaná záťaž

Regulované záťaže sú určené pre vykonávanie kapacitných skúšok napríklad záložných zdrojov alebo iných batériových sád. Je ich možné použiť na rôzne typy batérií. Tieto priemyselne používané zariadenia je možné použiť pre široký rozsah napätí a prúdov. [9]

### 1.4.2. Modely A2B RZ-120 a RZ-240



Obr. 1.1 - Model RZ-120, výkonový modul (vpravo) a RZ-240 (vľavo) + meracie moduly [9]

#### Všeobecné vlastnosti výkonového modulu

- Prvky dimenzované pre pracovné napätie max. 800V DC
- výkonový vstup možno pripojiť k jednosmernému napätiu bez ohľadu na polaritu, resp. k striedavému napätiu
- Výkonový vstup chránený vymeniteľnými poistkami
- Zásuvné vymeniteľné moduly ZA 100/24, ZA 400/24, ZA 800/24, pre tri rozsahy vstupného napätia
- Závaž napájaná priamo z testovanej sady a redundantne zo siete 230V AC
- Riadiaca doska a LCD displej galvanicky oddelené od častí s nebezpečným napätím
- Ochrana batérií pred hlbokým vybitím nastavením príslušných parametrov
- Vybíjanie batérií konštantným prúdom, alebo konštantným výkonom
- Súbor nameraných dát zapisovaný do internej pamäte
- Obslužný softvér na spracovanie získaných dát v PC

[9]

#### Všeobecné vlastnosti meracieho modulu

- 24 vstupov pre meranie napätia (max. 20V / vstup)
- Meracie vstupy vybavené ochranou proti prepätiu a ochranou proti prepólovaniu
- 1 x meranie teploty
- Vstup pre napájanie galvanicky oddelený od meracích vstupov
- Napájanie z testovanej sady alebo separátneho zdroja DC napätia
- Galvanické oddelenie s výkonovým modulom, prenos dát systémom wireless

[9]

#### Aplikácie

- Vybíjanie a testovanie kapacity priemyselných batérií
- Testovanie výkonových zdrojov AC a DC napätia
- Sledovanie blokov batérií v zdrojoch UPS alebo v zdrojoch DC napätia

[9]

Menovité napätie bat. sady	24 V DC	48 V DC	110 V DC	220 V DC	400 V DC	600 V DC
RZ-120 max. testovací prúd *	60 A	120 A	30 A	20 A	10 A	8 A
RZ-240 max. testovací prúd *	125 A	240 A	60 A	40 A	25 A	15 A

Menovité napätie bat. sady	110 V AC	120 V AC	220 V AC	230 V AC	240 B AC	380 V AC	400 V AC	420 V AC
RZ-120 max. testovací prúd *	47 A	18 A	15 A	15 A	16 A	8 A	7 A	7 A
RZ-240 max. testovací prúd *	100 A	36 A	35 A	37 A	39 A	21 A	15 A	15 A

\* Pozn.: Tabuľka uvádza vybrané hodnoty max. prúdov pri kapacitnej skúške batérie konštantným prúdom a nastavenom koncovom napätí 1,8 V / článok.

Použitý zásuvný zdroj	ZA 100/24	ZA 400/24	ZA 800/24
Max. meracie napätie	20 - 100 V DC	80 – 400 V DC	200 – 800V DC

	RZ120	RZ240
Hmotnosť	17 kg	22 kg
Rozmery výška x šírka x hĺbka	317 x 231 x 602 mm	497 x 231 x 602 mm

Obr. 1.2 – Štítkové hodnoty zariadení [9]

## 2. Návrhová časť

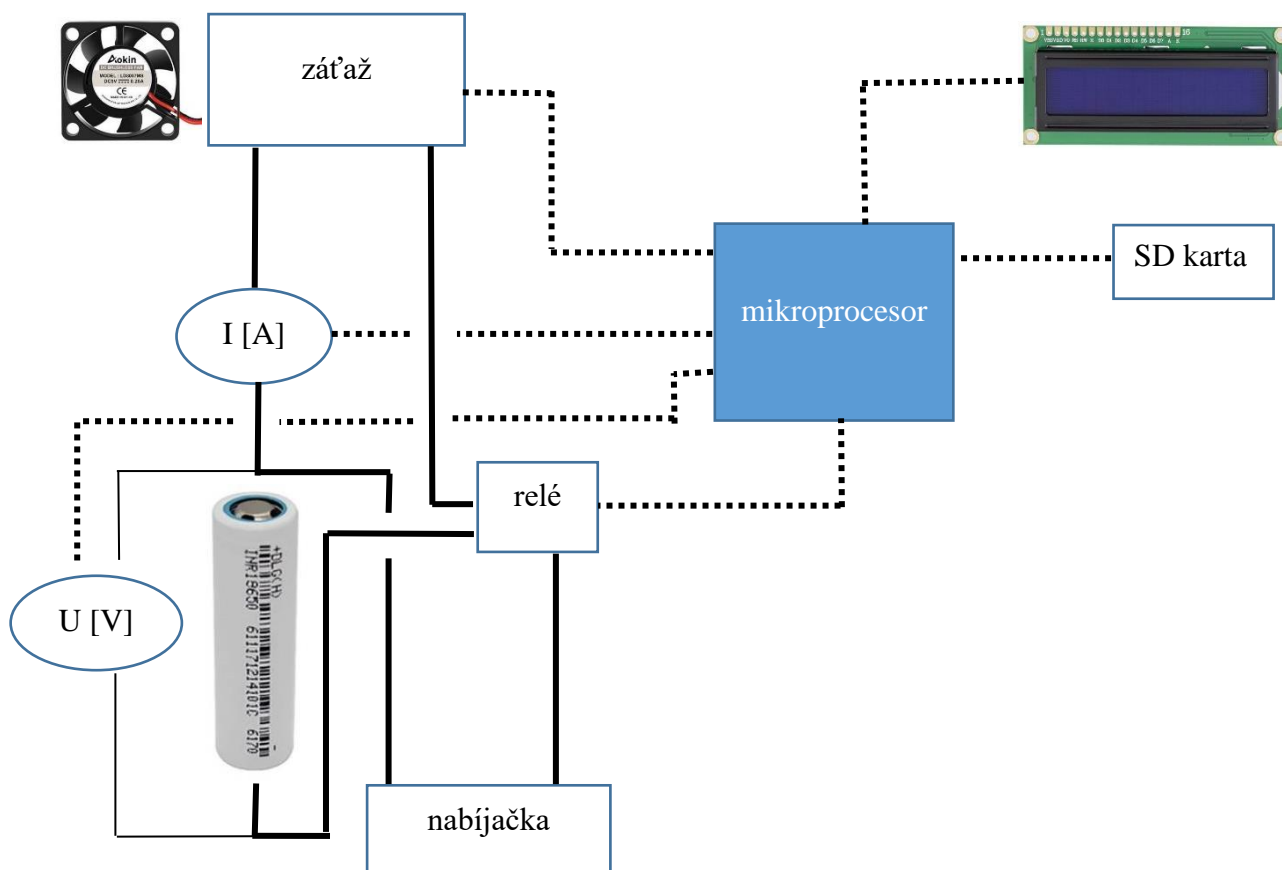
### 2.1. Návrh vlastného zariadenia

Navrhované zariadenie musí spĺňať niekoľko požiadaviek. Musí byť schopné opakovane a samostatne vybiť a nabiť zadaný akumulátor, identifikovať stav nabitia/vybitia, zaznamenávať hodnoty napätia a prúdu v reálnom čase a ukladať ich na pamäťové médium (SD karta).

Ďalej musí byť zariadenie schopné regulovať vybíjací prúd a v prípade prehriatia prerušiť tok prúdu. Pre lepší používateľský zážitok bude slúžiť displej na zobrazenie aktuálnych údajov, ako napríklad prebiehajúca činnosť (nabíjanie/vybíjanie), nabíjací/vybíjací prúd a kapacita akumulátoru.

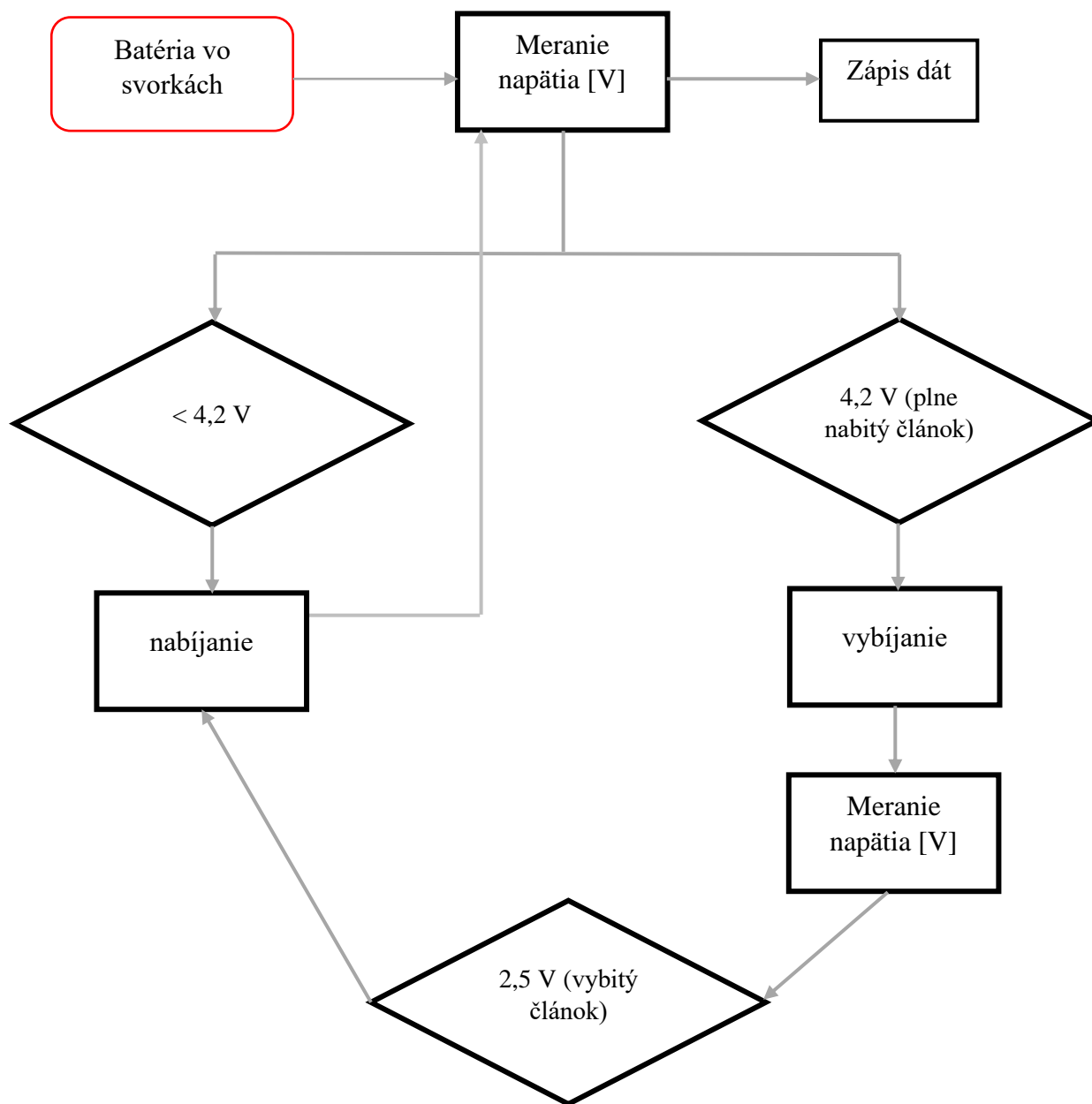
Pre rýchlejšie a pohodlnejšie testovanie, bude zariadenie schopné nabíjať/vybíjať dve batérie 18650 zároveň. Celé zariadenie bude aktívne chladené 5V ventilátorom .

