



# FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE

## Komplexní řešení BMS systémů

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:

**Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní specializace:

**Aplikovaná elektrotechnika**

Autor:

**Jakub Benda**

Vedoucí práce:

**Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.**

Praha 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Benda** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **483866**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Komplexní řešení BMS systému**

Název bakalářské práce anglicky:

**Complex solution of BMS system**

Pokyny pro vypracování:

1. Analyzujte současný stav na trhu BMS.
2. Na základě provedené analýzy realizujte (pomocí existujících komponent, případně pomocí vlastního řešení) funkční BMS systém s dálkovým odečtem dat, vhodný pro malé systémy (12V/24V)
3. Navržené řešení realizujte a ověřte jeho parametry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review, Wen-Yeau Chang, Hindawi, 23.7.2013  
[2] Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology, Hemvathi S., Energy storage Wiley

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **10.02.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.01.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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

## **Poděkování**

Rád bych v první řadě poděkoval vedoucímu své práce panu Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za jeho ochotu a cenné rady během zpracovávání mé práce. Dále děkuji panu Pavlu Musilovi za informace o jeho balančních modulech. A nakonec moc děkuji svým rodičům za jejich plnou podporu během mých studií.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při tvorbě vysokoškolských prací.

V Praze dne: .....

.....

Jakub Benda

## **Abstrakt**

V této bakalářské práci řeším problematiku Systémů řízení baterie od jejich koncepce až po popis jednotlivých částí těchto systémů. Provedl jsem analýzu BMS, které může běžný spotřebitel zakoupit na českém trhu. Dále navrhuji vlastní řešení BMS pro použití v malém bateriovém systému, za použití čtyř článků LiFePO<sub>4</sub>. Základem mého řešení mikroprocesor ESP32 na modulu TTGO T-Display, který má možnost pracovat jako webový server a umožňuje dálkový odečet dat. Rovněž zpracovává data z připojených periférií, kterými jsou balancery BS1v4 mini, teplotní senzory DS18B20, modul s Hallovým senzorem pro měření proudu a elektrický obvod řízení bistabilního relé.

**Klíčová slova:** BMS, Systém řízení baterie, LFP baterie, ESP32, TTGO T-Display

## **Abstract**

In my bachelor thesis I address the issue of Battery Management Systems, their concepts, and the description of the individual parts of these systems. I have made an analysis of BMSs that can be purchased by a common consumer on the Czech market. Furthermore, I attempt to propose my own design of BMS for use in a small battery system containing four LifePO<sub>4</sub> cells. The basis of my solution is the ESP32 microprocessor on the TTGO T-Display module, which has the ability to work as a web server and allows remote data reading. It also processes data from the connected peripherals, which are BS1v4 mini balancers, DS18B20 temperature sensors, a Hall sensor module for current measurement and an electrical control circuit for a bistable relay.

**Keywords:** BMS, Battery Management System, LFP battery, ESP32, TTGO T-Display

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>- 1 -</b>
	<b><u>Teoretická část</u></b>	
<b>2</b>	<b>Elektrochemické zdroje .....</b>	<b>- 2 -</b>
2.1	Primární články .....	- 2 -
2.2	LiFePO <sub>4</sub> (LFP baterie).....	- 4 -
2.3	Metody nabíjení Li-ion článků.....	- 5 -
2.3.1	Constant Current – CC.....	- 5 -
2.3.2	Constant Current Constant Voltage – CCCV .....	- 5 -
<b>3</b>	<b>Systém správy baterie (BMS) .....</b>	<b>- 5 -</b>
3.1	Blokové schéma .....	- 6 -
3.2	Popis blokového schématu.....	- 6 -
3.3	Základní části BMS .....	- 7 -
<b>4</b>	<b>Základní části BMS – popis .....</b>	<b>- 7 -</b>
4.1	Balancer .....	- 7 -
4.1.1	Pasivní balancer.....	- 7 -
4.1.2	Aktivní .....	- 8 -
4.2	Měření SoC (State of Charge).....	- 9 -
4.2.1	Přímé měření .....	- 9 -
4.2.2	Záznamové metody.....	- 10 -
4.3	Výpočet SoH (State of Health).....	- 10 -
4.4	Kontrola teploty .....	- 10 -
4.4.1	Thermal runaway .....	- 11 -
4.5	Kontrola nabíjení a vybíjení.....	- 11 -
4.5.1	Příklady C-rate.....	- 12 -
4.6	Ochrana.....	- 12 -
4.7	Přednabíjecí obvod.....	- 12 -
<b>5</b>	<b>Dostupná BMS .....</b>	<b>- 13 -</b>
5.1	Integrované BMS .....	- 13 -
5.2	Vlastní sestavení baterie .....	- 15 -
5.3	Vlastní konstrukce BMS.....	- 15 -
5.3.1	Řešení č. 1 .....	- 15 -
5.3.2	Řešení č. 2 .....	- 16 -
5.3.3	Řešení č. 3 .....	- 16 -
5.3.4	Řešení č. 4 .....	- 17 -

5.4	Shrnutí analýzy.....	- 17 -
-----	----------------------	--------

### Praktická část

<b>6</b>	<b>Zadání praktické části.....</b>	<b>- 17 -</b>
<b>7</b>	<b>Popis vlastního BMS .....</b>	<b>- 18 -</b>
7.1	Popis akumulátoru.....	- 18 -
7.2	Použité moduly a součástky.....	- 18 -
7.2.1	Balancer BS1v4 mini .....	- 18 -
7.2.2	TTGO T-Display ESP32 1.14“ WiFi Bluetooth.....	- 19 -
7.2.3	Relé.....	- 20 -
7.2.4	Ovládací obvod relé.....	- 21 -
7.2.5	Senzory měření teploty .....	- 21 -
7.2.6	Modul s Hallovým senzorem.....	- 21 -
7.3	Nastavení balanceru.....	- 22 -
7.4	Dálkový odečet dat.....	- 24 -
7.5	Deska BMS.....	- 25 -
<b>8</b>	<b>Popis provozu BMS.....</b>	<b>- 25 -</b>
<b>9</b>	<b>Ověření parametrů – průběhy veličin .....</b>	<b>- 25 -</b>
9.1	Použité přístroje .....	- 25 -
9.2	Nastavení přístrojů .....	- 26 -
9.2.1	BK Precision 9205 DC Power supply.....	- 26 -
9.2.2	BK Precision 8600B .....	- 26 -
9.3	Nabíjení baterie .....	- 26 -
9.4	Nabíjení článku 1 .....	- 27 -
9.5	Vybíjení baterie.....	- 28 -
9.6	Vybíjení článku 1 .....	- 29 -
9.7	Balanční proud – oscilogram .....	- 30 -
9.8	Měření spotřeby .....	- 30 -
<b>10</b>	<b>Napájení a spotřeba .....</b>	<b>- 31 -</b>
<b>11</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>- 32 -</b>

### Přílohy

<b>12</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>13</b>	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>- 3 -</b>
<b>14</b>	<b>Seznam Tabulek.....</b>	<b>- 4 -</b>
<b>15</b>	<b>Elektrotechnická schémata .....</b>	<b>- 5 -</b>
15.1	Schéma desky.....	- 5 -
15.2	Schéma balančního modulu .....	- 6 -
<b>16</b>	<b>Pinmap ESP32 TTGO T – Display .....</b>	<b>- 7 -</b>

# 1 Úvod

Ve své závěrečné práci se zabývám zejména ochranou a měřením elektrochemických zdrojů. V posledních několika dekádách došlo k velkému pokroku v této oblasti, nové a nové kombinace materiálů dávají vzniknout dalším typům baterií, jakožto nejpobulárnějšímu způsobu uložení elektrické energie.

Jejich popularita má svůj důvod. Elektrochemické zdroje umožňují uložit elektrickou energii i ve velmi malých rozměrech. Samozřejmě takovou podmínku splňují i běžné kondenzátory, ale na rozdíl od baterií nejsou schopny uložit takové množství energie. Elektrochemické zdroje, tak našli své uplatnění ve všech odvětvích elektrotechniky, ať už se jedná o malou elektroniku, jako jsou hračky a mobilní telefony, nebo bateriová úložiště, která jsou součástí fotovoltaických elektráren.

Současná generace nejvyspělejších baterií, založených na lithiu, se vyznačuje vyšší hustotou energie než jiné typy chemií, ale současně také vyžaduje určitou péči v průběhu svého provozu, aby byl zajištěn dlouhý a bezpečný život této baterie. A to je základ toho, čemu se budu v této práci věnovat.

V teoretické části se zabývám základními poznatky o primárních a sekundárních člancích. Popisují základní metody nabíjení sekundárních článků. Dále se zabývám samotnými BMS a tím z čeho se skládají a jak pracují. Provedl jsem analýzu možných řešení BMS na českém trhu a jejich výhody a nevýhody.

V praktické části navrhuji vlastní BMS, které by splňovalo požadavky pro malý 12 V systém. A současně bylo možné odečítat data z displeje a dálkově pomocí Wifi.

# Teoretická část

## 2 Elektrochemické zdroje

Elektrochemické zdroje elektrické energie jsou dnes nejpobulárnější komerčně dostupná úložiště elektrické energie. Principem jejich funkce je přeměna chemické energie uložená v jejich materiálu na elektrinu. Toho je docíleno oxidačními a redukčními chemickými reakcemi uvnitř článku.

Častěji, než s článkem se setkáváme s termínem baterie. Baterie vznikne spojením více elektrochemických článků za účelem navýšení napětí nebo kapacity celkového zdroje.

Baterie a články lze rozdělit podle mnoha různých parametrů, například podle rozměru, podle napětí, podle chemie článků a mnoha dalších. Jedním zásadním rozdělením je rozdělení na primární a sekundární články. [1]

### 2.1 Primární články

Jedná se o typ baterie, který po vybití nelze znovu dobít. Tyto baterie se jednoduše koupí, použijí a ekologicky zlikvidují. Jejich výhodou je cena a vyšší energetická hustota než jejich akumulátorové protějšky. Nejznámějším zástupcem této kategorie jsou alkalické baterie.[2]

Charakteristiky nejčastěji používaných primárních článků a baterií ilustruje následující tabulka

Typ	Jmenovité napětí (V)	Jmenovitá kapacita (mAh)	Spodní limit napětí (V)	Jmenovité zatížení ( $\Omega$ )	Vybíjení (C-rate)
9 V	9	570	4,8	620	0,025
AAA	1,5	1 150	0,8	75	0,017
AA	1,5	2 870	0,8	75	0,007

Tabulka 1: Základní typy primárních článků



Obrázek 1: Ukázka typických alkalických AA článků (Primární články)



Sekundární články, často také akumulátory, jsou dobíjecí baterie. Nachází uplatnění zejména v přenosné elektronice a v domácí energetice. Typickým příkladem je startovací baterie v automobilech. Jsou to takzvané olověné baterie. Článek této baterie se skládá ze dvou elektrod tvořených sloučeninami olova, ponořených ve zředěné kyselině sírové. Tento typ chemie má velkou výhodu v dostupných materiálech a snadným způsobem nabíjení. Nevýhodou je nižší hustota energie, proto takové baterie mají vyšší hmotnost. Další vlastností, kterou je třeba zmínit se týká ekologie, neboť tyto baterie obsahují olovo, které může způsobit škody na životním prostředí. Na druhou stranu se dají tyto baterie relativně snadno repasovat.[3]



Obrázek 2: Ukázka olověné startovací baterie do automobilu

V dnešní době nachází stále širší uplatnění lithiové baterie. V lithiových člancích nedochází k chemickým reakcím. Respektive nedochází k chemickým reakcím za účelem uvolnění elektronů z vazeb, nicméně dochází k jiným nežádoucím reakcím. Žádoucí je transport lithných iontů z jedné elektrody na druhou, odtud je odvozen správný název Lithium-iontové baterie („Li-ion“). Lithium se používá v kombinaci s různými jinými materiály, které upravují vlastnosti baterie. Stejně tak jako u všech ostatních baterií je důležité vybrat konkrétní chemické složení pro konkrétní aplikaci. [4]

Materiály, ze kterých jsou tvořeny elektrody Li-ion baterií jsou:

Kladná elektroda – oxid nebo fosfát lithia

Záporná elektroda – grafit

Lithné ionty procházejí separátorem z jedné elektrody na druhou. Z kladné na zápornou při nabíjení a ze záporné na kladnou při vybíjení. Při tomto procesu dochází ke ztrátě elektronu, který nemůže projít separátorem a prochází vnějším elektrickým obvodem a tvoří elektrický proud. Nakonec dochází k opětovné rekombinaci na cílové elektrodě. [1]

Jedním z mnoha lithium iontových baterií je LFP, Lithium železo fosfátová baterie. Tato baterie dokáže dodat vyšší výkon a oproti ostatním li-ion článkům je tepelně stabilní. Stále je ale nutné tuto baterii jistým způsobem udržovat. Přehřetí a podvybití snižuje její životnost stejně jako ostatním lithiovým bateriím. Tomuto typu baterie se budu více věnovat v další podkapitole, protože je důležitou součástí praktické části mé práce. [5]

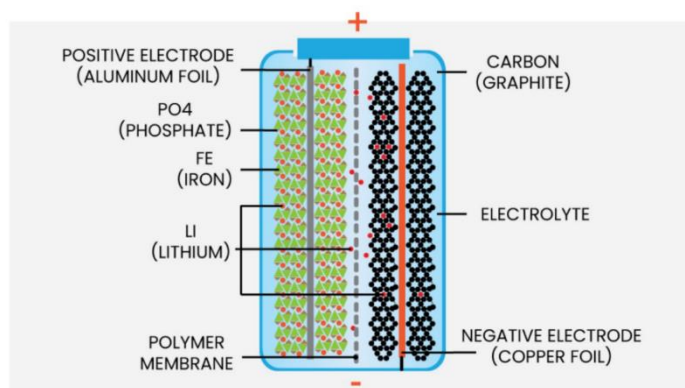
## 2.2 LiFePO<sub>4</sub> (LFP baterie)

Lithium železo fosfátové baterie je odolnější a stabilnější než ostatní typy baterií v této kategorii. Dokáží operovat ve větším rozsahu teplot, díky tomu že hodnota pro Thermal runaway je vyšší. Rovněž mají vyšší životnost a tyto materiály nejsou toxické pro životní prostředí. [9]

Elektrické vlastnosti LFP článků ilustruje následující tabulka

LiFePO <sub>4</sub>		Jednotky
Jmenovité napětí	3,4	V
Limit nabití	3,6	V
Životnost	1000 až 2000	cyklů
Provozní teplota	-30 až +60	°C
Energetická hustota	160	Wh/kg
Thermal runaway	270	°C
Bezpečnost	Velmi dobrá	-
Cena	Průměrná	-

Tabulka 2: Obecné vlastnosti LFP baterií



Obrázek 3: Ukázka složení LFP baterie [21]

A zde se dostávám k BMS. Jak jsem již několikrát zmínil, tak baterie je vhodné a v mnoha případech nutné řídit a udržovat. Nejen k zajištění provozu bezpečného pro baterii a její okolí, ale i pro co možná nejdélší životnost. Jejich životnost je omezena počtem dobíjecích cyklů. Jak baterie stárne a opotřebovává se, tak dochází k postupnému snižování její kapacity až do bodu, kdy je její životnost považována za ukončenou, více o této problematice v podkapitole State of Health.

