

# Algoritmy pro stacionární úložiště energie

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2612 Elektrotechnika a informatika

*Studijní obor:*

Elektronické informační a řídicí systémy

*Autor práce:*

**Luděk Špaček**

*Vedoucí práce:*

Ing. Miloš Hernych

Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Konzultant práce:*

Ing. Pavel Jandura, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





## Zadání bakalářské práce

# Algoritmy pro stacionární úložiště energie

*Jméno a příjmení:* **Luděk Špaček**  
*Osobní číslo:* M17000060  
*Studijní program:* B2612 Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* Elektronické informační a řídicí systémy  
*Zadávací katedra:* Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Akademický rok:* **2019/2020**

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši vhodných typů baterií pro stacionární úložiště energie, zejména s ohledem na použití baterií LiFePO<sub>4</sub>.
2. Navrhněte vhodné algoritmy balancování a strategie řízení dodávek energie se zohledněním limitů jednotlivých prvků řetězce (BMS, baterií, nabíječů a střídačů) a priorit.
3. Na vybraném HW tyto algoritmy ověřte zejména s ohledem na různé výkony nabíjení a vybíjení. Zpracujte výsledky testování navržených algoritmů a zhodnoťte dosažené výsledky.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby dokumentace  
30–40 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] ANDREA, Davide. *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston: Artech House, c2010. ISBN 1608071049.
- [2] PLETT, Gregory L. *Battery management systems: battery modeling*. London: Artech House, [2015]. ISBN 9781630810238.
- [3] WEICKER, Phillip. *A systems approach to lithium-ion battery management*. Boston: Artech House, [2014]. ISBN 1608076598.

*Vedoucí práce:*

Ing. Miloš Hernych  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Konzultant práce:*

Ing. Pavel Jandura, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Datum zadání práce:*

10. října 2019

*Předpokládaný termín odevzdání:*

18. května 2020

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

25. května 2020

Luděk Špaček

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Miloši Hernychovi za vedení mé bakalářské práce. Firmě Teco a.s. za možnost realizovat bakalářskou práci a Filipu Singertovi, DiS. za odborný dohled a cenné rady při realizaci bakalářské práce.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá stacionárním ukládáním energie v bateriích. V úvodu jsou zde popsány aplikace využívající stacionární úložiště. Dále jsou v práci detailněji rozebrány druhy baterií, nejvíce pak Li-Ion baterie se zaměřením na LiFePO<sub>4</sub>, jenž jsou zásluhou svých vlastností dnes využívány při budování stacionárních úložišť. V práci je rovněž popsána funkce Battery Management Systému, který se stará o bezpečnost a životnost baterií. Především je práce zaměřena na balancování článků baterie. Jsou zde navrženy a popsány algoritmy balancování pro reálné aplikace. Ty jsou v závěru práce na reálném hardwaru a softwaru ověřeny a zhodnoceny.

## **Klíčová slova**

Baterie, Článek, Battery Management System, Algoritmus, Balancování, Stacionární, Úložiště,

## **Annotation**

This work deals with stationary energy storage in batteries. The introduction describes applications using stationary storage. Furthermore, some types of batteries are analyzed in more detail, mainly Li-Ion batteries with focus on LiFePO<sub>4</sub>, which in the construction of stationary storage, are used today due to their qualities. The work also describes function of the Battery Manager System, which takes care of safety and battery life. Above all, balancing of the battery cells is discussed here. Balancing algorithms for real applications are designed and described here. At the end of this work, these algorithms are verified and evaluated on real hardware and software.

## **Key Words**

Battery, Cell, Battery Management System, Algorithm, Balancing, Stationary, Storage

## Obsah

<b>1. Teoretická část</b> .....	<b>10</b>
1.1 Úložiště energie.....	10
1.2 Olověná baterie.....	12
1.3 Niklové baterie.....	15
1.4 Lithiové baterie.....	16
1.5 LiFePO <sub>4</sub> .....	18
1.6 Baterie .....	22
1.7 Battery Management System .....	24
<b>2. Praktická část</b> .....	<b>26</b>
2.1 Hardware .....	26
2.2 Program .....	29
<b>3. Algoritmy</b> .....	<b>35</b>
3.1 Balancování na úroveň vybití.....	36
3.2 Balancování na úroveň nabití.....	37
3.3 Balancování na úroveň nabití s balancováním při nabíjení.....	38
3.4 Balancování na úroveň nabití s balancováním při nabíjení sníženým proudem.....	39
3.5 Měření .....	41
<b>Závěr</b> .....	<b>45</b>