#### 2.1.1. Bloková schéma zariadenia



Obr. 2.1- Bloková schéma zapojenia

### 2.1.2. Funkčná schéma zariadenia



Obr. 2.2 – Diagram opisujúci funkčný princíp

### 2.1.3. Jednotlivé časti

#### Základová doska (Doska plošných spojov)

Medená doska pokrytá nevodivým substrátom. Slúži ako základný konštrukčný prvok elektronických obvodov a jej úlohou je vodivé spojenie elektronických prvkov podľa schémy. Na DPS budú pripájkované všetky komponenty a konektory.

#### Mikroprocesor Arduino Mega

Arduino ADK je vývojová doska založená na ATmega2560. Doska obsahuje 54 digitálnych vstupov/výstupov (z toho je 14 použiteľných ako výstupy PWM), 16 analógových vstupov, 4x UART, 16 MHz kryštálový oscilátor, rozhranie USB, napájací konektor, konektor IKSP a resetovacie tlačidlo. [10]

#### Meranie napätia

Na meranie napätia bude použitý analógový vstup v mikroprocesore Arduino Mega. K úprave rozsahu meraného napätia, bude použitý delič v podobe 2 rezistorov o odpore 12 kOhm. Pri dostupnom rozlíšení 10 bitov, bude pri napätí zdroja 5V presnosť  $\pm 2,4$  mV.

#### Prúdový senzor ACS712

Senzor sa skladá z lineárneho Hallovho obvodu s nízkym offsetom s medenou vodivou dráhou. Prúd pretekajúci týmto medeným vedením generuje magnetické pole, ktoré Hallova sonda premieňa proporcionálne na napätie. Výstup zariadenia má kladný sklon ( $>V_{IOUT(Q)}$ ), keď primárnym vedením preteká zvyšujúci sa prúd. Vnútorňý odpor vodivej dráhy je typicky  $1,2 \text{ m}\Omega$  a poskytuje nízku výkonovú stratu. Konštrukcia umožňuje ochranu zariadenia až pri 5-násobnom nadprúde. [11]

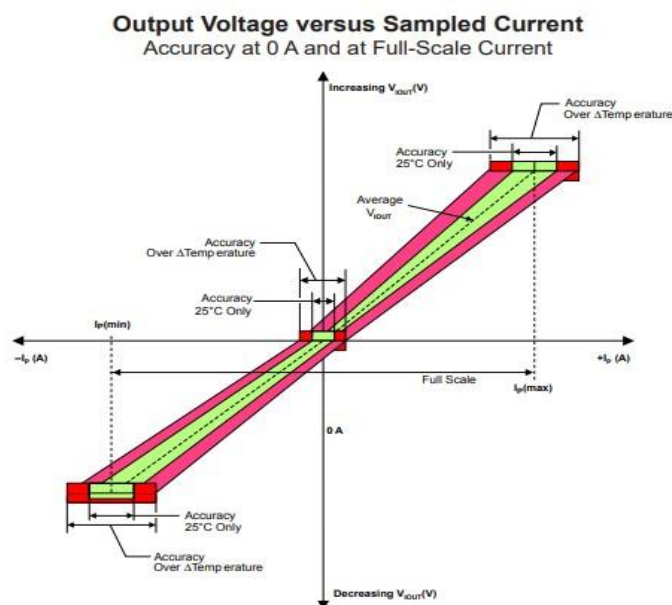


Obr. 2.3 - čip ACS712 [22]

## 2. SPECIFIKACE

<b>Čip</b>	ACS712	<b>Vnitřní odpor senzoru</b>	1,2 m $\Omega$
<b>Provozní napětí</b>	5 VDC	<b>Doba náběhu (rise time)</b>	5 us
<b>Rozsah měření proudu</b>	$\pm 5 \text{ A}$	<b>Izolační napětí</b>	2,1 kV <sub>RMS</sub>
<b>Výstupní hodnota při I = 0 A</b>	VCC/2	<b>Šířka pásma</b>	80 kHz
<b>Citlivost</b>	66–185 mV/A	<b>Provozní teplota (°C)</b>	-40–85
<b>Chyba měření (@ 25°C)</b>	< 1,5 %	<b>Rozměry (mm)</b>	31 x 13

Obr. 2.4 - Špecifikácie ACS712 [12]



Obr. 2.5 - Presnosť snímača v závislosti na okolitej teplote a meranom prúde [13]

### Nabíjačka MP2636

MP2636 je flexibilná switch-mode nabíjačka, navrhnutá pre jednočlánkové Li-ion alebo Li-Pol batérie používané v širokej škále prenosných aplikácií. Keď je k dispozícii externé napájanie z  $V_{IN}$ , automaticky sa začne nabíjanie a rozsvieti sa kontrolka CHG. Keď nie je k dispozícii žiadne externé napájanie, aktivuje sa režim BOOST a batéria začne fungovať ako powerbanka. [14]

Technické špecifikácie:

- Vstupné napätie režimu nabíjania ( $V_{IN}$ ): 4,5-6,0V
- Výstupné napätie režimu Boost ( $V_{OUT}$ ): 5V
- Vhodné pre napätie batérie: 4,2 V (3,7 V lítiová batéria plná 4,2 V)
- Režim nabíjania - Maximálny nabíjací prúd: 2,5A
- Boost režim - Maximálny výstupný prúd: 2,5A
- Podpora ochrany pred prebitím batérie
- Teplotná ochrana: viac ako 150 °C → automatické odpojenie napájania

[14]



Obr. 2.6 – Nabíjačka MP2636 [14]



## Čítačka pamäťových kariet

- Modul čítačky microSD kariet pre mikrokontrolery
- Integrovaný stabilizátor napätia na 3.3 V
- Čítanie / zápis
- Piny GND, 3.3 V, 5 V, CS, MOSI, SCK, MISO, GND

[15]



Obr. 2.7 – čítačka pamäťových kariet [15]

## Displej

- I2C Display LCD 1602, 16x2 Znakov



Obr. 2.8 – LCD Displej 16x2 znaky [16]

## Relé

Elektromagnetické relé s DC cievkou

Parametry cievky:

$$U = 5V$$

$$R = 70 \text{ Ohm}$$

$$P = 0,36 \text{ W}$$

Kontakt:

Typ kontaktu: 1 x prepínací

Max. prúd kontaktom: 10 A

Čas príťahu/odpadu: 10/5 ms

[17]

Bude slúžiť na prepínanie medzi vybijacím a nabíjacím cyklom. Ovládané bude cez Arduino.



Obr. 2.9 - Relé modul 5V [17]

## Senzor teploty KTY 81-110

- Teplotný rozsah: -55...150°C
- Max. pracovný prúd: 10mA
- Hodnota odporu: 1kΩ

[18]



Obr. 2.10 - Senzor teploty KTY81-110 [18]

## Regulovaná zát'az

Jedná sa o elektronickú zát'az navrhnutú tak, aby dokázala vybíjať batériu konštantným prúdom. Za reguláciu bude zodpovedný MOSFET tranzistor riadený pomocou PWM cez Arduino. PWM má výhodu oproti analógovému riadeniu v tom, že vzniknuté teplo sa disipuje v rezistore a nie v tranzistore.

Maximálna frekvencia spínania, ktorú Arduino mega podporuje, je 62 500 Hz. Čím je frekvencia vyššia, tým presnejšie sa dá prúd regulovať. Avšak, s vyššou frekvenciou je tranzistor častejšie v polootevorenom stave a disipuje sa v ňom oveľa viac tepla, čo spôsobuje straty.

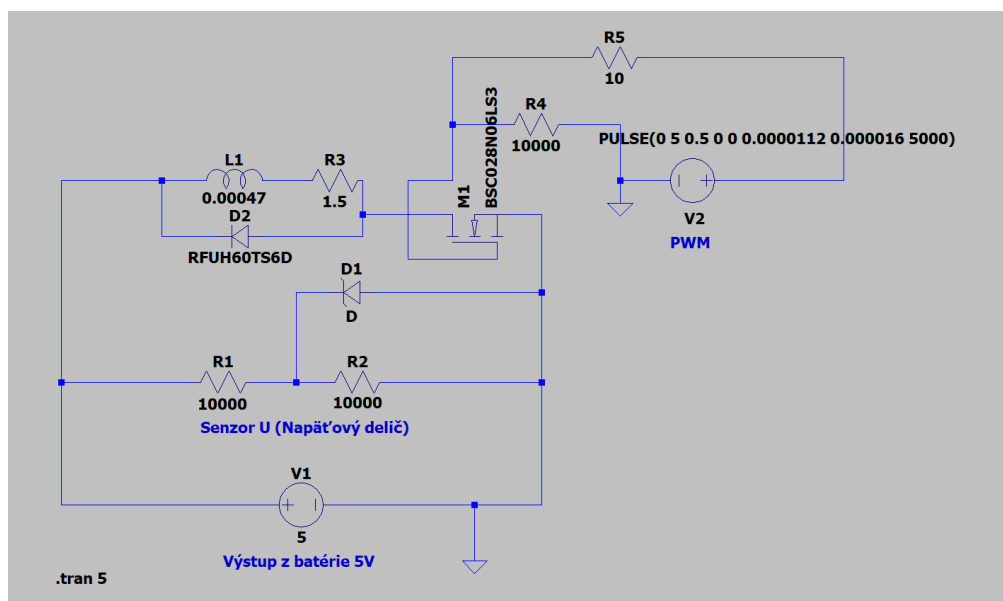
Zát'az bude generovať najviac tepla, preto bude pravdepodobne nutné použiť pasívny aj aktívny chladič. Po dosadení do vzorca pre Joulovo teplo s predpokladom odberu maximálneho výstupného prúdu 2,5A vychádza teoretický maximálny výkon pre jeden kanál až 9,4 W.

$$P = RI^2 = 1,5 \cdot 2,5^2 = 9,375 \text{ W} \quad (2.1)$$

## 2.2. Návrh a model regulovanej zát'aze

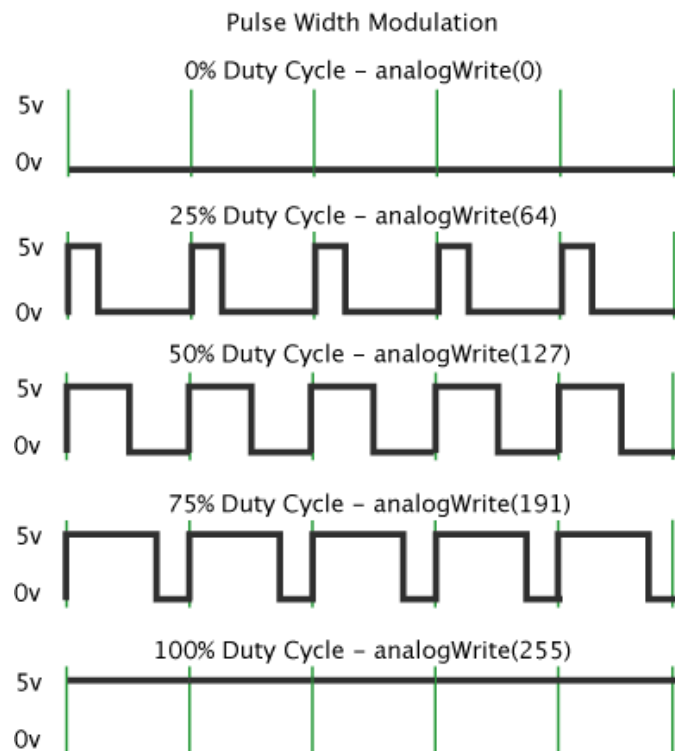
Zát'az pozostáva z troch kľúčových komponentov:

- Výkonový rezistor ( $\approx 1,5 \text{ Ohm}$ , 10-20 W)
- Cievka ( $\approx 330 \mu\text{H}$ )
- MOSFET tranzistor na reguláciu  
(Unipolárny tranzistor, N kanál, THT, 200 V, 18 A, 150 W, IRF640N)

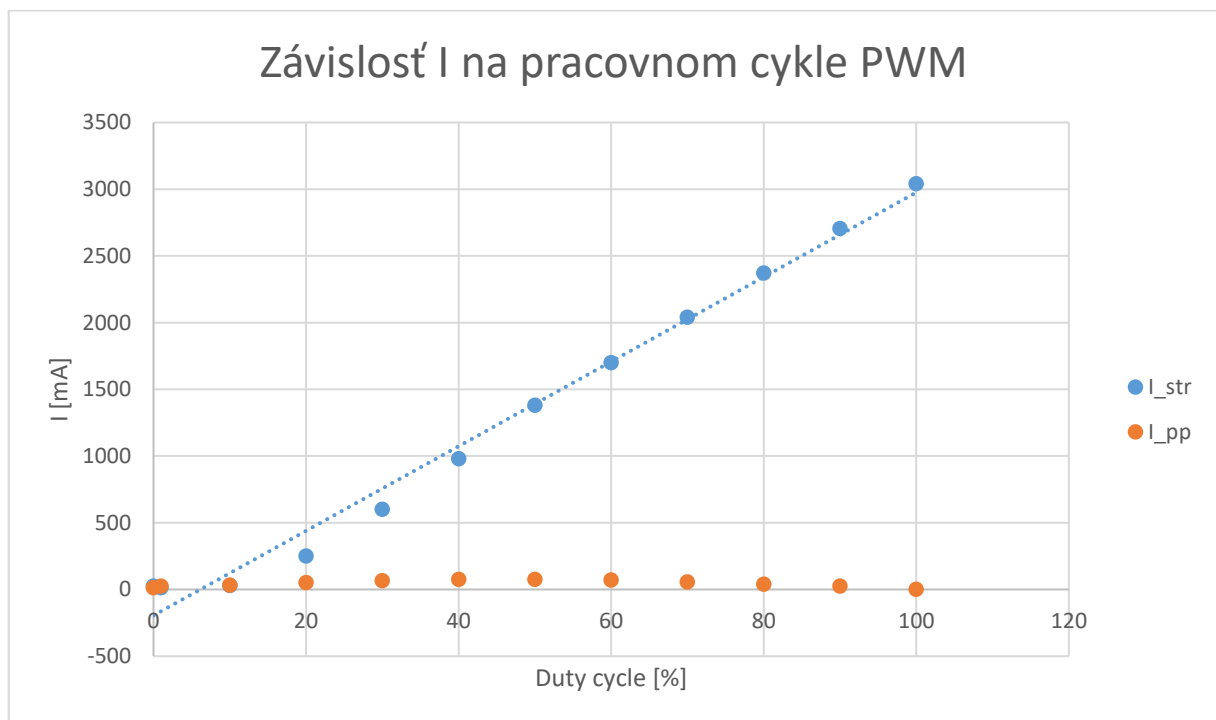


Obr. 2.11 - Schéma zát'aze v programe LTSpice

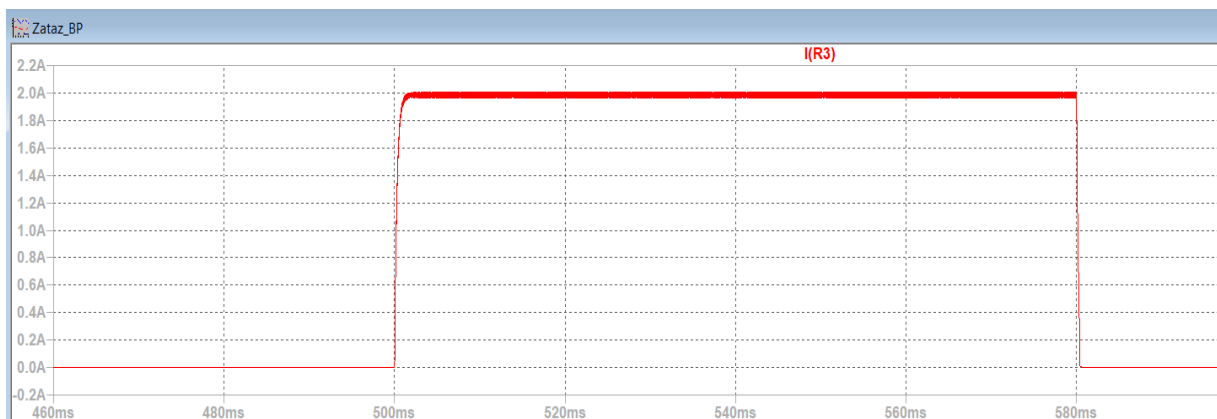
V programe LTspice bolo urobených niekoľko simulácií. Spínacia frekvencia bola nastavená na 62 500 Hz. Pomocou zmeny dĺžky pracovného cyklu je možné regulovať strednú hodnotu prúdu od nuly až po 3A.



Obr. 2.12 - princíp PWM na Arduine [19]



Graf 1 - Závislosť strednej hodnoty prúdu  $I_{str}$  na pracovnom cykle PWM. Zo simulácie vyplýva, že riadenie má v oblasti 10-100% lineárnu charakteristiku.  $I_{pp}$  označuje "I peak to peak", teda odchýlku od strednej hodnoty.

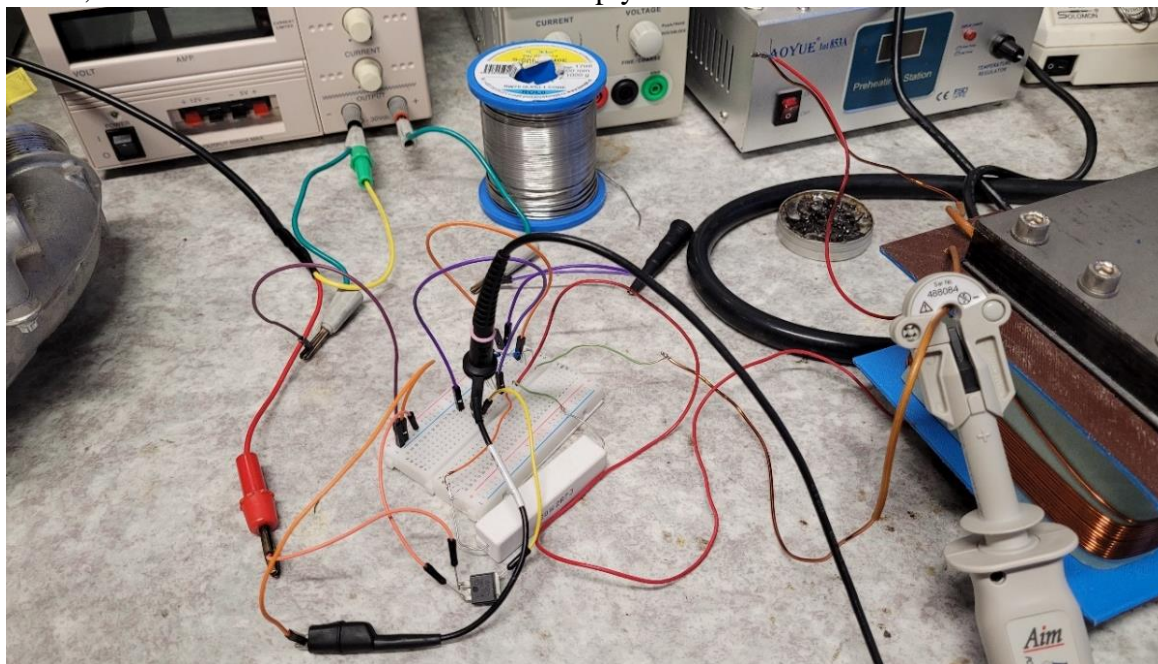


Obr. 2.13 – PWM pracovný cyklus 70% umožňuje tok prúdu o veľkosti 2A. Prúd v skutočnosti osciluje okolo strednej hodnoty

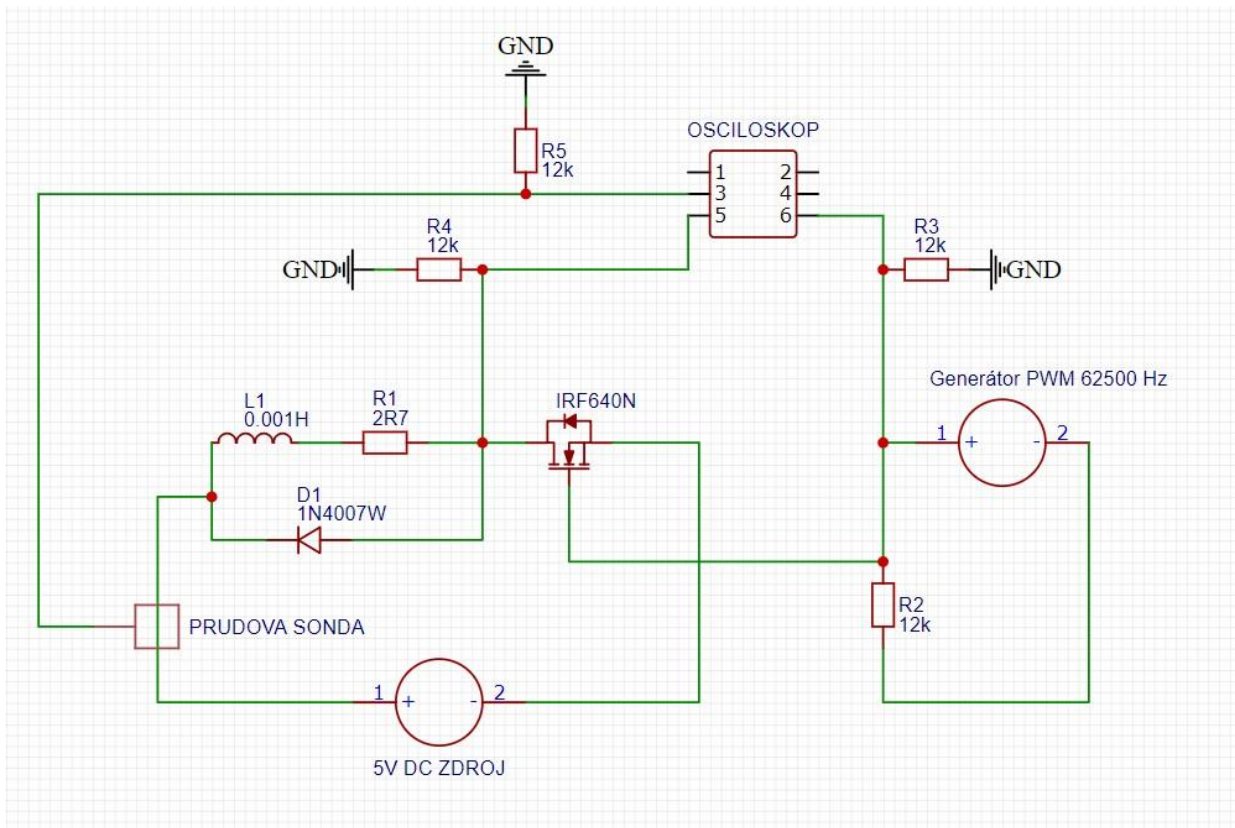
Na výstupe z programu LTSpice je znázornené spustenie PWM generátoru v čase  $t = 500$  ms. Hodnota prúdu stúpne na približne 2 A a mierne osciluje okolo strednej hodnoty, čo je spôsobené otváraním a zatváraním MOSFET tranzistoru. V čase  $t = 580$  ms sa generátor PWM vypne a prúd klesne na nulovú hodnotu.