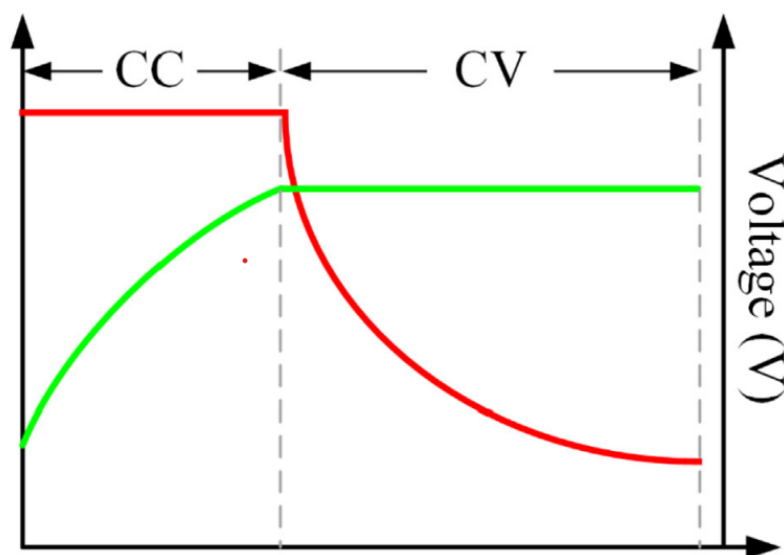
## 2.3 Metody nabíjení Li-ion článků

### 2.3.1 Constant Current – CC

Metoda konstantního proudu je o něco složitější, ve smyslu složitější nabíječky. Je třeba udržovat konstantní proud tekoucí do baterie. Napětí na baterii bude postupně růst až do maxima, kdy baterii odpojíme od nabíjení a považujeme ji za nabitou. Skutečně nabitá není, stále jí lze ještě dodat další náboj (viz metoda CCCV). Výhodou této metody je vyšší rychlost nabíjení.

### 2.3.2 Constant Current Constant Voltage – CCCV

Dokonalejší metodou je kombinace předcházející metody a metody konstantního napětí. Baterie je nabíjena zprvu konstantním proudem, její napětí roste jako u metody CC. Po dosažení maximálního napětí dojde k přepnutí do režimu konstantního napětí. Během této doby se dobije cca 15 % zbývajících kapacity. S připojeným konstantním napětím, se časový průběh proudu mění po klesající exponenciále. Až když proud klesne na hodnotu blízkou 0, případně na jinou předem nastavenou hodnotu, je třeba baterii odpojit. [15]



Obrázek 4: Teoretický průběh nabíjení metodou CCCV

## 3 Systém správy baterie (BMS)

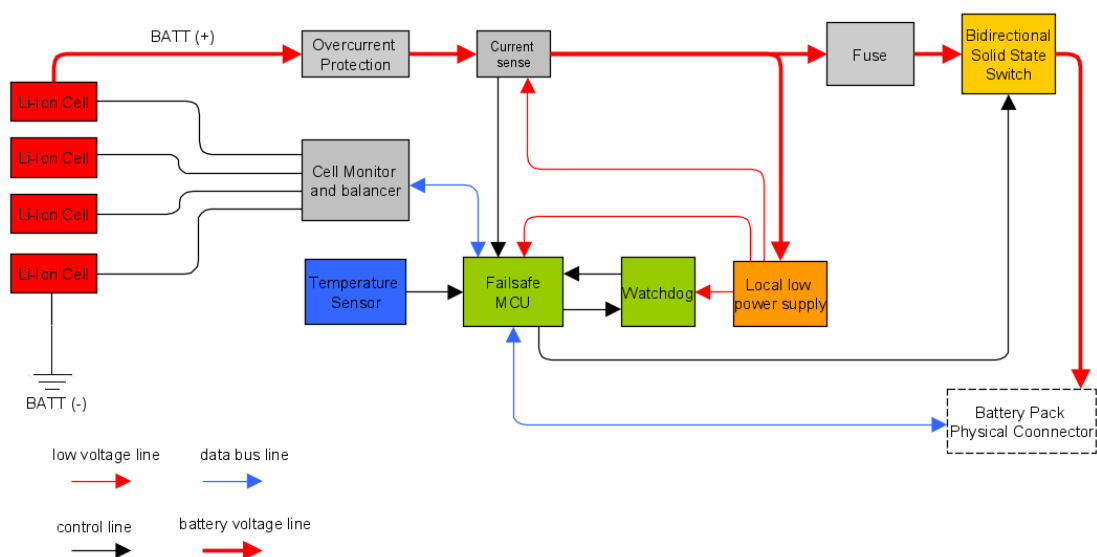
Systém správy baterie (Battery management systém, dále jen BMS) je soustava elektrických obvodů a zařízení jejichž úkolem je měřit a chránit příslušnou baterii. Tím je myšlen i vhodný provoz vzhledem k okolnímu prostředí, ochrana baterie a uživatele, monitorování stavu a odhad životnosti baterie.

Každá baterie má vzhledem ke své vnitřní chemii vlastní parametry svého bezpečného provozu. Každé BMS tak musí být konstruováno nejen na konkrétní složení baterie, ale i na její vnější konstrukci a výkon.

Ideální BMS vyhodnocuje napětí, teplotu a elektrický proud každého článku. Tyto informace zpracovává a vyhodnocuje z nich další data. Typickým příkladem je aktuální stav nabití baterie, který je udán v procentech a z pohledu uživatele se jedná o nejzásadnější údaj.[6]

### 3.1 Blokové schéma

Následující blokové schéma ilustruje princip zapojení a fungování BMS. Battery management system bych popsal jako svým způsobem modulární soustavu. To, jaké součásti budou implementovány do výsledného řešení záleží na konstruktérovi. Není přesně dáno, co ještě se považuje za BMS, jelikož každá baterie vyžaduje individuální přístup, tak to ani definovat. Nyní se ale zabývám lithiovými akumulátory, které vyžadují už poněkud složitější nelze BMS, ale více o tom v následující kapitole.



Obrázek 5: Ilustrační blokové schéma BMS pro Li-ion baterii [7]

### 3.2 Popis blokového schématu

Li-ion cell	Lithium iontový článek
Overcurrent protection	Nadproudová ochrana
Current sense	Měření proudu
Fuse	Pojistka
Cell monitor and balancer	Balancování a monitorování článků
Temperature sensor	Senzor teploty
Failsafe MCU	Nouzová řídicí jednotka
Local low power supply	Zdroj energie pro BMS
Bidirectional solid state switch	Obousměrný polovodičový spínač
Battery pack physical connector	Fyzický kontakt bateriového setu

### **3.3 Základní části BMS**

V závislosti na aplikaci a použité baterii se volí BMS takové, aby co možná nejlépe splňovalo potřeby aplikace a baterie. A současně ekonomicky dávalo smysl. Protože BMS můžou být komplexním systémem nebo jednoduchým bezpečnostním modulem. Zmíním zde několik komponent, které bývají nejčastěji používané při sestavování řídicích obvodů baterií.

- a) Balancer
- b) Měření a výpočet SoC
- c) Výpočet SoH
- d) Kontrola teploty
- e) Kontrola nabíjení a vybíjení
- f) Ochrana
- g) Přednabíjecí obvod

V ukázkovém blokovém schématu výše je řídicí jednotka jako hlavní vyhodnocovací prvek. Nicméně lze v rámci úspor přikročit i k analogovému řízení. Takové řízení nebude nikdy dosahovat takových možností jaké má digitální, ale může být finančně výhodnější. Dnes se s ním, ale prakticky nesetkáme.

Při návrhu BMS hraje důležitou roli ekonomie, cena BMS by neměla být stěžejní položkou v ceně celého technologického řešení. Ale v současné době je cena digitálních komponent poměrně nízká, proto se přikračuje spíše k mikroprocesorům a programování.[7]

## **4 Základní části BMS – popis**

### **4.1 Balancer**

Balancování je jednou z nejčastějších součástí BMS. Princip spočívá v tom, že jednotlivé články baterie nejsou dokonale identické, některé mají vyšší kapacitu jiné kapacitu nižší, to platí i pro vnitřní odpor. Pokud bychom například vybíjeli články s různým SoC (State of Charge – stav nabití, resp. náboje), pak by se nejméně nabitý článek vybil první a proud, který by jim dále procházel vlivem nabitějších článků by jej nenávratně poškodil.

V praxi se využívá dvou různých způsobů balancování, aktivní a pasivní. K úspěšnému balancování je třeba splnit první a nejdůležitější krok. Tím je proměřit a pečlivě vybrat a kategorizovat články s co možná nejvíce podobnými parametry. A z takových článků následně sestavit baterii. Bez tohoto kroku nelze úspěšně balancovat, respektive balancovat s minimálními ztrátami energie.

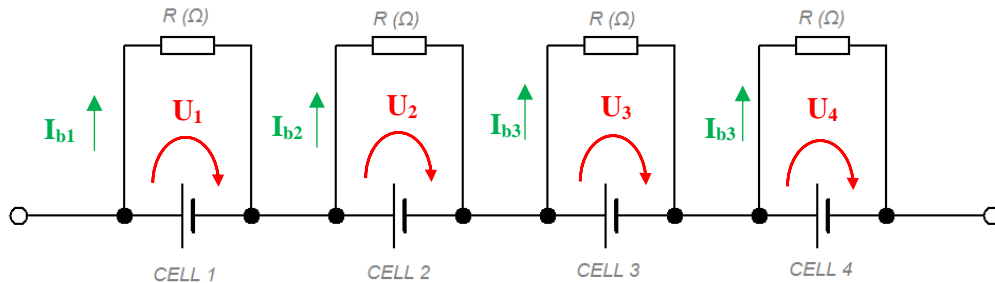
#### **4.1.1 Pasivní balancer**

Pasivní balancování se v současné době používá pro nízkoenergetické aplikace. Důvod je, že při pasivním balancování je energie článků, které jsou oproti ostatním článkům přebité, odvedena a v odporech přeměněna na teplo.

Velmi jednoduchým řešením je paralelní připojení odporu ke každému článku, kde vyrovnávací proud teče právě do odporu. Více nabitý článek bude mít větší napětí a bude vyvolávat vyšší proud svým odporem, dle Ohmova zákona

$$U = R \cdot I \quad (V; \Omega, A)$$

kde  $U$  je napětí článku,  $R$  je odpor rezistoru a  $I$  je balanční proud.



Obrázek 6: Schéma jednoduchého analogového balanceru (Překresleno)

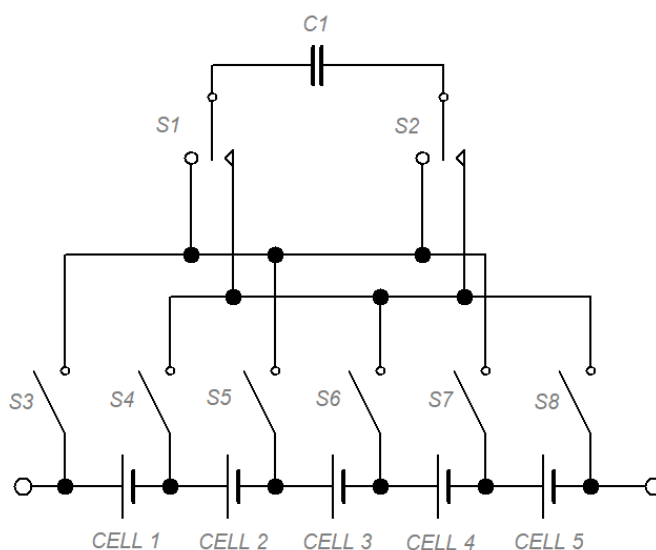
Toto řešení lze použít pro olověné a nikel-kadmiové články, vzhledem k tomu, že mají vyšší toleranci k přebíání. Další výhodou je jednoduchost a nízká pořizovací cena.

Výše představenou balanční metodu lze modifikovat přidáním spínacího prvku ke každému odporu a řídicí jednotky. Tak získáme řízený pasivní balancer. Takové řešení je daleko spolehlivější než předchozí a v dnešní době se na ceně příliš nepodepíše. S výhodou se využívá u aplikací s Li-ion bateriemi.

K balancování dochází, ze zřejmých důvodů, při nabíjení. Články jsou nabíjeny současně a pokud některý z nich svým napětím přesáhne balanční napětí tak řídicí jednotka zahájí balancování toho článku. Doba balancování trvá v závislosti na velikosti balančního proudu. V případě nevhodně navrženého balanceru se může jednat o celé dny nebo i více. [8]

#### 4.1.2 Aktivní

Aktivní balancování spočívá ve vrácení energie zpět do systému, respektive do méně nabitých článků. Vzhledem ke komplexnosti takových řešení se využívají jen u výkonových aplikací. Aktivní balancování může fungovat například na principu kapacit nebo indukčností. U aktivního balancování je nutné mít řízení jednotlivých spínačů. Na obrázku 7 je schéma aktivního balanceru s jedním kondenzátorem. Hodí se podotknout, že takové balancování je velmi pomalé.



Obrázek 7: Schéma aktivního balanceru s jedním kondenzátorem (Překresleno)

Další možností aktivního balancování jsou obvody s induktory. Ať už se jedná o cívky nebo transformátory. Balancery s cívkami dosahují rychlejšího balancování a nižších ztrát, ale jsou složitější na návrh a řízení. Ještě lepší efektivity dosahují balancery s transformátorem, ty jsou ale nejnákladnější. [8]

## 4.2 Měření SoC (State of Charge)

SoC nemá sjednocenou definici, ale nejčastěji je udáván jako poměr aktuálního stavu nabití ku jmenovité kapacitě. Jmenovitá kapacita je hodnota stanovená výrobcem. Nejčastěji se udává v procentech a lze ho definovat například vztahem

$$SoC = \frac{Q}{Q_n}$$

Kde  $Q$  je současný náboj uložený v baterii a  $Q_n$  je jmenovitý (maximální) náboj uložitelný v baterii.

Měření tohoto parametru je náročné a často nepřesné. Dále je popsáno několik vybraných metod měření SoC. [11]

### 4.2.1 Přímé měření

První kategorií metod je přímé měření. Tyto metody lze realizovat pouze u odpojených baterií, což je v řadě aplikací velká nevýhoda a pro většinu uživatelů naprosto nepřijatelné.

Mezi tyto metody patří například impedanční spektroskopie, kde se měří odezva systému pro velké množství frekvencí signálu. Výsledky jsou pak porovnávány se známými výsledky již proměřených a diagnostikovaných baterií. Tato metoda nestanoví SoC přímo, ale lze ho získat právě srovnáním výsledků. [11]

#### 4.2.2 Záznamové metody

Princip záznamových metod spočívá ve výpočtu SoC ze zaznamenaných dat průběhu elektrického proudu

Nejznámější takovou metodou je Coulombova metoda. Tato metodu stanovuje SoC pomocí integrace výstupního proudu podle času a přičtením k předchozímu stavu nabití podle rovnice

$$SoC(t) = SoC(t - 1) + \frac{\int I(t) dt}{Q_n}$$

Tato metoda je relativně jednoduchá na aplikování a lze tak měřit SoC během provozu baterie, což z ní dělá nejčastěji používanou metodu pro stanovení stavu nabití baterie. Nicméně má řadu nevýhod, například výše stanovená rovnice nepočítá s vnitřním vybíjením baterie. Vzhledem k tomu, že při výpočtu se vystupuje z minulé hodnoty, chyba způsobená vnitřním vybíjením by s časem rostla a výsledky by neodpovídali skutečnému stavu. Coulombova metoda současně nezahrnuje další vlivy působící na baterii jakou je například teplota. Proto se lze setkat s různými modifikacemi této metody v závislosti na aplikaci. [11]

#### 4.3 Výpočet SoH (State of Health)

State of Health udávané v procentech nám popisuje stav života baterie. V průběhu provozu baterie dochází k pozvolnému snižování kapacity baterie. Informaci o postupu degradace nám říká hodnota SoH. Existuje řada způsobů výpočtu SoH, nejužívanější je vzorec

$$SoH = \frac{Q}{Q_n} \cdot 100 (\%; C)$$

Kde Q je aktuální stav náboje, který je možné uložit do baterie a  $Q_n$  je jmenovitá hodnota náboje uložitelného do baterie stanovená výrobcem. Výrobce stanoví hodnotu SoH a garantuje, že tato hodnota neklesne pod tuto úroveň během daného počtu cyklů.