## Seznam zkratek

AGM	Akumulátor s vázaným elektrolytem
BMS	Battery Management System
CC	Konstantní proud
CFC	Continuous Function Chart, volně propojované bloky
CV	Konstantní napětí
DOC	Hloubka vybití baterie
EV	Elektrické vozidlo
MPPT	Sledování bodu maximálního výkonu
OVC	Napětí otevřeného článku
PCM	Paralelní modul článků
SCM	Sériový modul článků
SOC	Stav nabití baterie
SOH	Stav zdraví baterie
ST	Jazyk strukturovaného textu
UPS	Zdroj nepřerušovaného napájení
VRLA	Ventilem řízený olověný akumulátor



## Seznam obrázků

Obrázek 1. Startovací a trakční olověná baterie.....	13
Obrázek 2. Vnitřní struktura LiFePO <sub>4</sub> článku [8] .....	19
Obrázek 3. Nabíjecí charakteristika LiFePO <sub>4</sub> článku [8] .....	20
Obrázek 4. Vybíjecí charakteristika LiFePO <sub>4</sub> článku [8].....	20
Obrázek 5. Princip zapojení modulu B-BM-0201X na LiFePO <sub>4</sub> články .....	27
Obrázek 6. Hardware pro testování algoritmů.....	28
Obrázek 7. Webové prostředí programu.....	30
Obrázek 8. Funkční blok fbBaterie.....	30
Obrázek 9. Funkční bloky pro ovládání měničů.....	33
Obrázek 10. Funkční blok .....	34
Obrázek 11. Algoritmy balancování na úroveň vybití a nabití.....	35
Obrázek 12. Graf balancování na úroveň vybití.....	36
Obrázek 13. Graf balancování na úroveň nabití .....	37
Obrázek 14. Graf balancování na úroveň nabití s předbalancováním .....	38
Obrázek 15. Graf balancování na úroveň nabití s předbalancováním 2 .....	39
Obrázek 16. Algoritmy balancování na úroveň nabití s předbalancováním.....	40
Obrázek 17. Graf ztrát energie balancováním .....	42
Obrázek 18. Graf ztrát energie balancováním 2 .....	43

## Úvod

S rozvojem elektromobility dochází k značnému pokroku v technologiích elektrochemického ukládání energie. Stále zvyšující se kvalita baterií a jejich snižující se cena způsobuje zvýšenou poptávku po budování stacionárních úložišť. Jedním z hlavních odvětví, ve kterém jsou stále více využívána stacionární úložiště, je fotovoltaický systém rodinných domů nebo firem. Nadbytečná elektrická energie z fotovoltaických panelů je ukládána do baterií, aby bylo poté možné využít energii v situacích, kdy panely již nedodávají energii, nebo jejich energie není dostatečná pro pokrytí spotřeby.

Stacionární úložiště má několik možností využití. Například v nemocnicích se provozují velká úložiště pro napájení celé nebo části nemocnice, při případném výpadku dodávky elektrické energie. V takovémto úložišti není nutné mít baterie, které zvládnou ohromné množství nabíjecích cyklů, ale naopak je zde poptávka po velké kapacitě a maximálním výkonu. Dalším využitím jsou již zmíněné fotovoltaické systémy a elektromobily, kde je naopak nutné, aby baterie zvládla až tisíce nabíjecích a vybíjecích cyklů, jelikož k nim dochází na denní bázi.

Chemické ukládání elektrické energie nelze přirovnat k naplňování a vyplňování nádrže. Dochází zde k různým reakcím, které způsobují například ztráty energie v bateriích. Každá baterie je složena z jednotlivých článků, které, ačkoliv jsou vyrobeny stejnými postupy, nikdy nejsou úplně stejné. Proto je nutné u některých typů baterií využívat Battery Management System, který zabraňuje poškození nebo zničení baterie.