### 2.2.1. Konštrukcia prototypu

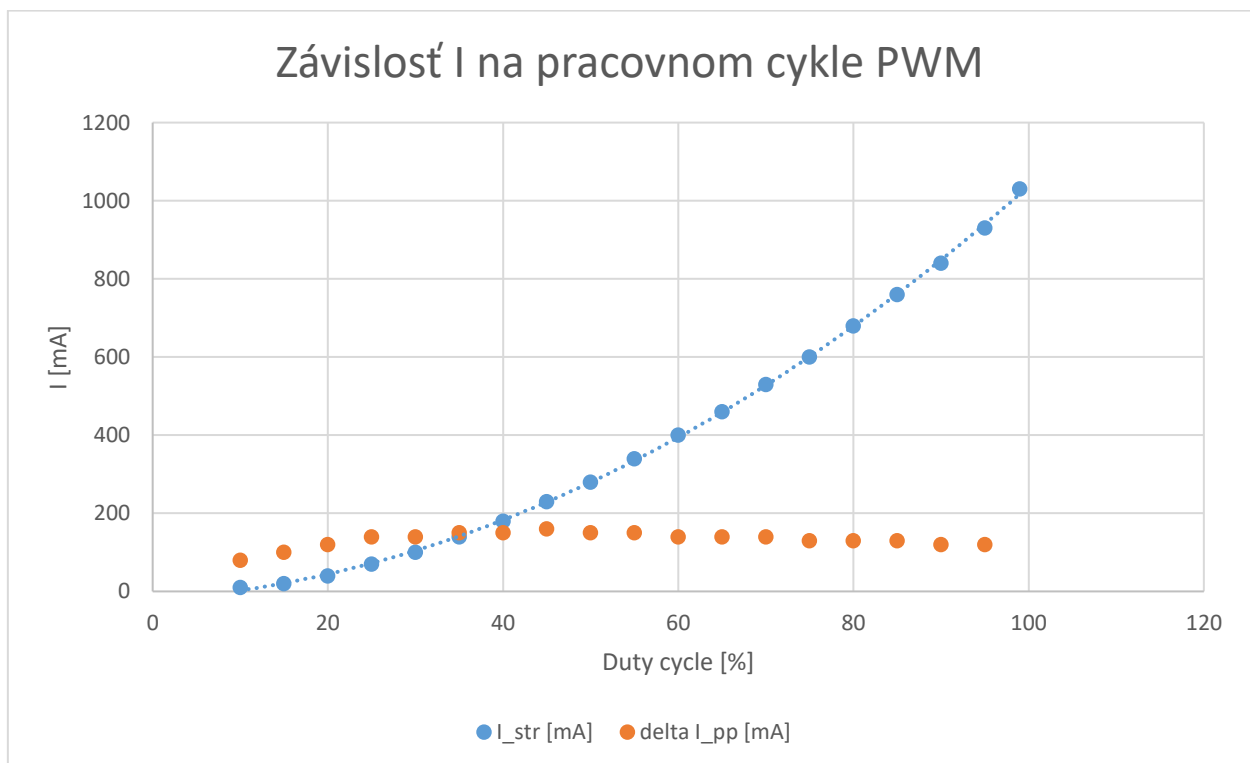
Na otestovanie počítačového modelu v reálnych podmienkach bol zostrojený prototyp regulovanej záťaže. Parametre cievky, rezistoru a ostatných komponentov neboli totožné s tými v simulácii, ale na overenie funkčnosti to nemalo vplyv.



Obr. 2.14 - Prototyp záťaže na nepájanom poli.



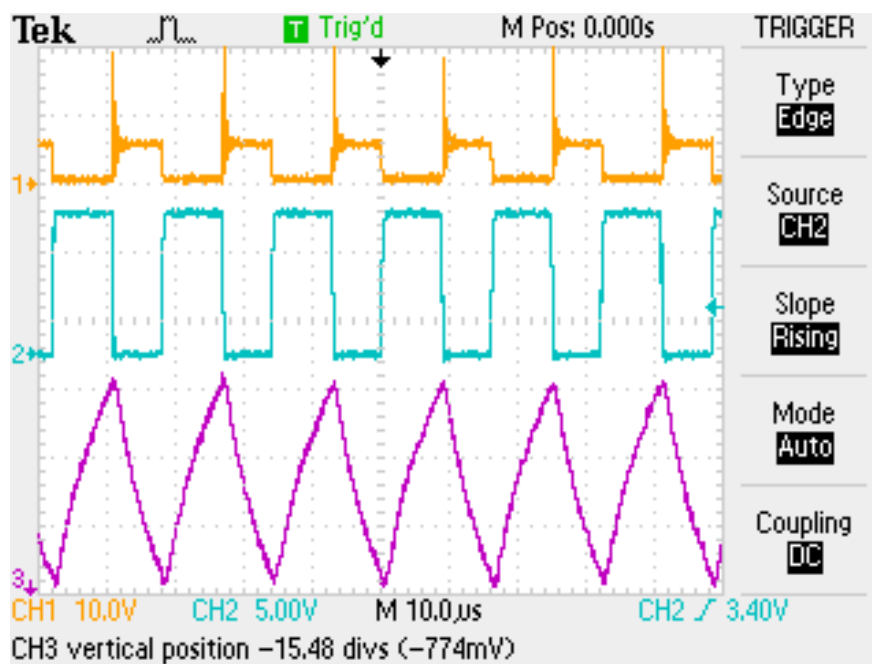
Obr. 2.15 - Schéma zapojenia prototypu



Graf 2 - Závislosť I na pracovnom cykle PWM skutočnej záťaže.  $I_{str}$  označuje strednú hodnotu prúdu.  $I_{pp}$  označuje "I peak to peak", teda odchýlku od strednej hodnoty.

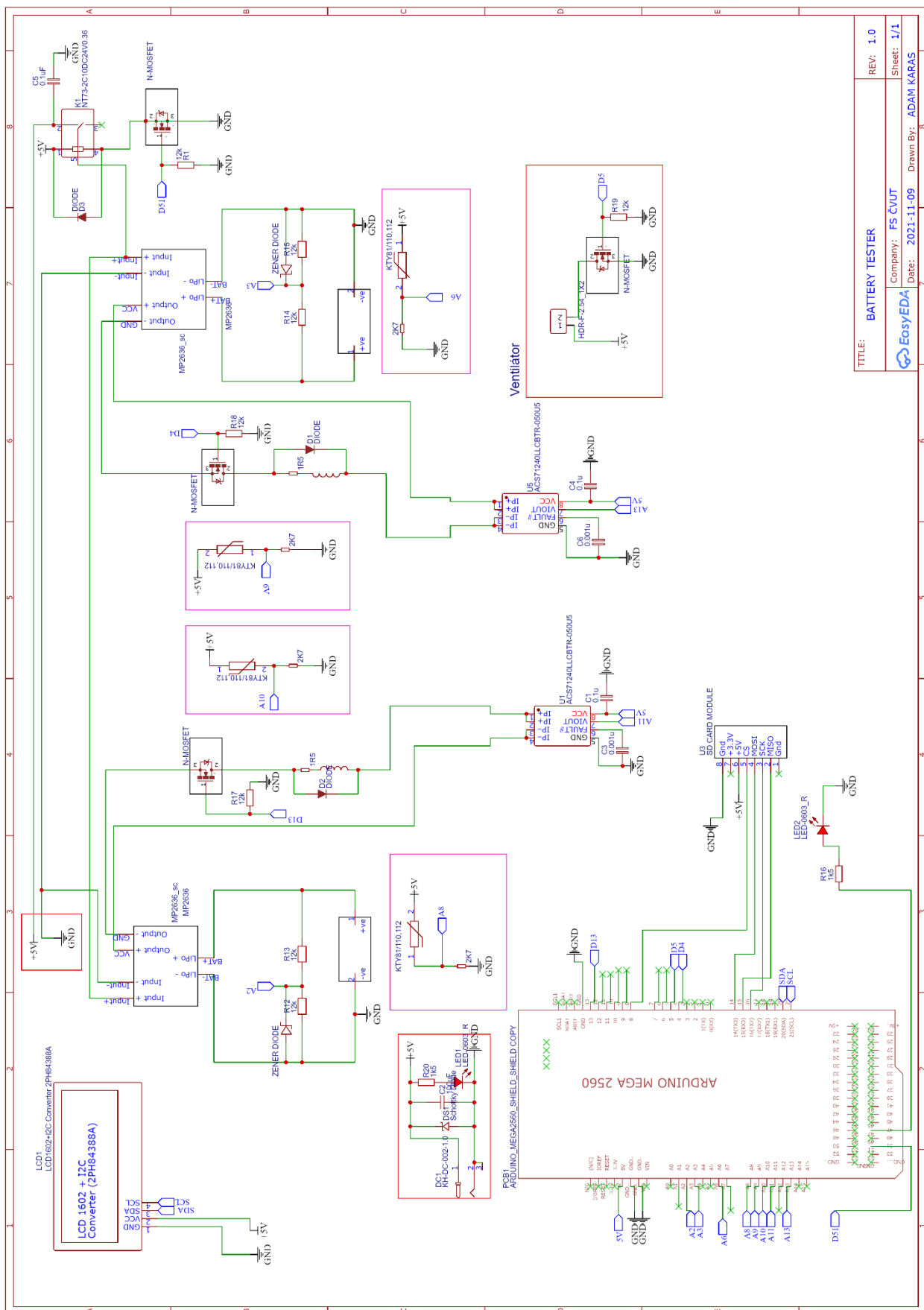
Z grafu je zřejmé, že prúdová charakteristika už nie je lineárna. Taktiež maximálny prúd, ktorý sa podarilo odoberať z 5V zdroja bol iba 1A. Toto je spôsobené veľkým vnútorným odporom použitých komponentov a použitím väčšieho výkonového rezistoru o odpore 2,7 Ohm.

Na snímke z osciloskopu je tyrkysovou farbou vyznačené napätie priamo z pulzného generátora, ktorý bol pripojený na MOSFET tranzistor. Oranžovou farbou je vykreslené napätie v obvode. Vysoké napät'ové špičky naznačujú použitie nevhodnej (pomalej) diódy. Fialovou farbou je vykreslený napät'ový výstup z prúdovej sondy. Je zřejmé, že prúd osciluje okolo strednej hodnoty uvádzanej na zdroji. S dlhším pracovným cyklom sa amplitúda kmitania prúdu jemne znižovala.