Alternativní metodou může být počítání cyklů. BMS měří a počítá kompletní nabíjecí a vybíjecí cykly baterie a porovná číslo s danou hodnotou od výrobce. Ze zjevných příčin tuto metodu lze aplikovat pouze pro úplně nové články, popřípadě pro články, u kterých je již znám počet uplynulých cyklů. [10]

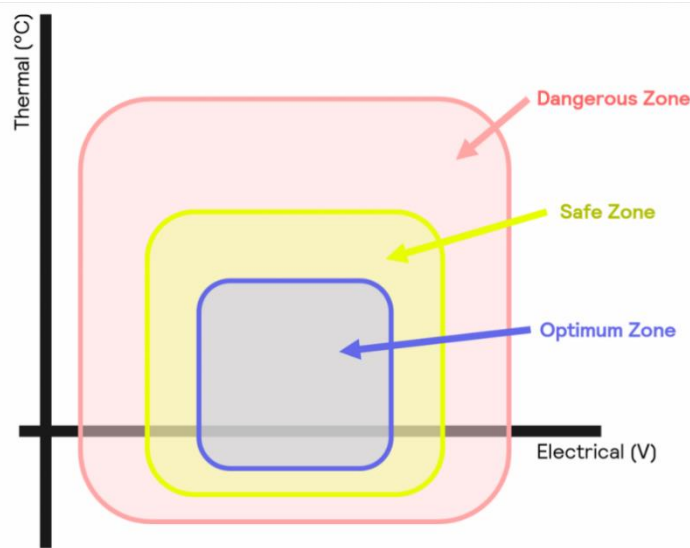
#### 4.4 Kontrola teploty

Měření teploty je důležitou součástí ochrany moderních baterií. Vysoká teplota článků má nejen za následek snížení jeho kapacity a energie, kterou je článek schopen dodat, ale současně může vést i k selhání článku nebo k požáru.

Je důležité hlídat jak teplotu článků, tak teplotu okolí. Většinu baterií nelze nabíjet bez poškození, pokud teplota okolí klesne k 0 °C.



Pokud bychom neřízeně nabíjeli baterii na vyšší napětí, než je udáno výrobcem, dostala by se do stavu, kterému se říká přebití. Pokud je baterie přebíjena, dochází k jejímu zahřívání. To může vést až k jevu, kterému se říká „Thermal runaway.“



Obrázek 8: Ilustrační ukázka bezpečné oblasti fungování baterie

#### 4.4.1 Thermal runaway

Je stav baterie, při kterém dochází k nekontrolovatelným chemickým reakcím vlivem zvýšené teploty článku. Tato reakce nadále zvyšuje teplotu baterie a způsobuje další reakce. Nakonec dojde k destrukci článku a velmi pravděpodobně i k požáru. Pokud nedojde k urychlenému zásahu zvenčí, může dojít k poškození dalších článků. Tato situace se obtížně řeší a jedná se o nejhorší scénář ke kterému může dojít. Během této řetězové reakce dochází i k uvolňování kyslíku, takže oheň nakonec živí sám sebe a je nesmírně těžké jej uhasit.[1]

Této situaci se dá částečně předejít kvalitním BMS, který nedovolí článkům se přebít a pokud by došlo ke zvýšení jejich teploty tak celý systém odpojí. Teplotu článků by bylo nejlépe možné měřit zevnitř, ale není možné zasáhnout do vnitřní konstrukce článku.

#### 4.5 Kontrola nabíjení a vybíjení

Kontrolou nabíjení a vybíjení se rozumí měření elektrického proudu dodávaného nebo přijímaného baterií. Každá baterie má výrobcem definovaný takzvaný C-rate. Jedná se o maximální dovolený vybíjecí nebo nabíjecí proud. Hodnota C je rovna kapacitě baterie udávané v Ah (ampérhodina). C-rate pak může být udán například ve tvaru 1C nebo 10C nebo 0.5C nebo C2. Číslo před C znamená hodnotu kterou musíme vynásobit kapacitu (v Ah), abychom získali maximální hodnotu proudu. Pokud je číslo za C pak se hodnota C tímto číslem dělí.

### 4.5.1 Příklady C-rate

$C = 1000 \text{ mAh}$

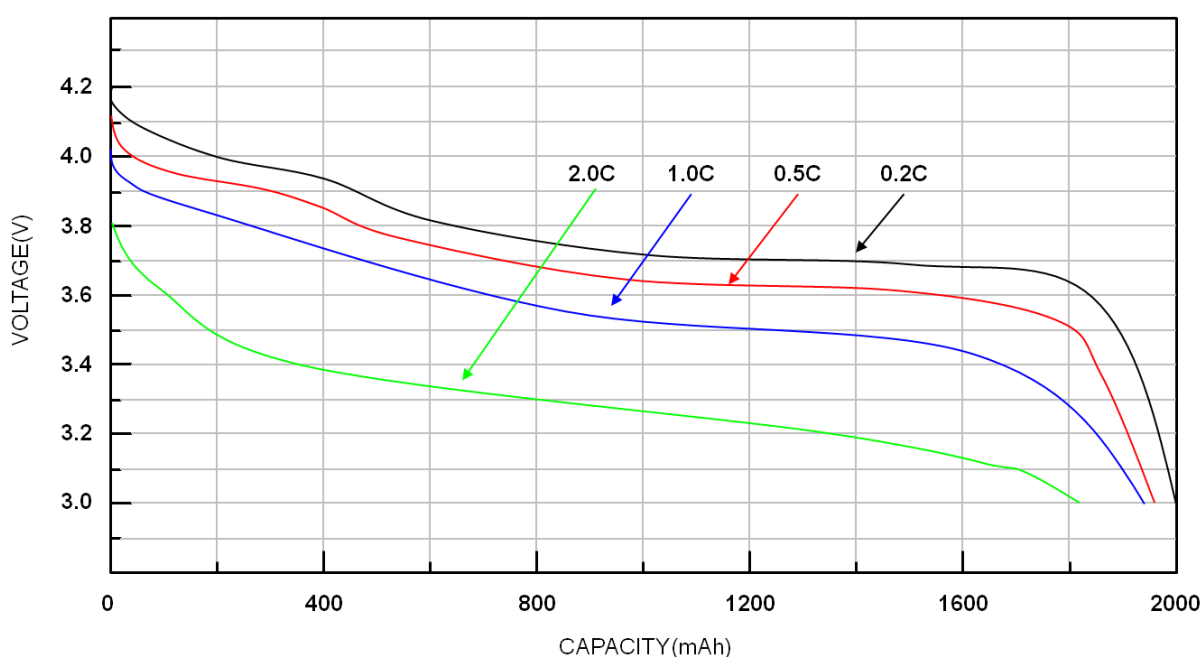
$1C = 1000 \text{ mA} = 1 \text{ A}$

$10C = 10000 \text{ mA} = 10 \text{ A}$

$0.5C = 500 \text{ mA} = 0,5 \text{ A}$

$C/2 = 500 \text{ mA} = 0,5 \text{ A}$

Měření se provádí standartními metodami na příklad pomocí měření napětí na odporovém bočníku. Následně se A/D převodníkem hodnota převede na bity a odešle do procesoru.



Obrázek 9: Příklad průběhu závislosti napětí na kapacitě při různém C-rate Li-ion článku [19]

### 4.6 Ochrana

Do této kategorie lze zařadit prvky jejichž účelem je odpojit baterii od zátěže v případě poruchy nebo pokud se některá z měřených veličin dostane do nepřipustných hodnot. Takové součástky mohou být například unipolární tranzistory, jističe a tavné pojistky.

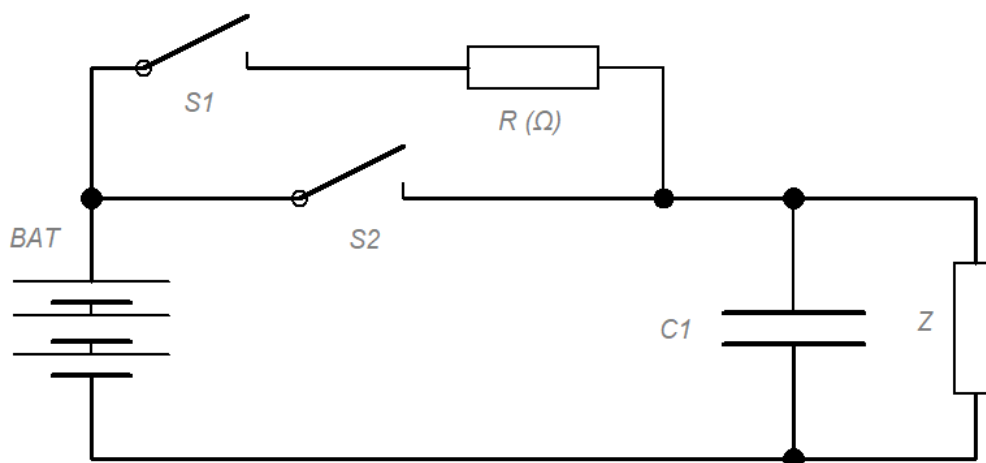
Zejména lithiové články pak mají zabudované Zařízení pro přerušení proudu (angl. Current interrupt device – CID), toto zařízení mechanicky odpojí článek, pokud dojde k vysokému vnitřnímu tlaku způsobeného uvolňováním plynů.[13]

### 4.7 Přednabíjecí obvod

V některých aplikacích dochází k tomu, že je baterie připojena na kapacitní zátěž. Například výkonový střídač má na vstupu velký kondenzátor. Proud je v takovém případě dán impedancí baterie, vedení a samotného střídače. Kondenzátor se při připojení baterie musí nejdříve nabít.

Počáteční proud kondenzátorem by mohl dosáhnout nebezpečně vysokých hodnot. To by mohlo baterii poškodit nebo i zničit.

Z tohoto důvodu může být součástí BMS i Přednabíjecí obvod (angl. Precharge circuit). Jeho účelem je snížit počáteční proud do kondenzátoru. Jeho konstrukce je velmi jednoduchá jedná se o spínač se sériovým rezistorem, který je paralelně zapojen k hlavnímu spínači baterie. Schematicky může přednabíjecí obvod vypadat takto



Obrázek 10: Schéma přednabíjecího obvodu [12]

Při startu nejdříve sepne spínač  $T_2$ , proud tekoucí do kondenzátoru je omezen rezistorem  $R$ . Když je kondenzátor nabitý, dojde k sepnutí spínače  $T_1$ , rozepnutí spínače  $T_2$  a provoz zátěže  $Z$  může být zahájen. [12]



## 5 Dostupná BMS

V následující kapitole se zaměřím na dostupnost BMS na českém trhu. Je třeba nejdříve uvést počáteční předpoklady, tedy co konkrétně v tomto případě očekáváme od BMS. Baterie, ke které hledáme BMS, je typu LFP pro systém 12 V nebo 24 V. Vyžadujeme, aby byla baterie chráněna proti nadproudu a zkratu. Dále musí být hlídána její teplota a rovněž je nutné zajistit balancování.

Jak jsem již uváděl existují dva způsoby přístupu při výběru BMS. Prvním je vybrat již předpřipravený systém managementu baterie a druhým je poskládat baterii z jednotlivých modulů. Pro řešení v rozsahu 12 V nebo 24 V jsou již na trhu k dispozici baterie se zabudovaným managementem jednotlivých článků.

### 5.1 Integrované BMS


Takových výrobků je na trhu celá řada. Standardně už mají integrovaná BMS pro kontrolu jednotlivých článků. Dále pak výrobci nabízejí další jednotky BMS pro spojení více baterií pro větší systémy.

Název	Foto	Charakteristika	Cena
Ultimatron France LiFePO baterie 12V 100Ah s BMS a Smart Bluetooth [22]	 <p>Obrázek 11: Ultimatron LiFePO4</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12,8 V</li> <li>• 100 Ah</li> <li>• 3000 cyklů (80 % SoH)</li> </ul>	16 200 Kč
Baterie LiFePO4 12,8V / 100Ah, 12850 Wh, Bluetooth smart BMS, integrovaný voltmetr, Lithium-železo-fosfátová baterie [23]	 <p>Obrázek 12: Odipie LiFePO4</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12,8 V</li> <li>• 100 Ah</li> <li>• 2000 cyklů (80 % SoH)</li> </ul>	12 299 Kč
Baterie LiFePO4 12,8V 100Ah EcoWatt [24]	 <p>Obrázek 13: EcoWatt LiFePO4</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12,8 V</li> <li>• 100 Ah</li> <li>• 3000 cyklů (80 % SoH)</li> </ul>	13 490 Kč

Tabulka 3: Vybrané LFP baterie

## 5.2 Vlastní sestavení baterie

Baterii sestavíme ze 4 sériově zapojených článků. Pro účely porovnání s výše uvedenými bateriemi, kde nelze jasně určit cenu pouze integrovaného BMS, sestavím možnou baterii a k její ceně přičtu cenu BMS.


Název	Foto	Charakteristika	Cena
ELERIX Lithium Cell LiFePO4 Prismatic 3,2 V 100Ah – 1C [25]	 <i>Obrázek 14: ELERIX Cell LiFePO4</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 3,2 V</li><li>• 100 Ah</li><li>• 3000 cyklů (80 % SoH)</li></ul>	1 328,50 Kč

Tabulka 4: LFP článek

## 5.3 Vlastní konstrukce BMS

Největší zastoupení mají na trhu mají balancery, které jsou specificky konstruované pro baterie. Další prvky jako nadproudová ochrana a ochrana proti zkratu nejsou jen doménou baterií a lze použít přístroje k tomu určené (jistice, pojistky apod.).


### 5.3.1 Řešení č. 1

Název	Účel	Foto	Charakteristiky	Cena
LiFePO4 BMS modul 3,2V 100A [26]	Ochrana a balancování	 <i>Obrázek 15: BMS modul deska</i>	Ochranný a balanční obvod pro 3 až 4 články do 100 A	199 Kč

Tabulka 5: LFP BMS modul

Jednoduchým řešením může být takováto deska, jež obsahuje ochranu proti přebití, hlubokému vybití, nadproudu a zkratu. Její součástí je i pasivní balancer schopný balančního proudu 50 mA, což je velmi malá hodnota v porovnání s nabíjecím proudem. Nabíjecí proud by v tomto případě byl omezen touto deskou na 60 A. Balancování by mohlo trvat i celé dny.