Cílem práce je seznámení s jednotlivými typy baterií, které jsou vhodné pro stacionární úložiště, především s LiFePO<sub>4</sub> články. Ty jsou zásluhou svých vlastností, jako jsou bezpečnost, hustota energie a maximální dodávaný výkon, dnes běžně používány pro stacionární úložiště v hybridních fotovoltaických systémech. Pro tyto články je v praktické části vytvořen program pro řízení stacionárního úložiště. Výsledkem práce je program, který je odzkoušen na navržených a vytvořených algoritmech balancování, které jsou v závěru práce popsány a vyhodnoceny.

# 1. Teoretická část

## 1.1 Úložiště energie

Existuje mnoho způsobů, jak lze ukládat energii. Například: setrvačníky, stlačený vzduch a ultra-kondenzátory. Pro většinu aplikací ale stále zůstává jako nejlepší volba baterie. Výhodou baterií je jejich možnost použití v malých zařízeních (mobilních telefonech, sluchátkách, kamerách), ale i ve větších a náročnějších aplikacích. Baterie lze využít v elektromobilech, nebo je použít jako obří záložní zdroje (UPS). Hlavní výhodou je jejich efektivita, bezpečnost a poměr kapacity k jejich hmotnosti. Vědci se neustále snaží vyvíjet lepší chemické složení článků se zaměřením na nízké náklady a dlouhou životnost. [1]

### 1.1.1 Přenosná zařízení

Baterie je pro většinu dnešních zařízení nezbytnost. Jde především o všední elektroniku jako mobilní telefon, notebook, kameru nebo různá elektrická nářadí, lékařské přístroje nebo armádní vybavení. Všechna tato zařízení nás osvobozují od napájení a umožňují volné přenášení a práci v oblasti se špatným přístupem k napájení. Tyto přístroje pracují na principu cyklického nabíjení a vybíjení. Baterie se vyšším proudem nabije a poté je nižším proudem postupně vybíjena. [1]

### 1.1.2 Elektromobily

Jak už bylo napsáno, skladování energie v bateriích je spojeno i s aplikacemi s vyššími nároky na kapacitu a výkon. Jedním z příkladů jsou elektromobily. Ty vyžadují rychlé a vysoce proudové nabíjení a vybíjení v reakci na brzdění a akceleraci vozidla. U těchto aplikací je vyžadován velice sofistikovaný systém pro správu baterií, který hlídá maximální proudové zatížení v závislosti na stavu baterie. [1]

### **1.1.3 Vyrovnávací baterie**

Dalším uplatněním baterií jsou obnovitelné zdroje elektrické energie, jako jsou sluneční a větrné elektrárny, které se potýkají s problémem výkyvů dodávky elektrické energie. Baterie akumulují přebytečnou energii, a poté v době deficitu vyrovnávají dodávanou energii do sítě. Tato aplikace je dnes běžně instalovaná do domů s fotovoltaickou elektrárnou, kde je přes den energie akumulována do baterií a poté v noci využívána na spotřebu domácnosti. [1]

### **1.1.4 Zdroje nepřetržitého napájení**

Některá zařízení nebo budovy, například nemocnice, se nesmějí ocitnout bez dodávky elektrické energie. Proto dochází k využívání záložního zdroje, neboli UPS z anglického Uninterruptible Power Supply. Baterie jsou nepřetržitě udržovány v nabitém stavu tak, aby při výpadku elektřiny mohly dodat co nejvíce energie. [2]

## 1.2 Olověná baterie

V roce 1859 objevil francouzský fyzik Gaston Planté olověný akumulátor, který se stal první dobíjecí baterií pro komerční použití. I přesto, že je to dnes už více jak 160 let od jejího objevení, je zásluhou své spolehlivosti a nízké ceny velice populární. Setkat se s olověným akumulátorem můžeme nejčastěji v automobilech, kde se akumulátor používá jako startovací baterie, která slouží pro rozběh motoru a pro napájení elektroniky. Olověný akumulátor se skládá z olověných desek, které mívají nejčastěji příměsi antimonu, vápníku, cínu či selenu, pro zlepšení jeho vlastností. Tyto olověné desky jsou ponořené v rozředěném roztoku kyseliny sírové ( $H_2SO_4$ ). Jeden článek baterie se skládá ze dvou elektrod a jeho nominální napětí je 2,1 V. Jednotlivé články se řadí sériově a výsledná baterie má poté napětí  $n \times 2.1 V$ , kde  $n$  je počet článků baterie. [3, 4]