Obr. 2.16 - Snímok obrazovky osciloskopu. Tyrkysová – napätie PWM generátoru, oranžová – napätie v obvode, fialová – napätie prúdovej sondy (1 V odpovedá 1 A)

## 2.3. Návrhový výkres



TITLE:	BATTERY TESTER	REV:	1.0
Company:	FS ČVUT	Sheet:	1/1
Date:	2021-11-09	Drawn By:	ADAM KARAS

Obr. 2.17 - Návrhový výkres zariadenia vytvorený v programe EasyEDA (pre plné rozlíšenie viz príloha 1)

## 2.4. Zoznam súčiastok

	Názov	Popis	Počet ks
1	Držiak	Držiak na 1 kus Li-ion baterie veľkosti 18650	2
2	Zenerova dióda	THT, 5,1V, 98mA, 0,5W, DO35 BZX83V005.1	2
3	Schottkyho dióda	100V/8A, SMC	1
4	Dióda	THT, 1000V/1A, DO41	3
5	Konektor pre ventilátor	5V	1
6	Senzor teploty	PTC Termistor, THT, SOD70 KTY81-110	4
7	Cievka	TLTV, 330 $\mu$ H/3A, DP	2
8	N-MOSFET	SMD, 200V, 18A, 150W, D2PAK IRF640NSPBF	4
9	Rezistor 12K	12 000 $\Omega$ , 1%, THT	8
10	Rezistor 1K5	1500 $\Omega$ , 0,6 W, 1%, THT	2
11	Rezistor 2K7	2700 $\Omega$ , 1W 1%, THT	4
12	Rezistor výkonový 1R5	1,5 $\Omega$ , THT, 20W, 5%	2
13	Kondenzátor	0,1 $\mu$ F, SMD, 1206	6
14	Kondenzátor	100 $\mu$ F, THT	1
15	Kondenzátor	0,001 $\mu$ F, THT	2
16	LED	1,8V, 3mm, BL-B2141-L	2
17	Nabíjačka	MP2636	2
18	LCD Displej	LCD1602+I2C	1
19	5V 1 kanálové relé	NT73-2 CS10 DC5V 0,36	1
20	Čítačka pamäťových kariet	SD Card Reader, SPI zbernica	1
21	Prúdový senzor	ACS712	2
22	Arduino Mega 2560 R3		1

Tab. 2.1 – Zoznam súčiastok

## 3. Praktická časť

### 3.1. Doska plošných spojov

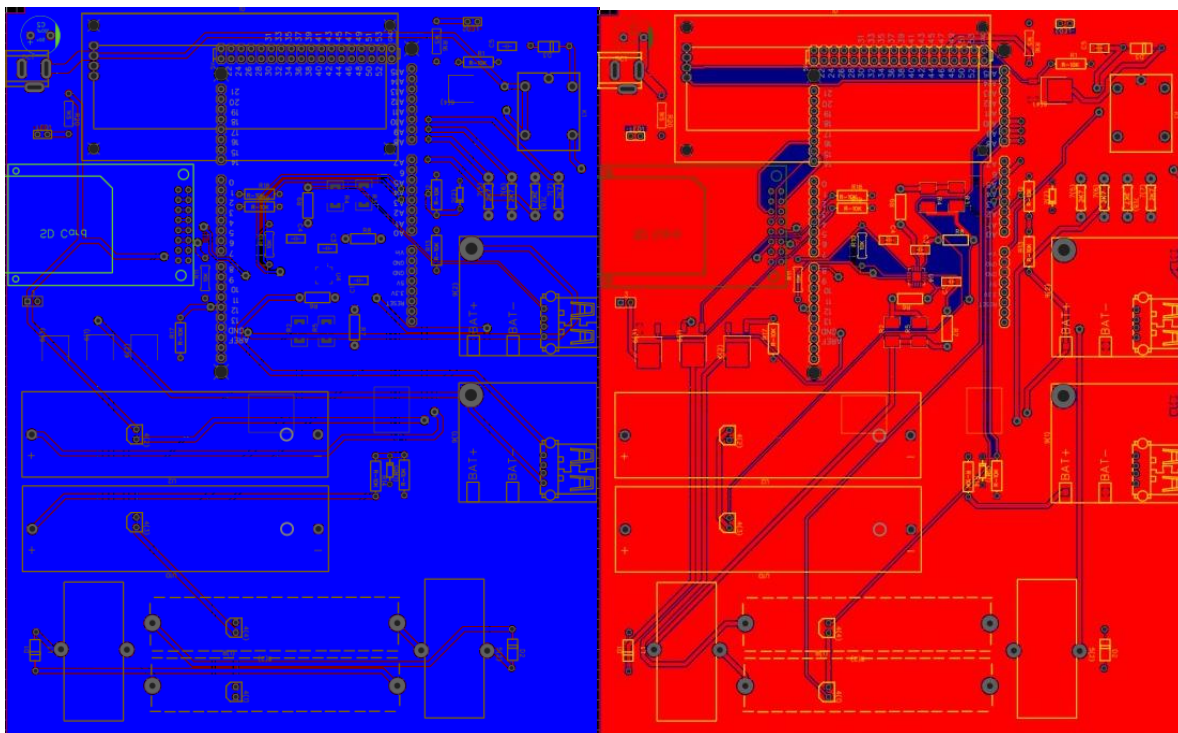
Prvým krokom k zostaveniu zariadenia bolo navrhnuť a vyrobiť dosku plošných spojov, na ktorej sú pripájkované ostatné diely. Návrh finálneho DPS bol realizovaný pomocou programu EasyEDA. DPS má rozmery 150 x 185 mm a ako materiál bol použitý 2 stranný fotocuprextit o hrúbke 1,5 mm.



Obr. 3.1 - 2 stranný fotocuprextit sa používa ako základ pre výrobu DPS [20]



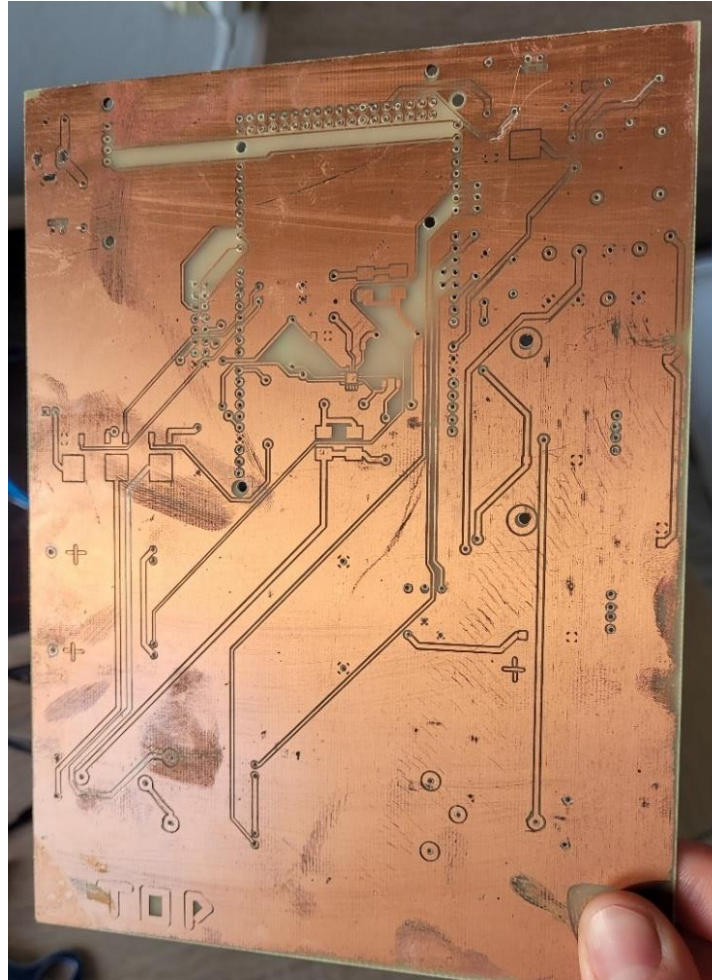
Medzi 60 komponentami je navrhnutých 42 ciest, s ohľadom na zmontovateľnosť a pripojenie jednotlivých komponentov. Šírka ciest sa pohybuje v rozmedzí 0,3 mm až 2 mm v závislosti od potrebného miesta, rozloženia komponentov a požadovaného výkonu.



Obr. 3.2 - Predbežná podoba DPS v programe EasyEDA. Spodná strana (vľavo) a vrchná strana (vpravo)

Doska bola vyhotovená ručne v školskom laboratóriu metódou leptania. Najprv sa na priehľadnú fóliu vytlačí čierna maska, ktorá ochráni fotovrstvu pred UV žiarením v mieste, kde sa nachádzajú cesty. Pri výrobe obojstranných DPS sa fotocuprextit vloží do kapsy vytvorenej z fólii a nechá sa osvietiť UV svetlom po dobu 5 minút z každej strany. Aby sa fólia neposunula voči fotocuprextitu, bola použitá vákuová pumpa. UV svetlo naruší fotocitlivú vrstvu, ktorá sa následným ponorením do roztoku hydroxidu sodného odleptá a odkryje čistú meď. Tento proces trvá asi 5 minút. Následne je doska ponorená do roztoku chloridu železitého, ktorý za približne 30-45 minút rozleptá nechránené miesta a meď sa z nich odleptá. Pri tomto kroku je dôležité, aby doska nezostala v roztoku príliš dlho, pretože môže dôjsť k poškodeniu medi aj pod ochrannou vrstvou a následnému prerušeniu niektorých trás.

Táto metóda sa v dnešnej dobe v priemysle už nepoužíva, bola nahradená suchou cestou bez nutnosti leptania a vytvárania chemického odpadu. Avšak, na kusovú výrobu jednoduchých DPS, ako tomu bolo v tomto prípade, je stále vyhovujúca.

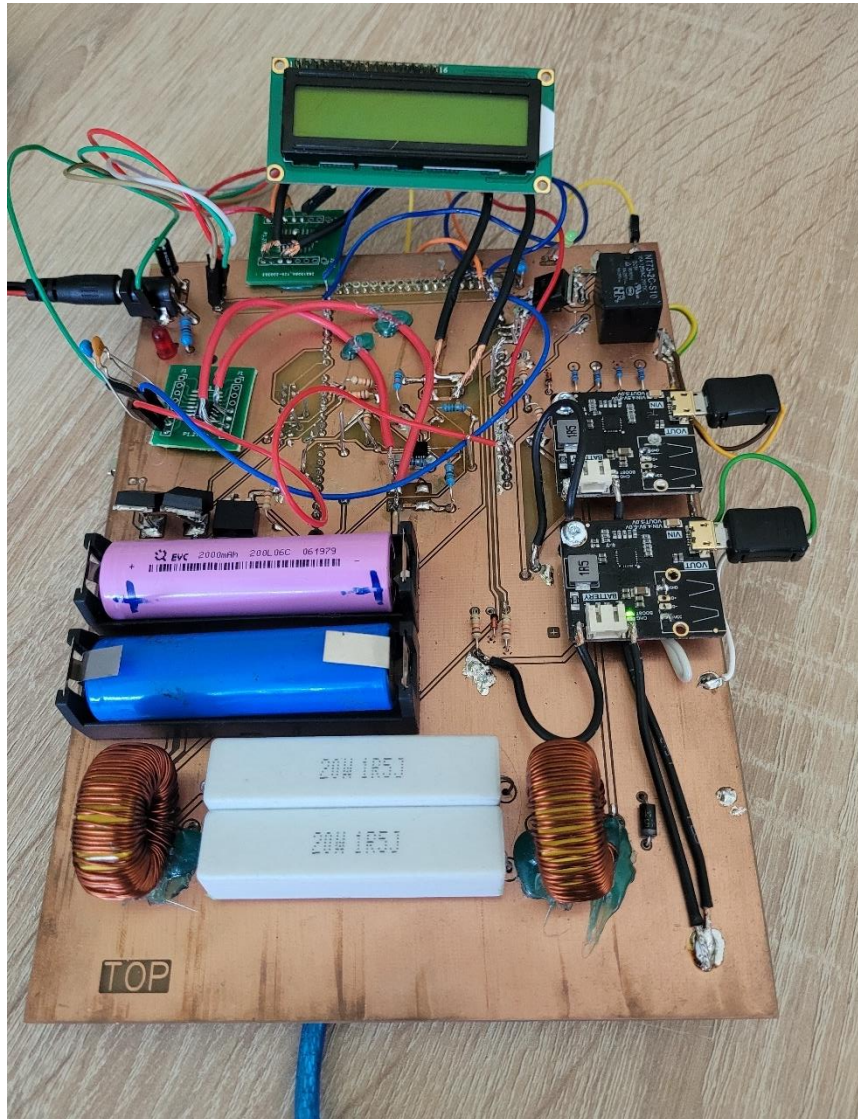


Obr. 3.3 - DPS po vyleptaní a vyvrtaní dier

Na obrázku je možno vidieť nedokonalé okraje a rôzne fláky. Rozleptané okraje sú spôsobené podleptaním ochrannej vrstvy, ktorá na boku dosky chýba. Nerovnomerne vyleptané fláky vznikli v mieste kde sa doska držala holou rukou. Mastnota a pot spôsobili jemné narušenie ochrannej vrstvy a to spôsobilo nerovnomerné odleptanie. Po očistení boli trasy na DPS skontrolované pomocou multimetra.