### 5.3.2 Řešení č. 2


Název	Účel	Foto	Charakteristiky	Cena
GWL/POWER Cell Balancing Module (3,60-1,7A), Screws + cables [27]	Balancování	 <p>Obrázek 16: GWL balancing module</p>	Modul pro pasivní balancování jednoho článku	135,18 Kč

Tabulka 6: Balancer pro LFP

Tento modul je určený pro použití s jedním článkem, pro naši baterii bychom potřebovali čtyři. Je schopný balančního proudu až 1,7 A. Je možné použít dva v paralelním zapojení a balanční proud zvýšit.

Nicméně neposkytuje žádnou ochranu, kromě omezené ochrany proti přebytu, kterou zajišťuje balancování.

### 5.3.3 Řešení č. 3

Název	Účel	Foto	Charakteristiky	Cena
BMS123 Smart GEN3 systém – Complete Set (4 články) s Bluetooth 4.0 [28]	Komplexní BMS	 <p>Obrázek 17: BMS123 set</p>	Set modulů	13 469 Kč

Tabulka 7: BMS123

Už vyspělým a populárním systémem je BMS123, které poskytuje komplexní správu baterie. Skládá se ze 3 typů modulů, které se instalují přímo na články. Toto řešení poskytuje všechnu nezbytnou ochranu a balancování s proudem 1 A. Také poskytuje dálkový odečet dat, který je zprostředkován bezdrátovou komunikací instalovanou na jednom z modulů. Bezdrátová komunikace je energeticky náročnější a z jednoho článku se tak spotřebovává více energie a dochází k rozbalancování článků baterie.

### 5.3.4 Řešení č. 4

Název	Účel	Foto	Charakteristiky	Cena
BMS Daly SMART 4S LiFePO4 100A common port s balancerem [29]	BMS	 <i>Obrázek 18: Daly BMS</i>	Komplexní jednotka BMS	2 605 Kč

Tabulka 8: Daly BMS

Jedná se o BMS určené pro management 4 LFP článků. Poskytuje ochranu a balancování baterie. Chci ho tady jen uvést jako dostupné řešení, ale osobně si myslím, že není vhodné. Kvůli své ceně a balančnímu proudu 35 mA. To si myslím, že je u výkonových aplikací, kde se LFP baterie používají zoufale málo.

## 5.4 Shrnutí analýzy

Vždycky je lepší volbou nechat řešení BMS na výrobci nebo prodejci baterie, takový člověk by měl nejlépe určit nejvhodnější a nejekonomičtější BMS. Z mé analýzy vyplývá, že pro malé systémy je úspornější sáhnout po levnějším modulu. Ale spíše se jedná o aplikace, které si sami sestaví elektrotechnicky znalí domácí konstruktéři. Pro sériovou výrobu a prodej je lepším řešením, aby firma, poskytující takové služby a výrobky, navrhla vlastní BMS.

Jedním z nejdokonalejších systémů na trhu je BMS123, ale u malých systémů se jeho cena může lehce stát stěžejní položkou v celkové ceně celé aplikace. Proto dává ekonomicky větší smysl jej použít až v aplikaci obsahující více baterií současně. Například při celkovém zapojení 20 a více článků, v takovém případě je cena BMS poloviční oproti ceně baterie.

# Praktická část

## 6 Zadání praktické části

Praktickým výstupem mé práce bude BMS pro 12 V baterii, složenou ze čtyř Lithium železo fosfátových článků. Očekává se, že zařízení bude schopno balancovat, měřit proud, napětí a teplotu jednotlivých článků. BMS bude rovněž schopno odpojit baterii od zátěže nebo nabíječky v případě nutnosti. Dalším požadavkem, ze zadání práce, je dálkový odečet dat. Dále možnost odečtu dat přímo ze zařízení.

Poslední požadavek, který jsem si zadal je galvanické oddělní řízení od řízení baterie. Standartně bývá řídicí jednotka BMS napájena z baterie, kterou řídí.

## **7 Popis vlastního BMS**

### **7.1 Popis akumulátoru**

Sestrojené BMS je testované na lithium železo fosfátové baterii, sestavené ze čtyř cylindrických článků HeadWay 38120S, zapojených do série. Baterie reprezentuje zdroj pro malý 12 V systém, použitelný například v obytných vozech. Základní parametry jsou uvedeny v následující tabulce. [16]

<b>HeadWay 38120S</b>		
<b>Jmenovitá kapacita</b>	10	Ah
<b>Jmenovité napětí</b>	3,2	V
<b>Maximální nabíjecí proud</b>	20	A
<b>Maximální trvalý vybíjecí proud</b>	30	A
<b>Maximální pulsní vybíjecí proud</b>	100	A
<b>Minimální hodnota napětí</b>	2,5	V
<b>Průměr</b>	38	mm
<b>Výška</b>	146	mm
<b>Váha</b>	330	G
<b>Provozní teplota nabíjení</b>	0~45	°C
<b>Provozní teplota vybíjení</b>	-20~65	°C

*Tabulka 9: Parametry použitých LFP baterií*

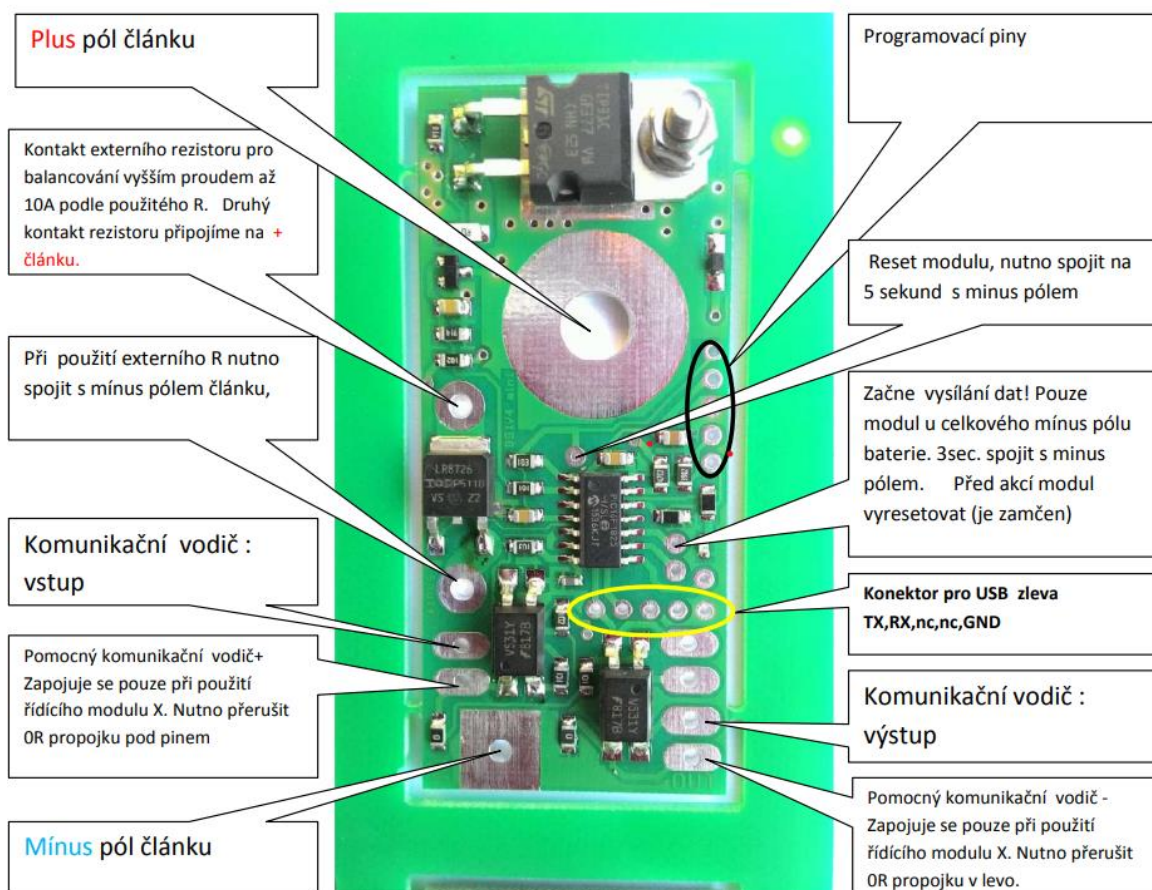
### **7.2 Použité moduly a součástky**

#### **7.2.1 Balancer BS1v4 mini**

Použita jednotka balančního modulu je Balancer BS1V4 mini 1 A od českého výrobce baterioveboxy.cz. Tato jednotka slouží k pasivnímu balancování článků Li-ion a LFP článků. Měří napětí, balanční proud a teplotu článku, ke kterému je připojen. Softwarově lze nastavit hodnotu balančního napětí, tj. hodnota napětí, při kterém modul začne balancovat.

Dále lze nastavit hodnotu balančního proudu 1 A nebo 2 A. K modulu je možnost připojit externí rezistor. V takovém případě je balanční proud dán Ohmovým zákonem, zanedbáme-li úbytek na řídicím MOSFETu. Schématický diagram naleznete v příloze. [17]





Obrázek 19: Popis balančního modulu BSIV4 mini [17]

## 7.2.2 TTGO T-Display ESP32 1.14“ WiFi Bluetooth

Jako řídicí jednotku jsem použil modul ESP32 TTGO s LCD a Wifi. Mikroprocesor přijímá data pomocí UART sériové komunikace z balančních modulů. A zpracovává data z ostatních periférií. Výsledek je zobrazen na displeji. Přesný popis pinů naleznete v příloze.

Na co je třeba pamatovat při programování a zapojování této jednotky do celého zařízení jsou omezení, která vzniknou při zapojení některých funkcí. Tento modul má dva multikanálové AD převodníky. První je připojen k pinům GPIO 32, 33, 34, 35, 36 a 39. Druhý k pinům GPIO 0, 2, 4, 12, 13, 14, 15 a 25 až 27. Přičemž ve chvíli, kdy je spuštěn modul WiFi je druhý AD převodník nepřístupný a nelze jej použít.

Další klíčovou informací je, že ne každý pin lze použít jako INPUT a OUTPUT. Konkrétní informace jsou zapsány v následující tabulce. Tabulka je napsána (a mými pokusy ověřena) tak, aby odpovídala mnou použitému modulu TTGO. Původní tabulku, ze které jsem vycházel při prvním seznamování s tímto modulem lze nalézt odkazem v literatuře uvedené u tohoto odstavce. Autor původní tabulku připravil pro jiný modul s ESP32, ale piny si odpovídají, s tím, že u mnou použitého TTGO jsou některé piny použity pro integrovaný LCD, nebo pro tlačítka (jako například GPIO 0 a 35).

GPIO	INPUT	OUTPUT	ADC 1	ADC 2
2	ANO	ANO		X
12	ANO	ANO		X
13	ANO	ANO		X
15	ANO	ANO		X
17	ANO	ANO	-	-
21	ANO	ANO	-	-
22	ANO	ANO	-	-
25	ANO	ANO		X
26	ANO	ANO		X
27	ANO	ANO		X
32	ANO	ANO	X	
33	ANO	ANO	X	
36	ANO	NE	X	
37	ANO	NE	-	-
38	ANO	NE	-	-
39	ANO	NE	X	

Tabulka 10: Popis pinů desky ESP32 TTGO T-Displej

### 7.2.3 Relé

Jedním z běžných způsobů jak BMS, v případě nouze, odpojí baterii jsou MOSFETy, unipolární tranzistory. Používají se dva v sérii, jeden spíná a rozepíná nabíjení a druhý vybíjení. V mém případě je nelze použít, jelikož jedna z podmínek je galvanické oddělení řízení a baterie.

Zvolil jsem použití bistabilního relé. Bistabilní relé sepne přivedením impulsu na kontakty cívky a sepnuté zůstane. Pokud bychom jej chtěli rozpojit je nutné přivést impuls s opačnou polaritou. Díky tomu má nižší spotřebu elektrické energie.

Zvolené relé je HFV15-L schopné rozepnout 40 A. Jmenovité napětí na cívce je 12 V, což je hodnota, kterou řídicí jednotka není schopna sama o sobě dodat. Proto si řídicí impuls přivedu z baterie.



Obrázek 20: Bistabilní relé HFV15-L

Řízení mikroprocesorem je zprostředkováno výkonovým MOSFETem, zapojeným do série jako spínač. Mezi jeho elektrody Gate a Source je připojen výstup optočlenu. Vstup optočlenu je připojen k pinu GPIO 21 mikroprocesoru a tím je zajištěno galvanické oddělení řídicí jednotky.

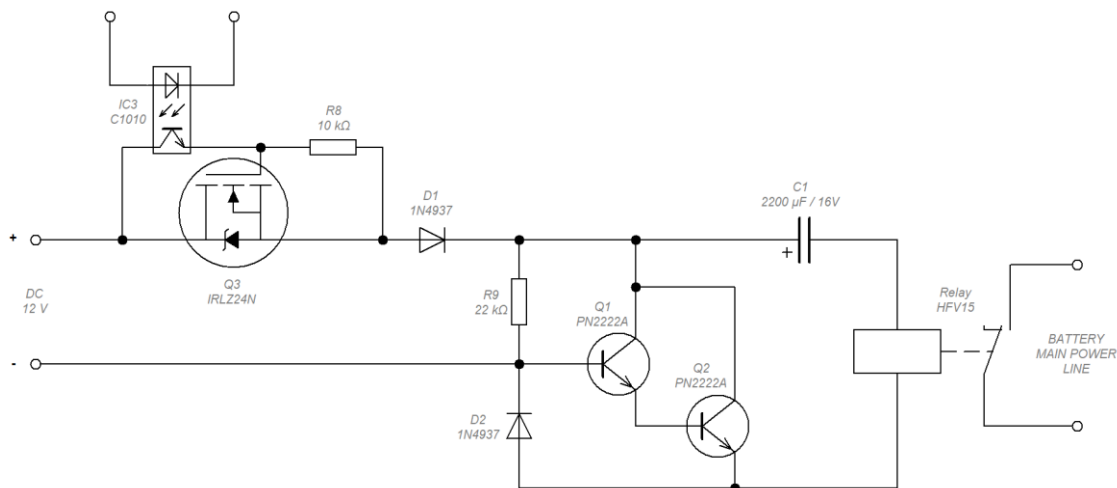
Dále je nutné vyřešit, jak bistabilní relé rozepnout, respektive jak přivést impuls na kontakty cívky v opačném směru. O tom více v podkapitole Ovládací obvod relé.

### 7.2.4 Ovládací obvod relé

Ovládací obvod relé slouží k přivedení napěťového impulsu opačné polarity, než je impuls spínací. Dojde tak vytvoření magnetického pole cívkou v opačném směru, následované přitážením kotvy relé a rozpojením řízeného obvodu.

Základní myšlenka tohoto ovládacího obvodu spočívá v sériovém připojení kondenzátoru k cívce relé. Když je k obvodu připojeno napájecí napětí, tak proudový puls protékající kondenzátorem je dostatečně velký na sepnutí relé. Současně se kondenzátor nabije a už dál proud nevede. Dochází tudíž k minimálním ztrátám způsobeným pouze odporem zařazeným mezi vstupní svorky a svodovým proudem kondenzátoru.

V momentě, kdy dojde ke ztrátě napájecího napětí, způsobeném uzavřením řídicího MOSFETu, se začne kondenzátor vybíjet přes bipolární tranzistory a cívku relé. A to způsobí puls opačné polarity, než byl ten původní a dojde k rozepnutí relé.



Obrázek 21: Schéma řídicího obvodu relé

### 7.2.5 Senzory měření teploty

Z důvodů nedostatku pinů na modulu TTGO, které mají AD převodník, jsem zvolil senzory teploty s digitálním výstupem. Čtyři senzory DS18B20, které budou měřit teplotu na tělech článků. Zapojení viz Schéma v příloze.