### 1.2.1 Fungování olověné baterie

Při nabíjení baterie se tvoří na kladné elektrodě oxid olovičitý ( $PbO_2$ ), na záporné elektrodě se hromadí jemně rozptýlené olovo ( $Pb$ ) a dochází k zhušťování elektrolytu. Hustotu elektrolytu lze použít jako velmi dobrý ukazatel stavu nabití baterie. Pro vybíjení platí opačný jev, elektrolyt řídne a na elektrodách se tvoří síran olovnatý ( $PbSO_4$ ). Ten má v porovnání s olovem a oxidem olovičitým velmi malou měrnou vodivost a dochází tak k zvýšení odporu na elektrodách.

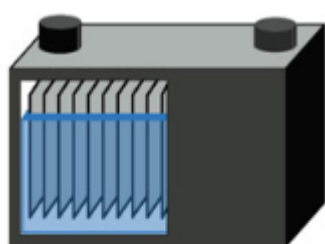


Směr šipky vpravo značí nabíjení, naopak vlevo vybíjení.

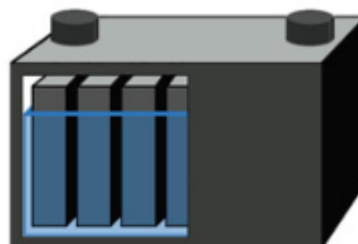
Nabíjení olověné baterie je snadné, ale pomalé, a je nutné hlídat její mezní hodnoty napětí. Olověná baterie pro trakční využití poskytuje v závislosti na typu a hloubce cyklu baterie 200 až 400 nabíjecích cyklů. Důvodem její krátké životnosti je koroze kladné elektrody, tzn. ztenčení aktivní vrstvy materiálu. Ta je urychlena vysokou provozní teplotou a vysokým vybíjecím proudem. Nízké hodnoty baterii sice chrání před korozí elektrody, ale nelze s nimi dosáhnout vysokého výkonu a baterie se stává náchylná k sulfataci. Každý nabíjecí a vybíjecí cyklus snižuje kapacitu baterie, stejně tak i úplné vybití baterii přetěžuje. [3, 4]

## Sulfatace

Olověná baterie se musí skladovat v nabitém stavu, jinak dochází k sulfataci záporných elektrod. To znamená, že dochází k přeměně jemného síranu olovnatého na tvrdou vrstvu síranu. Ta způsobuje, že při nabíjení dochází ke vzniku vodíku, místo redukce síranu olovnatého. Zvýšení kapacity baterie se sulfatovanými elektrodami lze dosáhnout doplněním zředěné kyseliny sírové a nabíjením velmi malými proudy. Pro zmírnění sulfatace se přidává uhlík na zápornou elektrodu, ten ale snižuje měrnou hustotu baterie. [3, 4]



a) startovací baterie



b) trakční baterie

*Obrázek 1. Startovací a trakční olověná baterie.*

Na Obrázku 1. jsou vyobrazeny řezy dvou typů olověných baterií. Na levém obrázku je znázorněna startovací baterie s tenkými elektrodami, tím dochází ke zvětšení kontaktní plochy s elektrolytem. Zásluhou toho dochází ke snížení odporu a zvýšení dodávaného výkonu. Tenké elektrody jsou ale více náchylné na korozi, a tak baterie dosahuje nízkého počtu nabíjecích cyklů. Opakem jsou trakční baterie, ty jsou uzpůsobeny pro aplikace s pravidelným cyklováním. Jejich elektrody jsou větší, tím předchází zničení korozí, ale nedokáží dodat tak vysoký výkon jako startovací baterie.