Nasledovalo osadenie dosky komponentami. Spájkovanie je spôsob spájania súčastí pájkou s nižšou teplotou tavenia ako spájané súčastí, ktoré sa pri spájkovaní neroztavia. Spájkovanie THT komponentov sa vykonávalo ručne pomocou hrotovej pájkovačky a následne SMD komponentov teplotovzdušnou pájkovačkou (tzv. Hot air).

K doske bol pripájkovaný modul SD karty, shield pre Arduino Mega, rezistory, cievky, relé, ostatné moduly a kondenzátory, ktoré sú v DC obvode použité ako filtre na odstránenie šumu. Po osadení bolo nutné skontrolovať kvalitu spojov na DPS a odstrániť vzniknuté skraty alebo studené spojenia.



Obr. 3.4 - DPS po osadení všetkých komponentov

### 3.2. Riadiaci kód

Programovanie Arduino pomocou ArduinoIDE je založené na jazyku C a C++. Po spustení IDE sa otvorí nový projekt so základnou šablónou, ktorú predstavujú 2 bloky “void setup()” a “void loop()”. Tieto 2 bloky musí program vždy obsahovať, aj keď sú prázdne. Pred void setup() sa píše knižnice, ktoré chceme aby sa do Arduino nahrali prostredníctvom príkazu #include<>.

V tomto prípade je potrebné zahrnúť knižnice LiquidCrystal\_I2C.h pre sériovú komunikáciu s displejom, SPI.h a SD.h pre komunikáciu s pamäťovou kartou. Ďalej sa definujú premenné a konštanty pomocou príkazov „int“, „float“, „const“.

Na prevod napätia z termistorov na teplotu bola použitá Steinhart-Hartova rovnica pre polovodiče. Koeficienty boli dopočítané podľa hodnôt z datasheetu.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3 \quad (3.1)$$

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <math.h>

```

Obr. 3.5 - knižnice použité v tomto kóde

```

const float referenceVolts = 5.0;
const int batteryPin1 = A2; // batéria 1
const int batteryPin2 = A3; // batéria 2
const int TB1 = A6; // senzor teploty batérie 1
const int TB2 = A8; // senzor teploty batérie 2
const int TR1 = A9; // senzor teploty rezistoru 1
const int TR2 = A10; // senzor teploty rezistoru 2
const int prud1 = A11; // senzor prúdu okruh 1
const int prud2 = A13; // senzor prúdu okruh 2

int V_T1, V_T2, V_T3, V_T4;
float C1, C1s, C2, C2s;
float R1 = 2700;
float logR21, logR22, logR23, logR24, R21, R22, R23, R24, T1, T2, T3, T4;
float c1 = 21.41354374e-03, c2 = -32.13095470e-04, c3 = 125.4710222e-07;
int PWM1, PWM2; // Hodnoty duty cycle pre PWM <0-255>

```

Obr. 3.6 - Definícia premenných

V bloku void setup() je nutné definovať niekoľko vecí. Na začiatok je vhodné zdefinovať si jednotlivé piny a priradiť im, či sa jedná o vstupný alebo výstupný pin pomocou príkazu „PinMode(-názov pinu-, INPUT/OUTPUT)“. Následne nastaviť sériovú komunikáciu a jej rýchlosť (bežne 9600 baudov) , komunikáciu s SD modulom, displejom a meračom prúdu pomocou príkazov „serial.begin(9600)“, „SD.begin(-pin pre CS-)“, „lcd.begin()“. Okrem toho je nutné vytvoriť súbor na SD kam sa budú zapisovať namerané údaje pomocou príkazu „File logFile = SD.open(“LOG.csv”, FILE\_WRITE).“ Posledný krok je nastavenie frekvencie PWM pinov na 62500 Hz pomocou príkazu „TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000001“. Avšak je potrebné brať do úvahy, že týmto príkazom sa prepíše základný register, vrátane časovačov, ktorý ovplyvní príkazy ako „delay()“ alebo „millis()“.

```

pinMode(51, OUTPUT); // Pin 51 - output - rele
pinMode(5, OUTPUT); // Pin 5 - output - ventilator
pinMode(13, OUTPUT); // Pin 13 - output - PWM generator
pinMode(4, OUTPUT); // Pin 4 - output - PWM generator
pinMode(47, OUTPUT); // Pin 47 - output - LED
pinMode(A2, INPUT); // Pin A2 - input - V1
pinMode(A3, INPUT); // Pin A3 - input - V2
pinMode(A6, INPUT); // Pin A6 - input - T1
pinMode(A8, INPUT); // Pin A8 - input - T2
pinMode(A9, INPUT); // Pin A9 - input - T3
pinMode(A10, INPUT); // Pin A10 - input - T4
pinMode(A11, INPUT); // Pin A11 - input - I1
pinMode(A13, INPUT); // Pin A13 - input - I2

```

Obr. 3.7 - Nastavenie pinov

Blok void loop() je nekonečná slučka, ktorá vykonáva príkazy, kým sa Arduino neodpojí od zdroja. V tomto bloku je zahrnuté meranie a zápis jednotlivých veličín, konkrétne napätie batérií, teploty batérií a rezistorov, prúd a následne z neho výpočet kapacity batérie. Piny sú ovládané príkazmi „digitalWrite(-číslo pinu-, LOW/HIGH)“, analogWrite(-číslo pinu-, <0-255>) – pre ovládanie PWM a analogRead(-číslo pinu-) pre načítanie hodnoty na analógovom vstupe. Hodnota načítaná z analógového pinu je celočíselná v rozsahu <0-255>, ktorú následne treba prepočítať na skutočnú hodnotu napätia.

Logická slučka z Obr. 2.2 je realizovaná pomocou príkazov „while()“. Ten umožňuje vytvoriť slučku v slučke void loop() a vytvoriť dva samostatné deje pre nabíjanie a vybijanie.

Kapacita batérie sa spočíta diskkrétne, ako súčet hodnôt prúdu každú sekundu. Meranie prúdu však bude prebiehať iba raz za 30 sekúnd (počítame s konštantným prúdom) a následne sa hodnota vynásobí 30. Nakoniec sa vydolí 3600, aby bol výsledok v správnych jednotkách (mAh).

Samotné vybijanie je ešte rozvetvené na tri samostatné scenáre pre prípad, že sa jedna batéria vybijie skôr ako druhá. Vtedy sa preruší prúd prechádzajúci záťažou a batéria v stave standby čaká na vybitie druhej batérie. Toto konštrukčné riešenie nie je časovo najefektívnejšie, ale dovoľuje použitie jedného relé namiesto dvoch.

```
while (V1 < 4.2 && V2 < 4.2)

digitalWrite(51, HIGH); // sets the digital pin 51 on
digitalWrite(13, LOW); // sets the digital pin 13 off
digitalWrite(4, LOW); // sets the digital pin 4 off
digitalWrite(47, HIGH); // sets the digital pin 47 on
delay(1000); // waits for a second
digitalWrite(47, LOW); // sets the digital pin 47 off
delay(1000);
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Charging..");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print((V1 - 2.5)/1.7 *100 );
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print((V2 - 2.5)/1.7 *100 );
if (T1 or T2 or T3 or T4 > 150) // podmienka IF zapne napätie k ventilatoru, ak teplota presiahne 150°C
{
digitalWrite(5, HIGH);
}
```

Obr. 3.8 - Kým obe batérie nedosahujú napätie 4.2V, tok prúdu záťažou je prerušený a nabíjací cyklus je spustený

```
while (2.5 < V2 && 2.5 < V1 )

analogWrite(13, PWM1);
analogWrite(4, PWM2); //PWM pin D4, duty cycle 15/255
digitalWrite(51, LOW);
digitalWrite(47, HIGH);
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Discharging..");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print((V1 - 2.5)/1.7 *100 );
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print((V2 - 2.5)/1.7 *100 );
if (T1 or T2 or T3 or T4 > 100)
{
digitalWrite(5, HIGH);
}
```

Obr. 3.9 - Po nabití sa aktivuje vybijacia slučka, ktorá sa vypne keď napätie v batériách klesne pod 2.49V