Každý senzor DS18B20, má z výroby nastavenou svou vlastní adresu. Adresa jednoho zařízení se skládá ze sekvence 8 bytů. Výstup senzorů je na jedné lince a procesor po této lince podává žádosti o data jednotlivě na základě adres senzorů.

### 7.2.6 Modul s Hallovým senzorem

Pro měření proudu jsem zvolil modul s Hallovým senzorem, protože se jedná o poměrně elegantní způsob, jak měřit velké proudy pomocí malého napájecího napětí a současně galvanicky oddělit řídicí jednotku.

Modul je schopný měřit stejnosměrný proud v obou směrech až do velikosti 70 A. Lze jej napájet v rozsahu 2,5 až 5,5 V stejnosměrných. Výstupem je analogový signál, který je v řídicí jednotce BMS přepočítán na proud v závislosti na napájecím napětí.



Obrázek 22: Modul s Hallovým senzorem

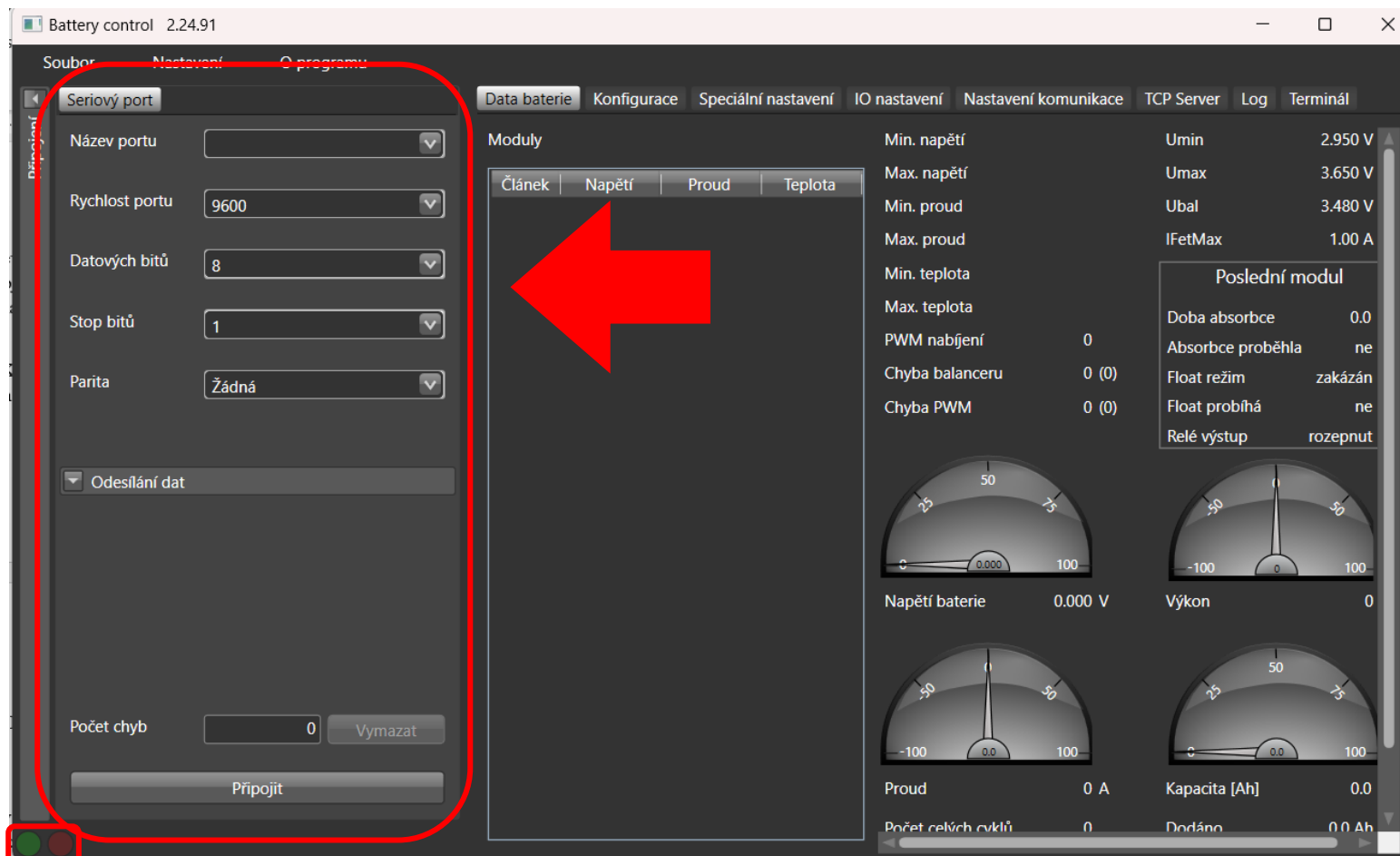
### 7.3 Nastavení balanceru

Parametry jednotlivých balančních modulů, lze nastavit pomocí počítačového programu BatteryControl 2.24.91. K propojení modulu s počítačem jsem použil USB TTL převodník, kde zapojíme pouze piny Rx, Tx a GND. Pin Rx připojíme dle popisu obrázku balanceru na pin Tx, pin převodníku Tx připojíme na Rx a GND se zemí (GND).

Dalším krokem je připojení napájení k balanceru, který připojíme k článku baterie. Nyní je třeba zahájit vysílání dat. To provedeme propojením resetovacího pinu balancer s negativním pólem článku po dobu 5 vteřin. Následuje propojení pinu pro zahájení vysílání dat s negativním pólem článku po dobu 3 vteřin. Ověřit si, že balancer skutečně začal vysílat data, můžeme pomocí LEDky na desce, která začne slabě blikat. Svítivka problikne pokaždé, když odešle data, cca s periodou 1 vteřina.

Ted, když je modul fyzicky propojen s počítačem, můžeme přejít do programu BatteryControl. V záložce Připojení nastavíme Sériový port, ke kterému je připojen převodník TTL. Vybereme v nabídce správný COM port, rychlost portu je 9600 bitů/s. Počet datových bitů je 8, Stop bitů 1 a Parita žádná.

Klikneme na tlačítko Připojit. Kontrolka v levém dolním rohu by se měla rozsvítit, pokaždé když přijme data. Zelená kontrolka znamená připojené zařízení a červená indikuje přicházející data. V záložce Data baterie se vypisují data přicházející z balanceru, tj. napětí článku, balanční proud a teplota.



Obrázek 23: Ukázka programu BatteryControl

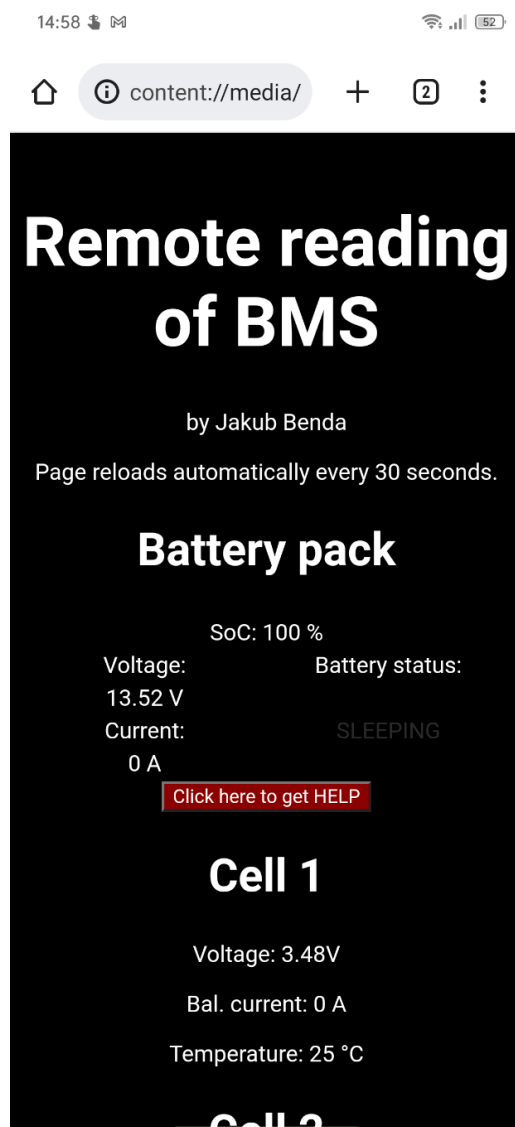
Poslední záložka, která nás bude zajímat je Konfigurace. Zde můžeme nastavit balanční napětí, při kterém bude článek balancován, když tohoto napětí dosáhne. Dalším parametrem je balanční proud, který lze nastavit v rozsahu 1 až 2 A. Poslední parametry jsou maximální a minimální napětí článku. Po změně parametrů klikneme na tlačítko odeslat a změny se nahrají do připojeného balanceru.

Program BatteryControl má i řadu dalších možností, ale jsou povětšinou spojené s řídicí jednotkou výrobcem určenou k použití s moduly BS1v4 mini.

## 7.4 Dálkový odečet dat

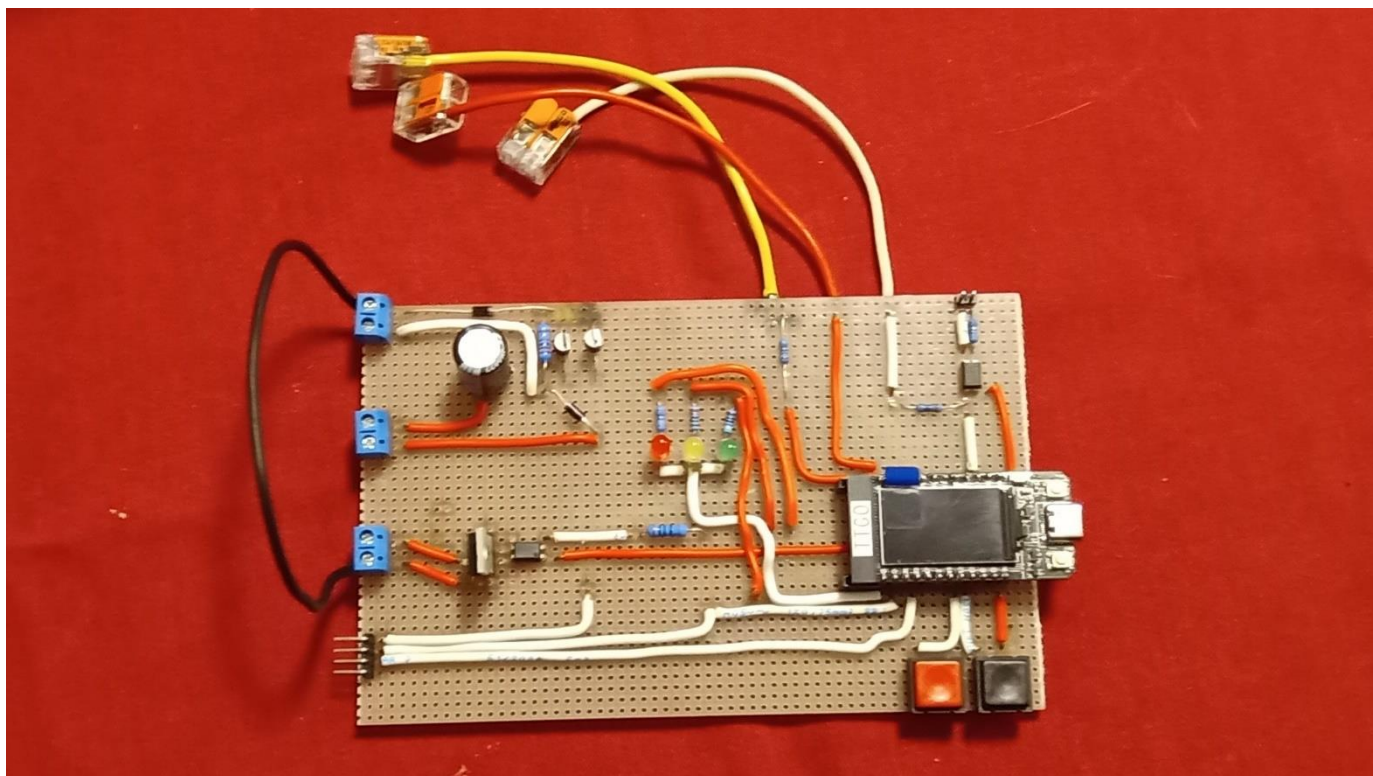
Dálkový odečet dat je zprostředkován nastavením modulu TTGO jako webový server. TTGO generuje webovou stránku se všemi informacemi o baterii. Tato webová stránka je přístupná pouze zařízením připojeným k lokální síti. Z bezpečnostních důvod není moudré připojovat řídicí jednotku přímo k internetu.

Na této stránce se v případě rozepnutí baterie lze prokliknout na další stránku, kde si lze přečíst postup, jak uvést zařízení zpět do provozu.



Obrázek 24: Ukázka webové stránky s daty BMS

## 7.5 Deska BMS



Obrázek 25: Fotografie vývojové desky s BMS

## 8 Popis provozu BMS

BMS přijímá data o napětí na článcích, o balančních proudech, o teplotách článků a o proudu baterií. Všechny relevantní informace jsou zobrazeny přímo na displeji. Informacemi na displeji lze listovat pomocí černého tlačítka. Jako hlavní stránku se považuje zobrazení o stavu celé baterie. Displej tuto stránku zobrazí automaticky po 5 vteřinách.

V případě, že dojde k nežádoucímu stavu (příliš velký proud, příliš nízké napětí článku apod.), BMS odpojí baterii od napájení/zátěže pomocí relé. Červené tlačítko slouží jako manuální ovládání relé, lze jej pomocí tohoto tlačítka sepnout i rozepnout.

Červená kontrolka signalizuje rozepnuté relé. Žlutá kontrolka signalizuje stav, kdy došlo k nežádoucímu stavu. Zelená kontrolka signalizuje provoz.

Červené LEDky na balančních modulech slabě probliknou pokaždé, když odešlou data. Jasné blikání až stále svícení signalizuje, že modul balancuje článek.

## 9 Ověření parametrů – průběhy veličin

### 9.1 Použité přístroje

- 4člávková baterie LiFePo<sub>4</sub> 12 V
- BMS založený na ESP32 TTGO T-Display
- Osciloskop Tektronix TDS 2024B
- BK Precision 9205 DC Power supply
- DC Elektronická zátěž BK Precision 8600B

## 9.2 Nastavení přístrojů

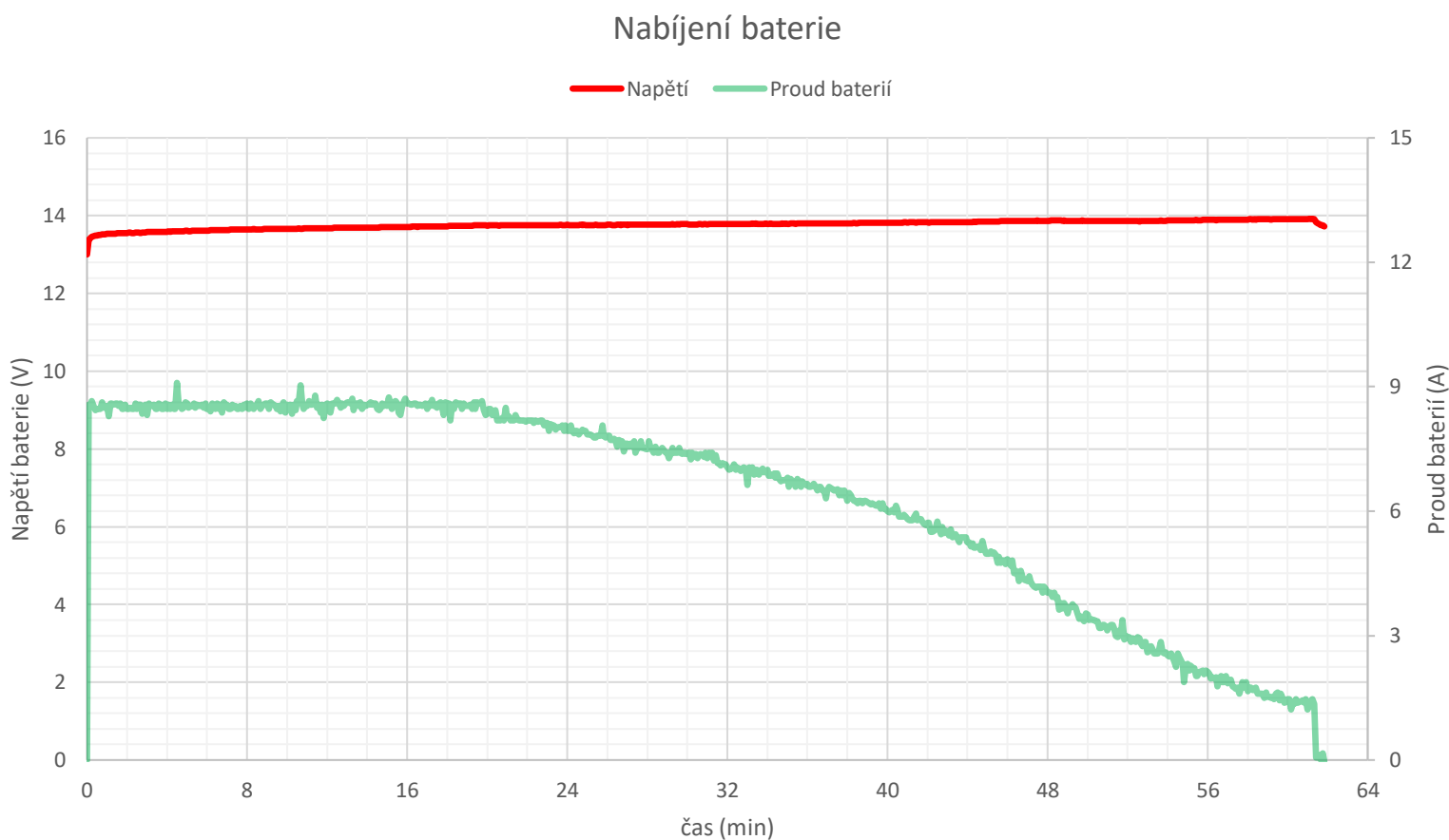
### 9.2.1 BK Precision 9205 DC Power supply

- Použitý jako nabíječka
- Constant current mode: 10 A
- Constant voltage mode: 14 V

### 9.2.2 BK Precision 8600B

- Konstantní vybíjecí proud: 10 A

## 9.3 Nabíjení baterie



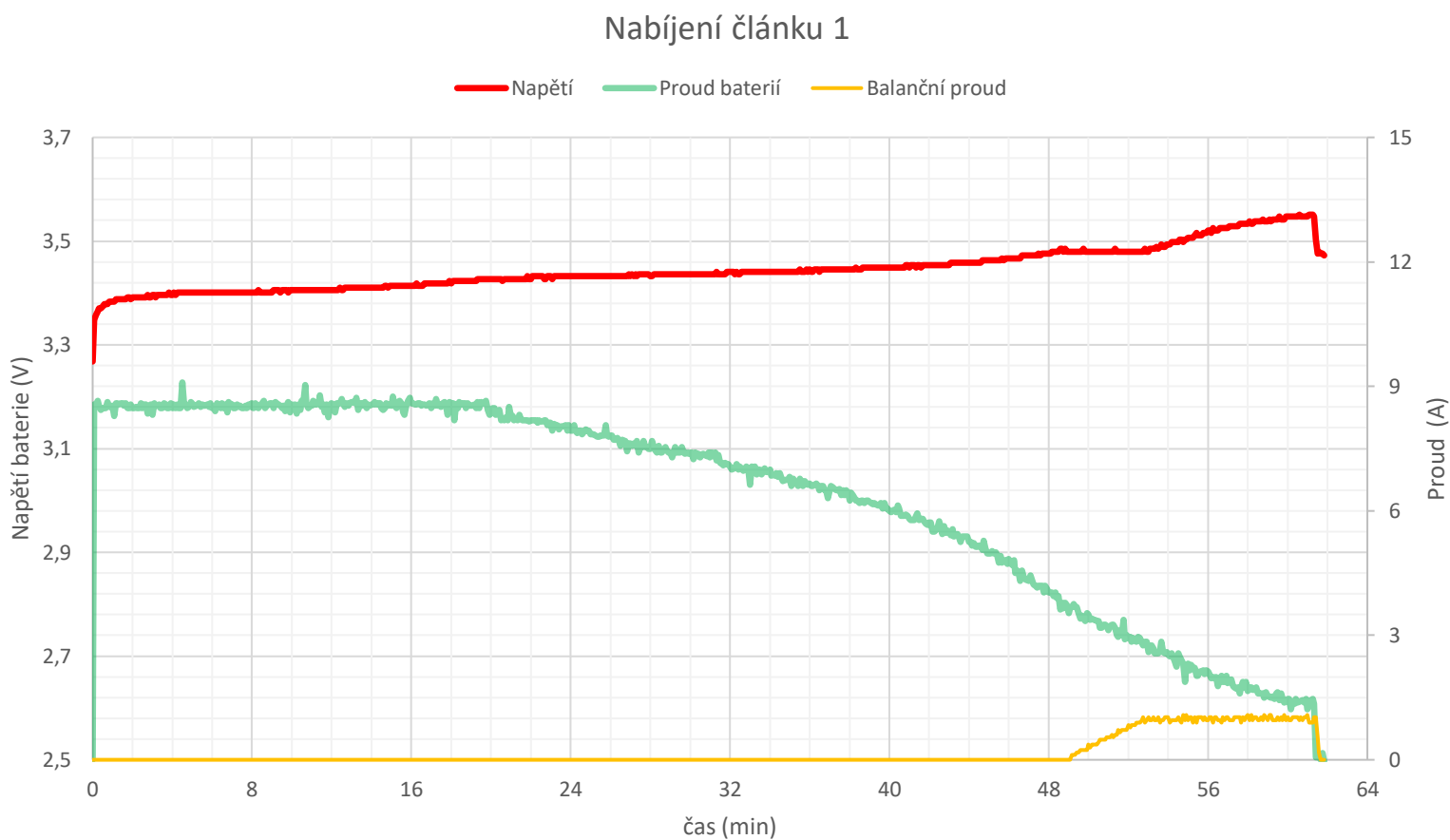
Obrázek 26: Průběh nabíjení baterie

V průběhu nabíjení baterie můžeme snadno rozpoznat nabíjení Constant Current, které zhruba ve dvacáté minutě přechází v nabíjení Constant Voltage. Pokud porovnáme naměřený průběh s teoretickým průběhem, lze si všimnout rozdílů. Zejména to, že teoretický průběh je pro jeden článek, takže rozsah napětí je odlišný, ale to lze napravit pohledem na druhý průběh.

V části Constant Voltage bychom mohli očekávat, že proud bude klesat po klesající exponenciále. Ovšem v mém měření je situace zcela jiná, neboť proud částečně přebírají balancery.

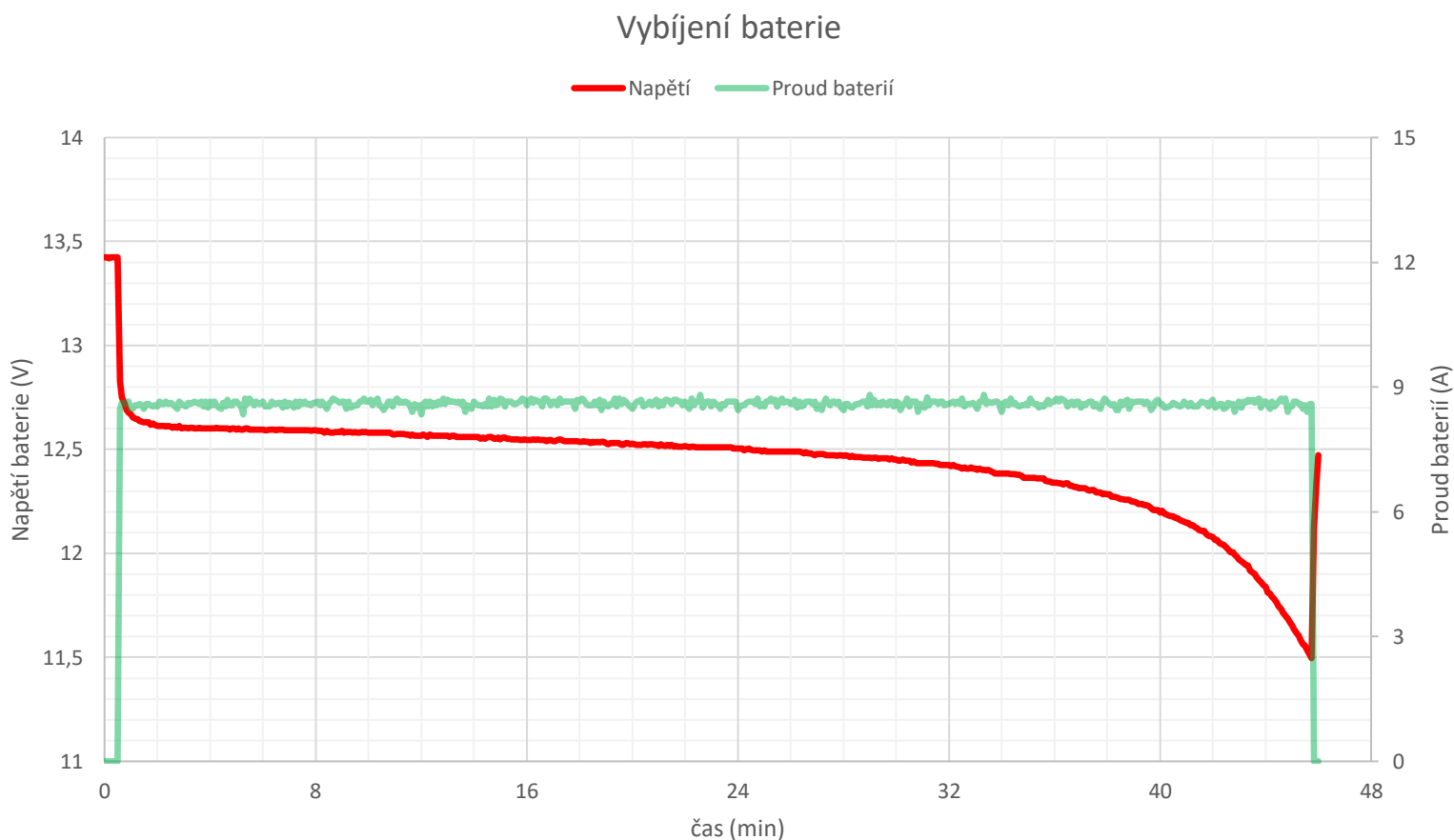


## 9.4 Nabíjení článku 1



Obrázek 27: Průběh nabíjení článku č. 1

## 9.5 Vybíjení baterie

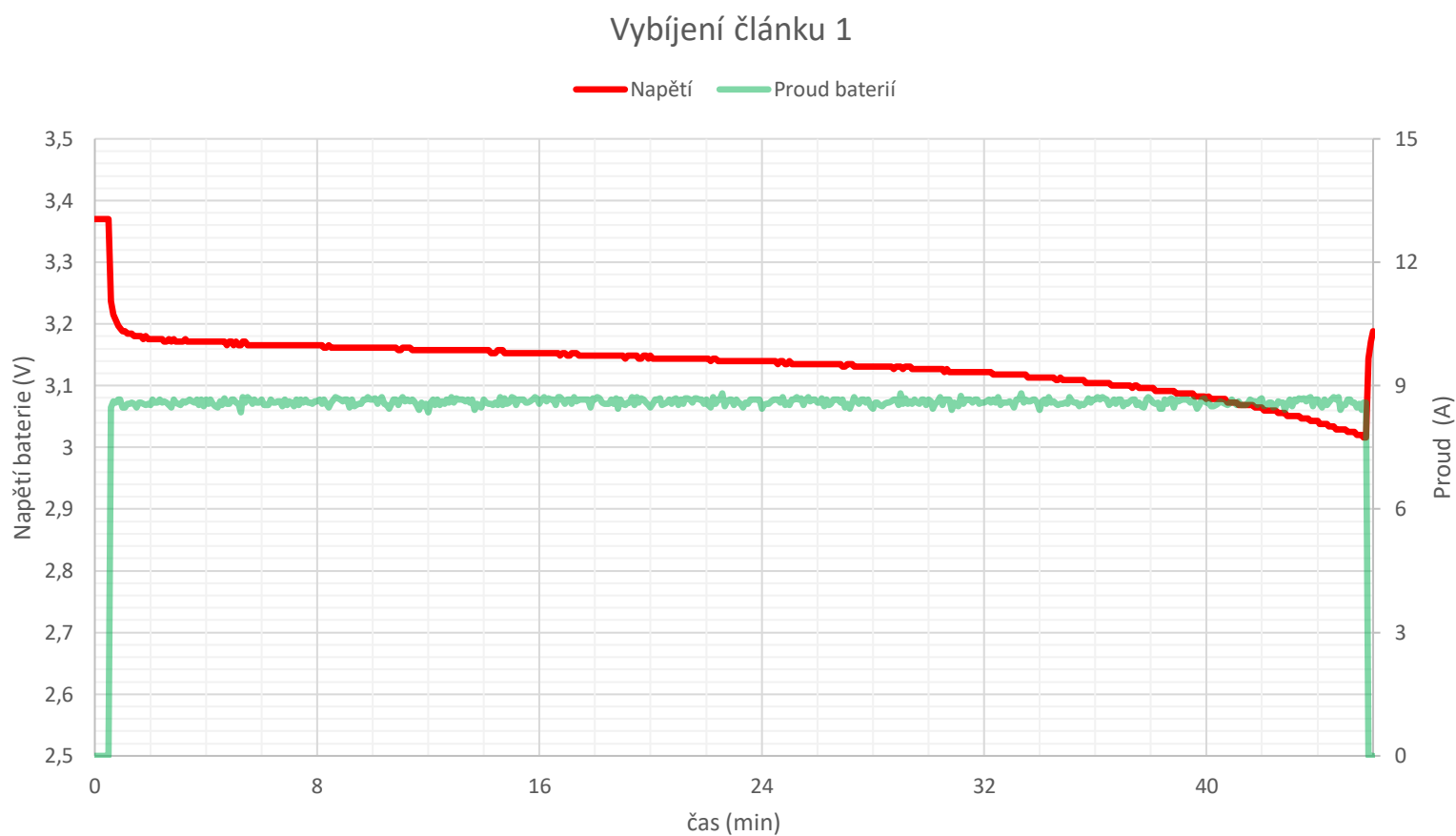


Obrázek 28: Průběh vybíjení baterie

Nejdůležitější, čeho si v tomto průběhu všimnout je hystereze napětí. Prvně vidíme pokles napětí při připojení zátěže. A znovu na konci měření, kde dojde k odpojení zátěže a navýšení napětí na hodnotu naprázdno.