```
while (2.51 < V1 && V2 < 2.51 ) while (2.51 < V2 && V1 < 2.51 )
```

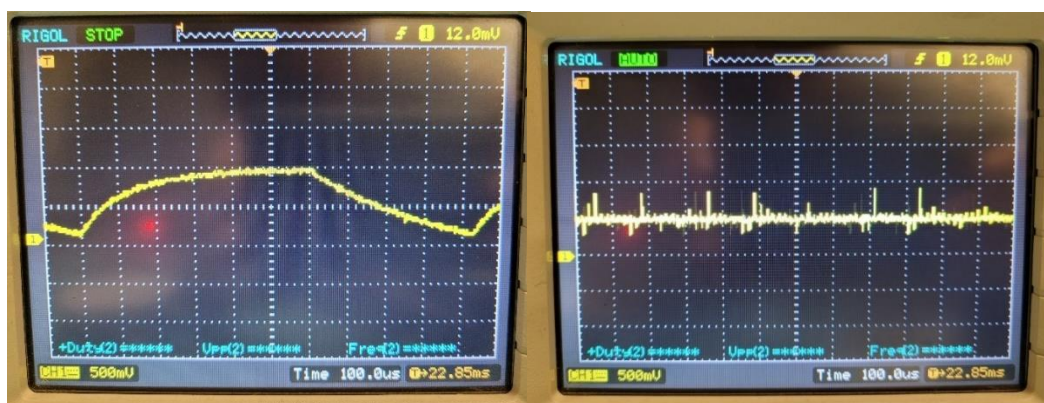
Obr. 3.10 - Súčasťou vybijacej slučky sú aj dve vnorené slučky pre prípad, že sa jedna batéria vybijie skôr ako druhá

## 4. Testovanie

### 4.1. Regulovaná záťaž

Prvým krokom bolo otestovať funkčnosť regulovanej záťaže. Jej úlohou je odoberať z batérie konštantný prúd, aby bolo možné čo najpresnejšie vypočítať kapacitu. Pri frekvencii PWM 976,56 Hz, čo je základná frekvencia pre Arduino, je zrejmé, že napätie, a tým pádom ani prúd, nie sú konštantné. Na Obr. 4.1-vľavo je z osciloskopu vidieť kolísajúcu hodnotu napätia. Tvar krivky je daný odbudzovaním a nabudzovaním cievky v obvode. Bez nej by mal výstup štvorcový priebeh. Na Obr.4.1-vpravo je frekvencia zvýšená na plánovaných 62 500 Hz. Napätie už má konštantnú hodnotu, avšak zvýšil sa šum, čo môže mať viacero príčin. Jednou z nich je pravdepodobne nízka rýchlosť diód, ktoré do istej miery prepustia napäťové špičky v opačnom smere.

Rozsah regulácie sa pohybuje od 0 A (0% duty cycle) do 1,8 A (100% duty cycle). Možnou príčinou strát v obvode môžu byť straty na MOSFETE, v dôsledku vysokej frekvencie (MOSFET je často v polotvorenom stave a disipuje sa v ňom veľa tepla), zvýšeným odporom ostatných komponentov alebo prúdovými rázmi vznikajúcimi nabíjaním a vybíjaním magnetického poľa cievky.



Obr. 4.1 - Porovnanie napätia na rezistore pri frekvencii 976.56Hz (vľavo) a 62 500 Hz (vpravo)



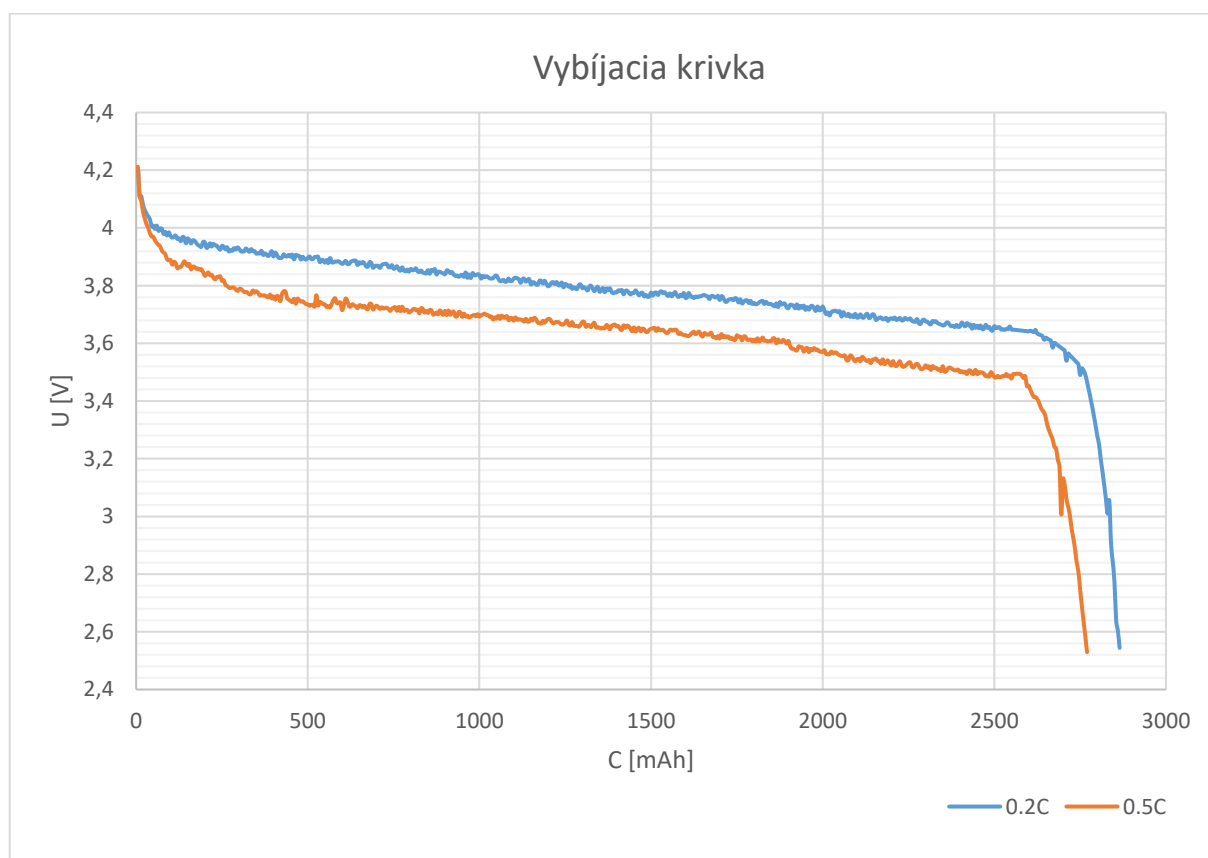
Obr. 4.2 - PWM 62 500Hz. Pri vyššom rozlíšení sú vidieť napäťové špičky vyvolané zmenou elektromagnetickej indukcie na cievke pri spínaní MOSFETu.

Nabíjací modul MP2636 disponuje funkciou ochrany batérie a pri napätí menšom ako 2,5V preruší dodávku prúdu, aby nedošlo k poškodeniu batérie. Obvykle sa batéria považuje za vybitú, keď napätie klesne pod hodnotu 3V.

Weak Battery Threshold	$V_{\text{BATT(LOW)}}$	During boosting	2.5	3.05	V
		Before Boost starts	2.9		

Obr. 4.3 - Minimálne napätie pre fungovanie režimu BOOST pri zapnutí je 2,9V [21]

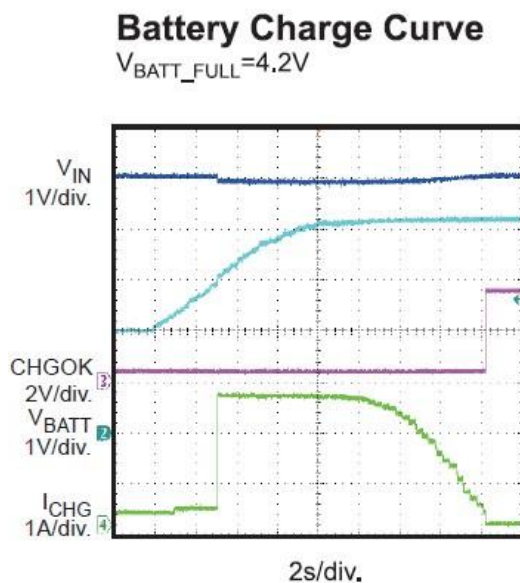
Testovaná bola batéria 18650 s menovitým napätím 3,7V a udávanou kapacitou 3000 mAh. Z kapacity vyplývajú vybíjacie prúdy 0,2C (0,2 x kapacita = 600 mA) a 0,5C (1500 mA). Pri tejto kapacite batérie, prúd 1C už presahuje limity zariadenia. Pri prúde 0,2C vybíjanie trvalo približne 5 hodín a nameraná kapacita bola 2865 mAh a pri prúde 0,5C vybíjanie trvalo menej ako 2 hodiny a nameraná kapacita bola 2770 mAh. Výsledky merania potvrdzujú, že s rastúcou záťažou klesá využiteľná kapacita batérie. Hodnoty 3000 mAh by sa podarilo dosiahnuť pri nabití na 4,35V, čo sa ale z dlhodobého hľadiska neodporúča.



Graf 3 - Priebeh napätia počas vybíjania prúdom 0,2C a 0,5C

## 4.2. Nabíjanie

Nabíjanie je plne automatické a nabíjací prúd aj napätie je regulované nabíjačkou. Nabíjací prúd nie je možné sledovať prúdovým senzorom, nakoľko ide o oddelený obvod. Nabíjanie je rozdelené na 3 časti. Kým napätie na batérii nedosiahne hodnotu 3V, je nabíjací prúd konštantný a obmedzený na 10% maximálnej hodnoty. Po prekročení 3V sa aktivuje plný nabíjací výkon, s maximálnou hodnotou prúdu 2,5 A. V poslednej časti sa batéria nenabíja konštantným prúdom ale konštantným napätím.

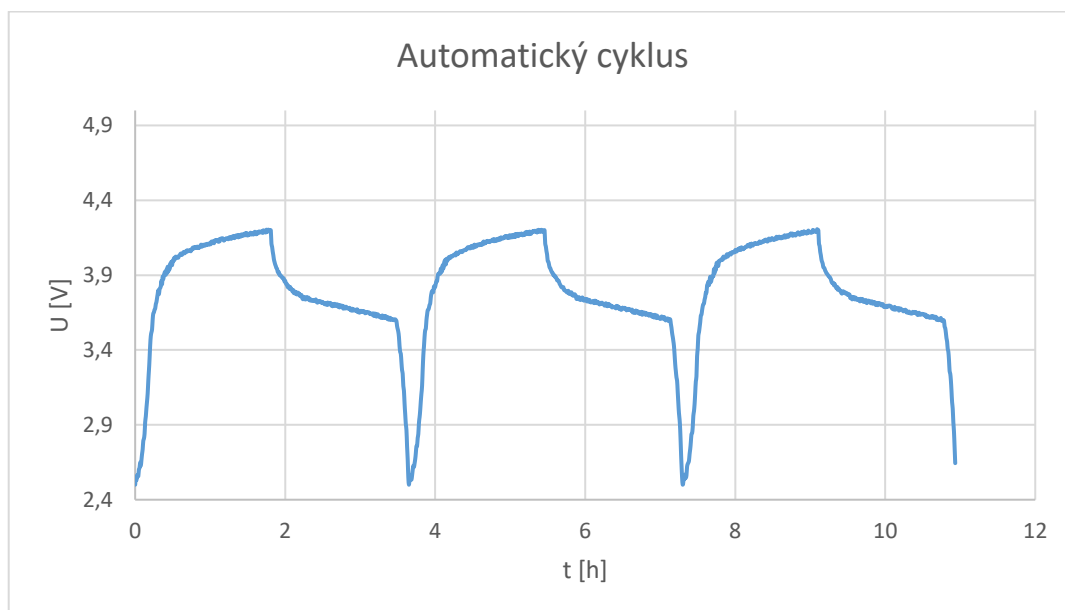


Obr. 4.4 - Nabíjacia krivka nabíjačky MP2636 [21]

### 4.3. Automatický cyklus

V automatickom cykle prebieha striedanie nabíjacej a vybíjacej fázy. Užívateľ si môže zvoliť požadovaný vybíjací prúd. Cyklus je ukončený prerušením napájania pre Arduino. Pre výpočet kapacity je potrebné vynásobiť hodnotu prúdu, celkový počet meraní v jednom cykle a uplynulý čas medzi jednotlivými vzorkami. Predpokladáme, že prúd bol konštantný. Hodnotu je následne potrebné vydeliť 3600, aby bol výsledok v mAh, čo je štandardná jednotka pre kapacitu malých akumulátorov.

$$C = \frac{I * n_m * t_p}{3600} [mAh, mA, s, 1] \quad (4.1)$$



Graf 4 - 3 cykly "nabit'-vybit'"



# Záver

Táto práca sa venovala návrhu a výrobe zariadenia pre automatické meranie charakteristík akumulátorov typu 18 650. Prvú časť predstavuje rešerš o akumulátoroch a ich fungovaní všeobecne a o technológii priemyselne používaných testovacích zariadení. Zvyšné časti sú venované návrhu a výrobe vlastného zariadenia. Po analýze požiadaviek na zariadenie boli urobené simulácie v programe LTSpice a následné zvolené komponenty s potrebnými parametrami, ktoré boli osadené na DPS vlastného návrhu a vlastnej výroby. Ako mikrokontroler bol zvolený Arduino Mega 2560. Riadiaci kód bol napísaný v programe ArduinoIDE, ktorý je založený na programovacom jazyku C a C++. Jednotlivé veličiny je možné počas testovania sledovať na sériovom monitore alebo sériovom plotteri v rozhraní ArduinoIDE. Namerané dáta obsahujú nabíjajúcu a vybíjajúcu krivku, prúd prechádzajúci záťažou a teploty tepelne zaťažovaných súčiastok.

Maximálny vybíjací výkon zariadenia bol experimentálne zistený a predstavuje hodnotu 6,5W pre jeden kanál, čo je menej ako sa očakávalo. Bolo dokázané, že zariadenie funguje aj v automatickom režime, ale pre nedostatok zozbieraných dát nebolo možné určiť počet cyklov predstavujúcich životnosť akumulátoru. Taktiež nebolo možné sprevádzkovať ukladanie dát na pamäťovú kartu, kvôli chybnému priradeniu pinov. Oprava by si vyžadovala prepracovanie návrhu DPS a opätovnú výrobu a osadzovanie. Ako náhrada bola použitá komunikácia cez USB a sériový monitor. Okrem toho bol nahradený snímač prúdu. Pôvodne sa počítalo s trojkanálovým snímačom INA3221, ktorý komunikuje prostredníctvom zbernice I2C. Počas testovania pravdepodobne došlo k poškodeniu čipu a následnej strate komunikácie. Kvôli skladovej nedostupnosti INA3221 boli ako náhrada použité 2 čipy ACS712 s analógovým napäťovým výstupom.

Maximálny nabíjací príkon (stav, keď obe nabíjačky nabíjajú batérie) predstavuje 25W. Vďaka veľkej ploche DPS a keramickému púzdru výkonových rezistorov, na krátkodobé používanie pri 80% výkone, pri vybíjaní nie je potrebné aktívne chladenie. Nad 90% výkonu, už rezistory dosahujú teploty 90°C a bolo by dobré chlaďiť ich aj aktívne.

## Návrhy na zlepšenie:

- Pre ďalšie využívanie by bolo vhodné umiestniť zariadenie do krabičky, aby nedošlo k poškodeniu, a taktiež by mohla obsahovať ventilátor alebo pasívny chladič s veľkou plochou. Krabička by taktiež mohla obsahovať ďalšie svorky alebo konektory, aby bolo zariadenie kompatibilné aj s inými typmi Li-ion alebo Li-pol batérii s rovnakým menovitým napätím (napríklad batérie mobilných telefónov)
- Voľba vhodných pinov na SPI komunikáciu s SD kartou
- Navrhnuť umiestnenie prúdových senzorov tak, aby bolo možné merať prúd aj pri nabíjaní
- Meranie napätia realizovať izolovanými svorkami, aby odpovedalo skutočnému napätiu na batérii. Súčasné riešenie neberie do úvahy úbytok napätia na svorkách, ani rozdiel potenciálov na nabíjačke a batérii
- Pri ďalších iteráciách by bolo vhodné použiť DPS s ochrannou maskou kvôli zamedzeniu vzniku nechcených skratov a pohodlnejšie osadzovanie komponentov. Taktiež pri návrhu preferovať širšie trasy a viac miesta medzi nimi, čo by zlepšilo odvod tepla a uľahčilo montáž
- Použitie dvoch nabíjajúcich relé pre skutočné nezávislé dvojkanálové meranie a úsporu času.

- Lepšie filtrovanie šumu, ktorý je pri kombinácii cievok s veľkou indukčnosťou a vysokej frekvencie PWM veľký.
- Lepšia ochrana proti náhodnému prepólovaniu (Iné zapojenie Schottkyho diódy)
- Ochrana proti náhodnému prepólovaniu batérie v držiaku

# Zoznam použitej literatúry a zdrojov

- [1] HERRMAN, John. *Why Your Gadgets' Batteries Degrade Over Time* [online]. In: . s. 1 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com/technology/gadgets/how-to/a7432/why-your-gadgets-batteries-degrade-over-time-6705747/>