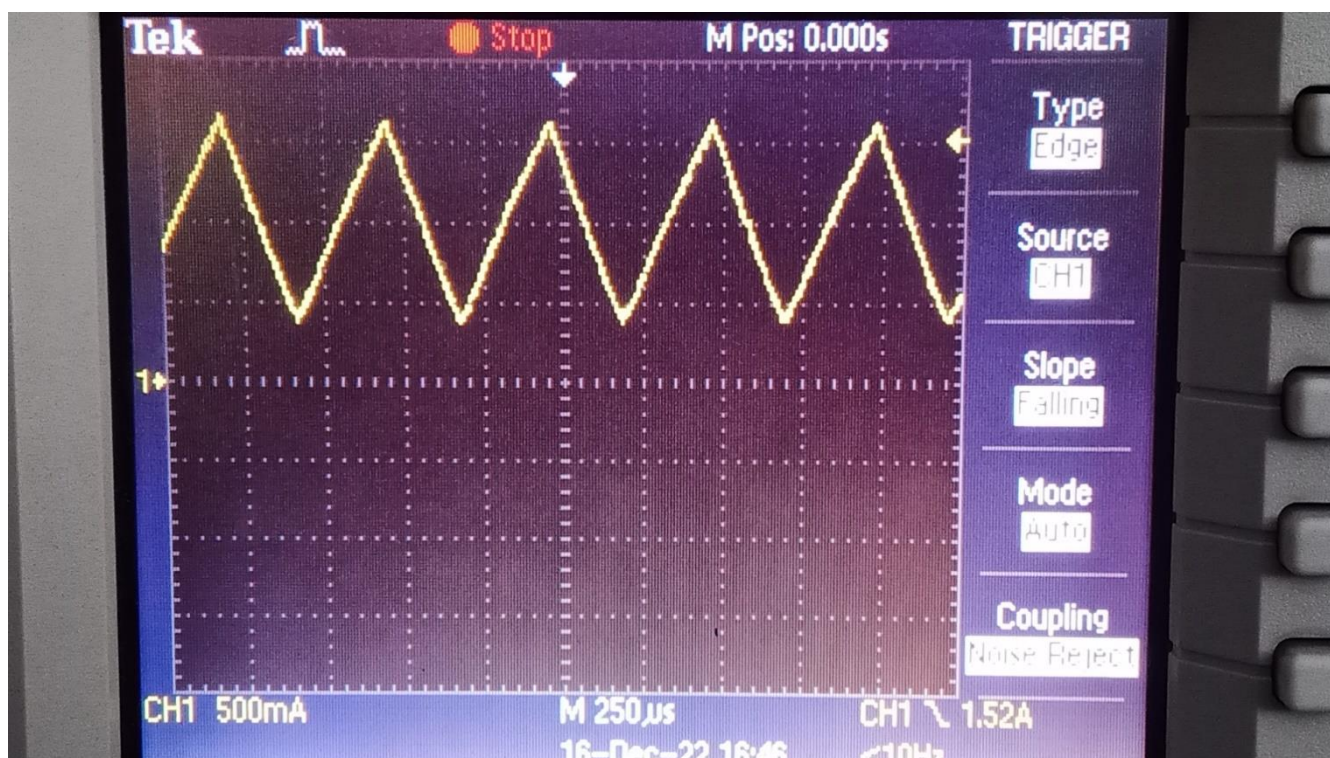
Tato vlastnost baterie dále komplikuje použití v aplikacích, kdy je vyžadováno konstantní napětí. Nebo při snaze vypočítat SoC z napětí baterie.

## 9.6 Vybíjení článku 1



Obrázek 29: Průběh vybíjení článku č. 1

## 9.7 Balanční proud – oscilogram



Obrázek 30: Oscilogram balančního proudu

Na oscilogramu je vidět průběh balančního proudu modulem. Šířka jednoho dílku je 250  $\mu$ s a výška značí 500 mA. Máme tedy trojúhelníkový průběh s periodou 0,5 ms. Proud peak to peak stanovuje osciloskop na 1,52 A, Amplituda je 1,26 A s offsetem 400 mA. Výsledkem je průměrná hodnota proud rovna 1 A.

Důvodem trojúhelníkového průběhu je snadný způsob ovládní velikosti balančního proudu. Pro zvýšení průměrného balančního proudu je nutné snížit spínací frekvenci ovládacích tranzistorů.

## 9.8 Měření spotřeby

Následující tabulka ukazuje spotřebu jednotlivých částí BMS.

Komponenta	Odběr proud při zapnutí (mA)	Odběr proud při provozu (mA)	Napájecí napětí (V)	Poznámka
TTGO (a periferie)	118,8	85,6	3,7	Relé rozepnuto
TTGO (a periferie)	118,8	93,1	3,7	Relé sepnuto
Řídící obvod relé	74	0,5	14	
Balancer	-	1,6	3,2	

Tabulka 11: Tabulka spotřeby BMS

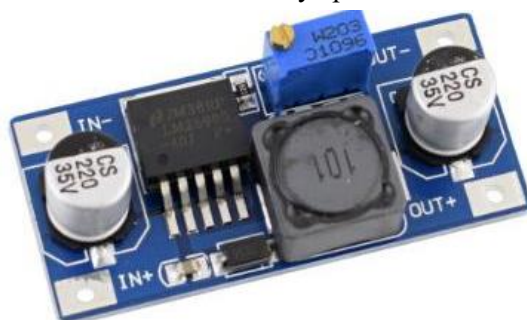
Z předcházející tabulky vyplývá, že celkový odběr BMS je 100 mA.

$$I_{BMS} = 93,1 + 0,5 + 4 \cdot 1,6 = 100 \text{ mA}$$

## **10 Napájení a spotřeba**

Navržené řešení je napájené přes počítač z elektrické sítě. Jádrem BMS je TTGO ESP32, které je možné napájet přes 5V pin nebo rozhraní USB-C nebo BAT pin. TTGO je konstruováno tak, že němu lze připojit Li-Pol články jmenovitého napětí 3,7 V.

Možnost napájení z externí baterie je nicméně značně nepraktické, neboť i tuto baterii by bylo nutné dobíjet. Optimální řešení je, z mého pohledu, napájení ze sítě a v případě výpadku napájení z baterie. Je ale nutné navrhnout vhodný způsob konverze napěťových hladin.



Obrázek 31: Modul DC/DC měnič step-down 3-40V/3A [30]

Například pomocí step-down měniče jako na obrázku 31. Dále by bylo třeba vyřešit spouštěcí mechanismus, ale k tomu lze přistoupit pomocí relé a obvodu jako v kapitole 7.2.4.

Během napájení z baterie by bylo velmi vhodné maximálně snížit spotřebu BMS. Toho lze docílit úpravou programu a uložit takřikajíc procesor ke spánku. Vypnutím displeje, který by se rozsvítil pouze, když dostane pokyn tlačítkem nebo lepším dimenzováním LED kontrolky

## 11 Závěr

V první části práce jsem se zabýval analýzou dostupných řešení BMS. Rozebíral jsem konstrukci a složení BMS. Skládají se z celé řady menších zařízení a modulů, kde středem všeho je řídicí jednotka. Různé části BMS jsou nutné pro různé typy baterií.

V praktické části jsem se snažil navrhnout vlastní řešení BMS pro 12 V baterii. Řešení založené na desce ESP32 TTGO T-Display je sice plně funkční, ale jisté výtky a návrhy pro zlepšení by se našli.

V první řadě je nutné zlepšit měření proudu. Modul s Hallovým senzorem, jakkoliv se mi zdál zprvu jako elegantní řešení, tak je velmi nepřesný při měření menších proudů (cca 10 A). Alternativou je měření napětí na odporovém bočníku, kdy by ale bylo třeba zapojit další jednotku zvlášť pro měření napětí. S tím se pojí i další zlepšení.

Druhá řídicí jednotka by byla vhodnější i z dalšího důvodu. A to, aby se rozdělilo výpočetní zatížení a zvýšila se rychlost a spolehlivost Hlavní řídicí jednotky (TTGO).

Posledním vylepšením by bylo připojení dat z BMS například k systému Home Assistant. Nejen kvůli optimalizaci spotřeby, ale i plně dálkovému odečtu dat.

Připojení modulu TTGO, přímo k internetu by bylo velké bezpečnostní riziko, ale lze k tomu využít software třetí strany, například právě Home Assistant.

Nicméně navržené BMS je funkční, ale minimálně bez výše popsaných vylepšení, bych jej nezařadil do sériové výroby.

Měření spotřeby ukázalo, že BMS odebírá proud celkový proud 100 mA. Pokud by daná baterie byla nová a měla svou jmenovitou kapacitu 10 Ah. Při zanedbání samovybití baterie by samotná BMS vybila baterii za 4 dny. Proto si myslím, že je z pohledu vyšší životnosti baterie výhodnější externí zdroj energie pro BMS. Hlavním odběratelem je v tomto případě deska TTGO, která může při používání bezdrátové komunikace (WiFi, Bluetooth) vyžadovat napájecí proud až 0,5 A.

# Přílohy

## 12 Použitá literatura

- [1] Thomas B. Reddy, Linden's Handbook of Batteries, Fourth Edition, 2011 McGraw-Hill Education, ISBN9780071624213
- [2] Battery university, 2021. BU-106: Advantages of Primary Batteries [online]. [cit. 13.11.2022]. Dostupné z: <https://www.batteryuniversity.com/>
- [3] Battery university, 2021. BU-201: How does the Lead Acid Battery Work? [online]. [cit. 13.11.2022]. Dostupné z: <https://www.batteryuniversity.com/>
- [4] Battery university, 2021. BU-204: How do Lithium Batteries Work [online]. [cit. 13.11.2022]. Dostupné z: <https://www.batteryuniversity.com/>
- [5] Battery university, 2021. BU-205: Types of Lithium-ion [online]. [cit. 13.11.2022]. Dostupné z: <https://www.batteryuniversity.com/>
- [6] Recent Advancements in Battery Management System for Li-Ion Batteries of Electric Vehicles: Future Role of Digital Twin, Cyber-Physical Systems, Battery Swapping Technology, and Nondestructive Testing, Nitika G. Panwar, Surinder Singh, Akhil Garg, Abhishek Kumar Gupta, and Liang Gao. Energy Technology, 2021. [online]. [cit. 13.11.2022] Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ente.202000984>
- [7] Enrico Sanino, 2021. Introduction to Battery Management Systems. All about circuits [online]. [cit. 13.11.2022]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/>
- [8] Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology, Hemavathi S Sugumar, Energy Storage, 2021. [online]. [cit. 13.11.2022] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/343643135\\_Overview\\_of\\_Cell\\_Balancing\\_Methods\\_for\\_Li-ion\\_Battery\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/343643135_Overview_of_Cell_Balancing_Methods_for_Li-ion_Battery_Technology)
- [9] An Overview of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles, Xiaopeng Chen, Weixiang Shen, Thanh Tu Vo, Zhenwei Cao, Ajay Kapoor, 2012. [online]. [cit. 18.12.2022] Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6523269>
- [10] Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods, Rui Xiong, Linlin Li, Jinpeng Tian, 2018. [online]. [cit. 18.12.2022] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531831111X>
- [11] The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review, Wen-Yeau Chang, Hindawi, 2013. [online]. [cit. 1.9.2022] Dostupné z: <https://downloads.hindawi.com/archive/2013/953792.pdf>
- [12] Why Pre-Charge Circuits are Necessary in High-Voltage Systems, Claire Chang, Tilden Chen, 2021. [online]. [cit. 18.12.2022] Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/an/slvafb0/slvafb0.pdf?ts=1671360355992&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.de%252F](https://www.ti.com/lit/an/slvafb0/slvafb0.pdf?ts=1671360355992&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.de%252F)
- [13] Battery university, 2021. BU-304: Why are Protection Circuits Needed? [online]. [cit. 13.11.2022]. Dostupné z: <https://www.batteryuniversity.com/>
- [14] Drátek.cz, 2022. [online] [cit. 18.12.2022] Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/2173-ochranny-modul-pro-lithiovou-baterii-1s-3.7v->

- [2.5a.html?gclid=CjwKCAiAkfucBhBBEiwAFjbr1FpKahqRwUKE7\\_QIARfKHGy6U2Do5v8a9dOpJFaPbo4evnq8JHRNhoCzY4QAvD\\_BwE](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219312605)
- [15] Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries, Qian Lin, Jun Wan, Rui Xiong, Weixiang Shen, Hongwen He, 2019. [online] [cit. 18.12.2022] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219312605>
- [16] tme.eu, Specifikac, ACCU-3.2V-10AH HEADWAY, 2022 [online] [cit. 21.12.2022] Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/accu-3.2v-10ah/akumulatory/headway/>
- [17] baterioveboxy.cz, Musil Pavel, 2022 [online] [cit. 21.12.2022] Dostupné z: <http://www.baterioveboxy.cz/domains/baterioveboxy.cz/produkt/balancer-bs1v4-mini/>
- [18] Jeff Sheppard, 2021. How to read battery discharge curves [online] [cit 15.11.2022] Dostupné z: <https://www.batterypowertips.com/how-to-read-battery-discharge-curves-faq/>
- [19] Battery charger cz, e-shop. 2022 [online, staženo] [cit 26.12.2022] Dostupné z: <https://www.bch-battery.cz/BMS123-Smart-Gen3-samostatny-clankovy-modul-d2315.htm>
- [20] Briv.cz, e-shop. 2022 [online, staženo] [cit 26.12.2022] Dostupné z: <https://www.briv.cz/p/5349/esp-wroom-32-esp32-esp-32s-2-4ghz-vyvojarska-deska-s-wifi-bt>
- [21] electrichunter.com, 2022, Renault is analyzing the LFP batteries [online] [cit. 29.12.2022] Dostupné z: <https://www.electrichunter.com/ev-news/renault-analyzing-lfp-batteries>
- [22] bch-battery.cz, e-shop, 2022, Ultimatron France LiFePO baterie 12V 100Ah s BMS a Smart Bluetooth [online] [cit. 30.12.2022] Dostupné z: <https://www.bch-battery.cz/Ultimatron-France-LiFePO-baterie-12V-100Ah-s-BMS-a-Smart-bluetooth-d3233.htm#detail-anchor-description>
- [23] needs.cz, e-shop, 2022, Baterie LiFePO4 12.8V /100Ah, 1280 Wh, bluetooth smart BMS, integrovaný voltmetr, Lithium-železo-fosfátová baterie [online] [cit. 30.12.2022] Dostupné z: [https://www.needs.cz/baterie-lifepo4-12-8v-100ah-1280-wh-bluetooth-bms-integrovaný-voltmetr-lithium-zelezo-fosfatova-baterie?gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBMrwssC6BwsZT2ZUzLuM5QFlvOxHlarcnkRkmP\\_gQ3bKluy5m-mc0aAmGjEALw\\_wcB](https://www.needs.cz/baterie-lifepo4-12-8v-100ah-1280-wh-bluetooth-bms-integrovaný-voltmetr-lithium-zelezo-fosfatova-baterie?gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBMrwssC6BwsZT2ZUzLuM5QFlvOxHlarcnkRkmP_gQ3bKluy5m-mc0aAmGjEALw_wcB)
- [24] shop.atoselektro.cz, e-shop, 2022, Baterie LiFePO4 12,8V 100Ah EcoWatt [online] [cit. 30.12.2022] Dostupné z: [https://shop.atoselektro.cz/baterie-lifepo4-12-8v-100ah-ecowatt\\_d494786.html?gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBNabycyMxwXlUxbNXOcto2JZbl77HT6yr7cA9fd3LsHaq5Zd71Zsv0aAn83EALw\\_wcB](https://shop.atoselektro.cz/baterie-lifepo4-12-8v-100ah-ecowatt_d494786.html?gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBNabycyMxwXlUxbNXOcto2JZbl77HT6yr7cA9fd3LsHaq5Zd71Zsv0aAn83EALw_wcB)
- [25] shop.gwl.eu, e-shop, 2022, ELERIX Lithium Cell LiFePO4 Prismatic 3,2V 100Ah – 1C [online] [cit. 30.12.2022] Dostupné z: <https://shop.gwl.eu/LiFePO4-cells-3-2-V/ELERIX-LIFEP04-battery-cell-Prismatic-3-2V100AH.html>
- [26] hadex.cz, e-shop, 2022, Ochranný obvod a balncér pro 4 LiFePO4 články, proud do 100A [online] [cit. 30.12.2022] Dostupné z: [https://www.hadex.cz/m4021-ochranny-obvod-a-balancer-pro-4-lifepo4-clanky-proud-do-100a/?gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBMP-2yXBC9HrFAG\\_qdv9qyLwP9j23AcimKpid3-hPlvnSLhONVvY1saAqUHEALw\\_wcB](https://www.hadex.cz/m4021-ochranny-obvod-a-balancer-pro-4-lifepo4-clanky-proud-do-100a/?gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBMP-2yXBC9HrFAG_qdv9qyLwP9j23AcimKpid3-hPlvnSLhONVvY1saAqUHEALw_wcB)
- [27] shop.gwl.eu, e-shop, 2022, GWL/POWER Cell Balancing Module (3,60V -1,7A), Screws + Cables [online] [cit. 30.12.2022] Dostupné z: <https://shop.gwl.eu/Battery-Management/Cell-Balancing-Module-3-60V-1-7A-screws-cables.html>
- [28] bch-battery.cz, e-shop, 2022, BMS123 Smart GEN3 systém – Complete Set (4 články) s Bluetooth 4.0 [online] [cit. 30.12.2022] Dostupné z: <https://www.bch-battery.cz/BMS123-Smart-Gen3-samostatny-clankovy-modul-d2315.htm>



[battery.cz/BMS123-Smart-GEN3-system-Complete-Set-4-clanky-s-Bluetooth-4-0-d2314.htm#detail-anchor-download](http://battery.cz/BMS123-Smart-GEN3-system-Complete-Set-4-clanky-s-Bluetooth-4-0-d2314.htm#detail-anchor-download)

- [29] e-phon.cz, e-shop, 2022, BMS Daly SMART 4s LiFePO4 100A common port s balancerem [online] [cit. 30.12.2022] Dostupné z: [https://www.e-pohon.cz/bms-daly-smart-4s-lifepo4-100a-common-port-s-balancerem?gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBPFv5Db5foQuz3sKA2A3eigBxoRKE7Lbnq2JwHwdkg01FKAWvWN5yQaAjDREALw\\_wcB](https://www.e-pohon.cz/bms-daly-smart-4s-lifepo4-100a-common-port-s-balancerem?gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBPFv5Db5foQuz3sKA2A3eigBxoRKE7Lbnq2JwHwdkg01FKAWvWN5yQaAjDREALw_wcB)
- [30] gme.cz, e-shop, 2022, Modul DC/DC měnič step-down 3-40V/3A [online] [cit. 5.1.2022] Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1508321/modul-dc-dc-menic-step-down-3-40v-3a>

## **13 Seznam obrázků**

<b>Obrázek 1: Ukázka typických alkalických AA článků (Primární články).....</b>	<b>- 2 -</b>
<b>Obrázek 2: Ukázka olověné startovací baterie do automobilu.....</b>	<b>- 3 -</b>
<b>Obrázek 3: Ukázka složení LFP baterie .....</b>	<b>- 4 -</b>
<b>Obrázek 4: Teoretický průběh nabíjení metodou CCCV.....</b>	<b>- 5 -</b>
<b>Obrázek 5: Ilustrační blokové schéma BMS pro Li-ion baterii .....</b>	<b>- 6 -</b>
<b>Obrázek 6: Schéma jednoduchého analogového balanceru (Překresleno) .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>Obrázek 7: Schéma aktivního balanceru s jedním kondenzátorem (Překresleno).....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>Obrázek 8: Ilustrační ukázka bezpečné oblasti fungování baterie .....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>Obrázek 9: Průběh závislosti napětí na kapacitě při různém C-rate Li-ion článku ...</b>	<b>- 12 -</b>
<b>Obrázek 10: Schéma přednabíjecího obvodu .....</b>	<b>- 13 -</b>
<b>Obrázek 11: Ultimatron LiFePO4 .....</b>	<b>- 14 -</b>
<b>Obrázek 12: Odipie LiFePO4.....</b>	<b>- 14 -</b>
<b>Obrázek 13: EcoWatt LiFePO4 .....</b>	<b>- 14 -</b>
<b>Obrázek 14: ELERIX Cell LiFePO4.....</b>	<b>- 15 -</b>
<b>Obrázek 15: BMS modul deska.....</b>	<b>- 15 -</b>
<b>Obrázek 16: GWL balancing module .....</b>	<b>- 16 -</b>
<b>Obrázek 17: BMS123 set .....</b>	<b>- 16 -</b>
<b>Obrázek 18: Daly BMS.....</b>	<b>- 17 -</b>
<b>Obrázek 19: Popis balančního modulu BS1V4 mini .....</b>	<b>- 19 -</b>
<b>Obrázek 20: Bistabilní relé HFV15-L .....</b>	<b>- 20 -</b>
<b>Obrázek 21: Schéma řídicího obvodu relé.....</b>	<b>- 21 -</b>
<b>Obrázek 22: Modul s Hallovým senzorem .....</b>	<b>- 22 -</b>
<b>Obrázek 23: Ukázka programu BatteryControl .....</b>	<b>- 23 -</b>
<b>Obrázek 24: Ukázka webové stránky s daty BMS.....</b>	<b>- 24 -</b>
<b>Obrázek 25: Fotografie vývojové desky s BMS .....</b>	<b>- 25 -</b>
<b>Obrázek 26: Průběh nabíjení baterie.....</b>	<b>- 26 -</b>
<b>Obrázek 27: Průběh nabíjení článku č. 1.....</b>	<b>- 27 -</b>

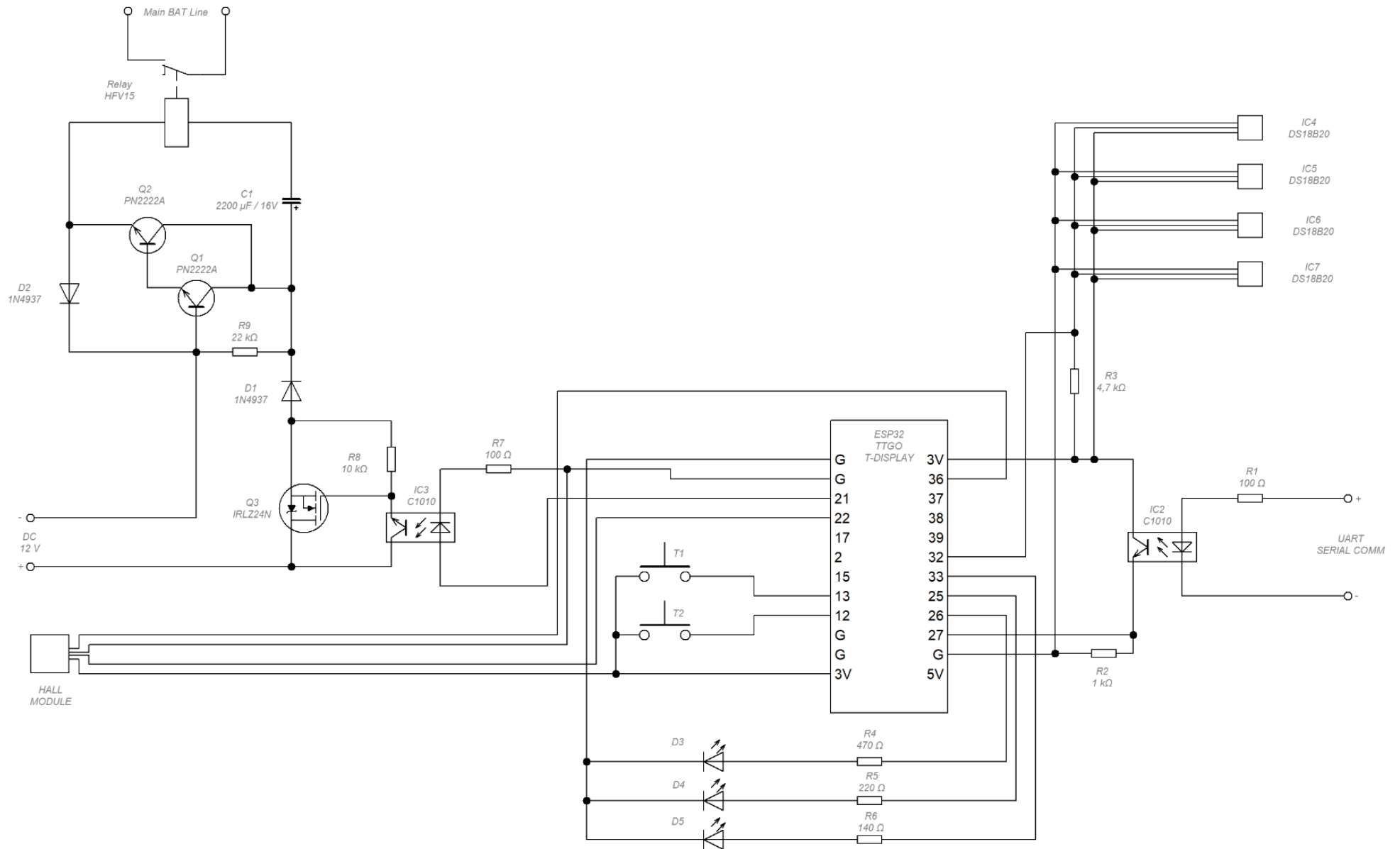
Obrázek 28: Průběh vybíjení baterie.....	- 28 -
Obrázek 29: Průběh vybíjení článku č. 1.....	- 29 -
Obrázek 30: Oscilogram balančního proudu.....	- 30 -
Obrázek 31: Modul DC/DC měnič step-down .....	- 30 -

## **14 Seznam Tabulek**

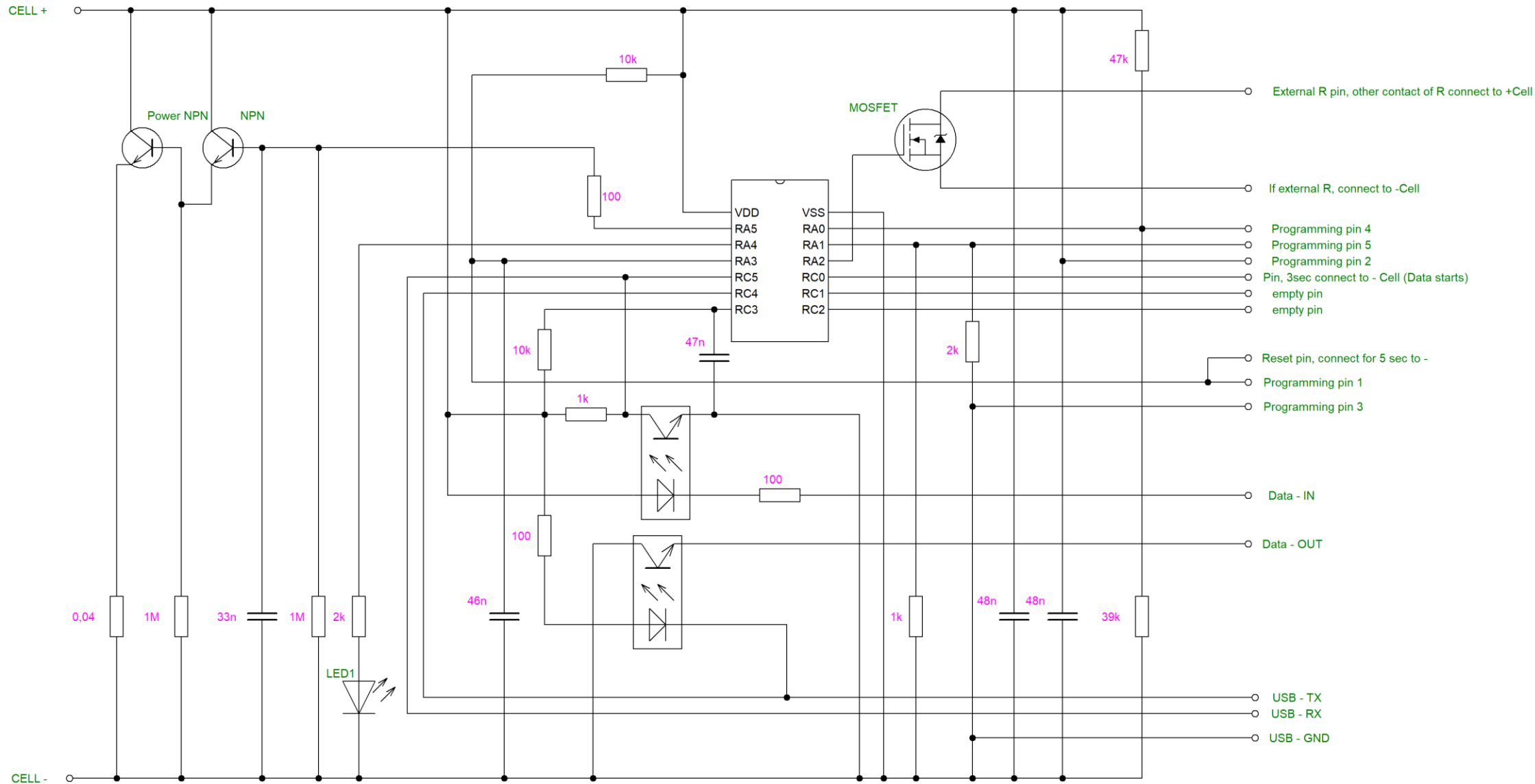
Tabulka 1: Základní typy primárních článků .....	- 2 -
Tabulka 2: Obecné vlastnosti LFP baterií .....	- 4 -
Tabulka 3: Vybrané LFP baterie .....	- 14 -
Tabulka 4: LFP článek .....	- 15 -
Tabulka 5: LFP BMS modul .....	- 15 -
Tabulka 6: Balancer pro LFP .....	- 16 -
Tabulka 7: BMS123.....	- 16 -
Tabulka 8: Daly BMS .....	- 17 -
Tabulka 9: Parametry použitých LFP baterií .....	- 18 -
Tabulka 10: Popis pinů desky ESP32 TTGO T-Displej .....	- 20 -
Tabulka 11: Tabulka spotřeby BMS.....	- 30 -

# 15 Elektrotechnická schémata

## 15.1 Schéma desky



## 15.2 Schéma balančního modulu



# 16 Pinmap ESP32 TTGO T – Display