- [2] ARENDÁŠ, Miroslav. *Amatérské elektronické konstrukce a zapojení*. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, 1996. ISBN 80-901342-7-0.
- [3] ARENDÁŠ, Miroslav. *Nabíječky a nabíjení*. 1. vyd. Praha: BEN/INGARA, 1995.
- [4] ALBER, Glenn. *Benefits of Battery-Capacity Testing* [online]. In: . s. 1 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.ecmweb.com/content/article/20893382/benefits-of-batterycapacity-testing>
- [5] ŠIMÍČEK, Petr. *Vývoj baterií přenosných počítačů* [online]. In: . [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2005/xsimicek.htm>
- [6] VAŠKEBA, Jaroslav. *Akumulátory* [online]. In: . 2004 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: [http://www.mo-na-ko.cz/ruzne\\_acupack.htm](http://www.mo-na-ko.cz/ruzne_acupack.htm)
- [7] PAVLIS, Jakub. *Li-Pol akumulátory - proč se nejpokročilejší technologie neprosazuje*. *Notebook.cz* [online]. 2011, 1 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://notebook.cz/clanky/technologie/2011/Li-Pol-akumulatory>
- [8] TICHÝ, Jiří. *Lithiové akumulátory Přehled základních typů a jejich vlastností*. *TZB-info* [online]. 2019, 1 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [9] *Regulovaná zátěž RZ-120 a RZ-240 - katalógový list*.
- [10] *Arduino Mega 2560 Rev3* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- [11] ACS712. In: *Allegro Microsystems* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712>
- [12] ACS712 tabulka. In: *Dratek.cz* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/40/1438011598.pdf>
- [13] ACS712 charakteristika. In: *Allegro Microsystems* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712>
- [14] *DFRobot MP2636 Power Booster & Charger Module – Li-Ion / Li-Pol nabíjecí modul* [online]. In: . [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://botland.cz/lipol-usb-micro-usb-nabijeci->

moduly/10171-dfrobot-mp2636-power-booster-charger-module-li-ion-li-pol-nabijeci-modul-6v-25a-5903351243834.html

- [15] *Čtečka SD karet* [online]. In: . [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: [https://dratek.cz/arduino/991-ctecka-sd-karet.html?gclid=EAIaIQobChMIy-SM2cua9AIVHwIGAB1qXw2REAQYASABEgLytfD\\_BwE](https://dratek.cz/arduino/991-ctecka-sd-karet.html?gclid=EAIaIQobChMIy-SM2cua9AIVHwIGAB1qXw2REAQYASABEgLytfD_BwE)
- [16] *IIC I2C Display LCD 1602 16X2 Znaků LCD Modul Modrý* [online]. In: . [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1570-iic-i2c-display-lcd-1602-16x2-znaku-lcd-modul-modry.html>
- [17] Relé cívka 5VDC, kontakt 125VAC/10A 1x přepínací NT73-2 CS10 DC5V 0,36. In: *GME* [online]. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/rele-nt73-2-cs10-dc5v-0-36>
- [18] *KTY81/210.112 NXP* [online]. In: . [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/kty81-210/prevodniky-teploty/nxp/kty81-210-112/>
- [19] Princip pulsně-širokové modulace. In: *PCTuning* [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/bastlime-s-arduinem-piseme-prvni-program?chapter=6>
- [20] Fotocuprextit 200x150x1,5mm, dvouvrstvý. In: *GME* [online]. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/fotocuprextit-fr4-200x150x1-5-dvouvrstvy>
- [21] *3.0A Single Cell Switch Mode Battery Charger with Power Path Management (PPM) and 3.0A System Boost Current* [online]. In: . s. 40 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: [https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document\\_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2636/document\\_id/1443/](https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2636/document_id/1443/)
- [22] Čip ACS712. In: *Farnell.com* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: [https://cz.farnell.com/broadcom-limited/achs-7125-500e/current-sensor-80khz-soic-8/dp/3677001?gclid=EAIaIQobChMIp9mym6WJ-AIVCbp3Ch1yjwRIEAQYBCABEgIGoPD\\_BwE&mckv=s\\_dc|pcrid|490629366904|plid|keyword|match|slid|product|3677001|pgrid|104912140262|ptaid|pla-330846360204|&CMP=KNC-GCZ-SHOPPING-Whoop-ME-31-Aug-20&gross\\_price=true](https://cz.farnell.com/broadcom-limited/achs-7125-500e/current-sensor-80khz-soic-8/dp/3677001?gclid=EAIaIQobChMIp9mym6WJ-AIVCbp3Ch1yjwRIEAQYBCABEgIGoPD_BwE&mckv=s_dc|pcrid|490629366904|plid|keyword|match|slid|product|3677001|pgrid|104912140262|ptaid|pla-330846360204|&CMP=KNC-GCZ-SHOPPING-Whoop-ME-31-Aug-20&gross_price=true)

# Zoznam obrázkov, rovníc, tabuliek a grafov

## Zoznam obrázkov

Obr. 1.1 - Model RZ-120, výkonový modul (vpravo) a RZ-240 (vľavo) + meracie moduly [9].	11
Obr. 1.2 – Štítkové hodnoty zariadení [9] .....	12
Obr. 2.1- Bloková schéma zapojenia .....	13
Obr. 2.2 – Diagram opisujúci funkčný princíp .....	14
Obr. 2.3 - čip ACS712 [22].....	15
Obr. 2.4 - Špecifikácie ACS712 [12].....	15
Obr. 2.5 - Presnosť snímača v závislosti na okolitej teplote a meranom prúde [13].....	16
Obr. 2.6 – Nabíjačka MP2636 [14].....	16
Obr. 2.7 – čítačka pamäťových kariet [15] .....	17
Obr. 2.8 – LCD Displej 16x2 znaky [16] .....	17
Obr. 2.9 - Relé modul 5V [17].....	17
Obr. 2.10 - Senzor teploty KTY81-110 [18] .....	18
Obr. 2.11 - Schéma záťaže v programe LTspice .....	18
Obr. 2.12 - princíp PWM na Arduine [19] .....	19
Obr. 2.13 – PWM pracovný cyklus 70% umožňuje tok prúdu o veľkosti 2A. Prúd v skutočnosti osciluje okolo strednej hodnoty .....	20
Obr. 2.14 - Prototyp záťaže na nepájanom poli.....	20
Obr. 2.15 - Schéma zapojenia prototypu .....	21
Obr. 2.16 - Snímok obrazovky osciloskopu. Tyrkysová – napätie PWM generátoru, oranžová – napätie v obvode, fialová – napätie prúdovej sondy (1 V odpovedá 1 A).....	22
Obr. 2.17 - Návrhový výkres zariadenia vytvorený v programe EasyEDA (pre plné rozlíšenie viz príloha 1).....	23
Obr. 3.1 - 2 stranný fotocuprextit sa používa ako základ pre výrobu DPS [20].....	24
Obr. 3.2 - Predbežná podoba DPS v programe EasyEDA. Spodná strana (vľavo) a vrchná strana (vpravo).....	25
Obr. 3.3 - DPS po vyleptaní a vyvítaní dier .....	26
Obr. 3.4 - DPS po osadení všetkých komponentov .....	27
Obr. 3.5 - knižnice použité v tomto kóde .....	28
Obr. 3.6 - Definícia premenných .....	28
Obr. 3.7 - Nastavenie pinov .....	28
Obr. 3.8 - Kým obe batérie nedosahujú napätie 4.2V, tok prúdu záťažou je prerušený a nabíjací cyklus je spustený .....	29
Obr. 3.9 - Po nabití sa aktivuje vybíjacia slučka, ktorá sa vypne keď napätie v batériách klesne pod 2.49V.....	29
Obr. 3.10 - Súčasťou vybíjacej slučky sú aj dve vnorené slučky pre prípad, že sa jedna batéria vybije skôr ako druhá.....	29
Obr. 4.1 - Porovnanie napätia na rezistore pri frekvencii 976.56Hz (vľavo) a 62 500 Hz (vpravo) .....	30
Obr. 4.2 - PWM 62 500Hz. Pri vyššom rozlíšení sú vidieť napäťové špičky vyvolané zmenou elektromagnetickej indukcie na cievke pri spínaní MOSFETu.....	30
Obr. 4.3 - Minimálne napätie pre fungovanie režimu BOOST pri zapnutí je 2,9V [21].....	31
Obr. 4.4 - Nabíjacia krivka nabíjačky MP2636 [21] .....	32

## Zoznam rovníc

(1.1).....	8
(1.2).....	9
(1.3).....	9
(2.1).....	18
(3.1).....	27
(4.1).....	32

## Zoznam tabuliek

Tab. 1.1 - Prehľad parametrov batériových článkov rôzneho chemického zloženia [5] .....	10
Tab. 1.2 - Výhody a nevýhody batériových článkov rôzneho chemického zloženia [6], [7], [8]	10
Tab. 2.1 – Zoznam súčiastok .....	24

## Zoznam grafov

Graf 1 - Závislosť strednej hodnoty prúdu $I_{str}$ na pracovnom cykle PWM. Zo simulácie vyplýva, že riadenie má v oblasti 10-100% lineárnu charakteristiku. $I_{pp}$ označuje "I peak to peak", teda odchýlku od strednej hodnoty.....	19
Graf 2 - Závislosť $I$ na pracovnom cykle PWM skutočnej záťaže. $I_{str}$ označuje strednú hodnotu prúdu. $I_{pp}$ označuje "I peak to peak", teda odchýlku od strednej hodnoty. ....	21
Graf 3 - Priebeh napätia počas vybíjania prúdom 0,2C a 0,5C .....	31
Graf 4 - 3 cykly "nabiť-vybiť" .....	32

## Zoznam použitého softvéru

1. EasyEDA
2. LTspice XVII
3. Arduino IDE

## Zoznam príloh

1. Návrhový výkres
2. Kód pre Arduino