## **1.2.2 Bezúdržbové olověné akumulátory**

Bezúdržbové olověné akumulátory nemají elektrody zaplavené tekutým elektrolytem, místo toho je elektrolyt napuštěn do separátu. VRLA (Ventilem řízené olověné akumulátory) nebo tzv. gelové akumulátory obsahují elektrolyt ve formě silikagelu, který tvoří pastovitou suspenzi. U AGM (akumulátor s vázaným elektrolytem) je elektrolyt vsáknutý do speciální skleněné rohože. Ačkoliv se udává, že jsou baterie uzavřené, není tomu tak, obsahují totiž ventil, který je chrání před vysokým tlakem, který nastává při vysokých vybíjecích proudech. A zároveň před vysoušením baterie. Právě proto nesou tyto baterie název bezúdržbové, není totiž potřeba dolévat vodu do elektrolytu, jako u baterií s plovoucími elektrodami. Zásluhou těchto vlastností lze s baterií také bezpečně manipulovat bez obav z úniku elektrolytu. [3]

### **Akumulátor s vázaným elektrolytem**

AGM (absorbent glass mat) baterie disponují nízkým vnitřním odporem a zároveň schopností dodávat vysoké proudy. Velkým kladem je i životnost při hlubokém cyklování, nízká náchylnost k sulfantaci i nízké samovybíjecí proudy. Tento typ baterií není tedy tak náchylný na skladování při nízké úrovni nabití. AGM baterie špatně snáší vysoké teploty, které hrají roli i při maximálním napětí pro nabíjení, to s rostoucí teplotou klesá. Nejčastěji se vyrábí s kapacitou 30 až 100 Ah. [3]

### **Gelové akumulátory**

Gelové akumulátory mají podobné vlastnosti jako AGM baterie a jsou s nimi často zaměňovány. Každá z těchto baterií má ale své vlastní využití. Výhodou gelové baterie je větší výdrž, především z důvodu lepšího šíření tepla do okolního prostředí. Dobře tak fungují při vysokých teplotách, kde AGM baterie ztrácí. Naopak oproti AGM baterii mají vysoký vnitřní odpor, a proto se nehodí jako zdroj pro vysoké proudy. Výhodou těchto baterií je křivka výkonové charakteristiky, kde se gelová baterie drží celou svoji životnost na horní hranici a poté náhle klesá, oproti AGM, které tato křivka klesá postupně. [3]

### 1.3 Niklové baterie

Niklové baterie byly především v druhé polovině minulého století používány v mnoha přenosných zařízeních, například v lékařství, v elektrickém nářadí, ale i v profesionálních kamerách. Baterie nabízejí uživateli za vyšší cenu větší výkon a měrnou kapacitu (Wh/kg), než nabízí olovené baterie. Jejich výhodou je i vyšší životnost a rychlejší nabíjení. Jejich popularita sice klesla s příchodem lithiových baterií, přesto je dnes můžeme najít v elektrickém nářadí nebo v leteckém průmyslu. K dosažení dlouhé životnosti u niklových baterií je ale důležité pečovat o baterii a využívat ji v jejím plném cyklu. Niklové baterie disponují paměťovým efektem, to znamená, že při dlouhodobém využívání menší, než jmenovité kapacity, se baterie adaptuje a její maximální kapacita se sníží na právě využívanou kapacitu. Další nevýhodou niklových baterií je velký samovybíjecí efekt. Pro Ni-MH technologii je samovybíjecí efekt až 30 % kapacity za měsíc, z toho 20 % kapacity po prvních 24 hodinách po nabití.

Nejvíce populární technologií je NiCd (Nikl-kadmium), tato baterie byla po mnoho let velice oblíbenou. Nabízí dobrou životnost a tím i dobrou cenu na jeden cyklus života, vysokou rychlost nabíjení a dobrý výkon v nižší teplotách. Výhodou je i bezpečné skladování a přeprava, díky které jsou hojně využívány v letectví. Nevýhodou je menší měrná energie a využívání toxického kadmia.

NiMH se stala nejlépe dostupnou technologií pro běžného spotřebitele. Výrobci baterií nabízejí NiMH baterie v AA, AAA a dalších běžných velikostech. Stejnou technologii využila i automobilka Toyota pro svoje hybridní auta. Oproti Ni-Cd mají menší paměťový efekt, větší měrnou kapacitu a neobsahují toxické kadmium. Mají také ale menší životnost a složitější algoritmus nabíjení a jejich Coulombická účinnost je pouhých 65 %.

[1, 5]



## 1.4 Lithiové baterie

První průkopnické práce na lithiových bateriích začaly v roce 1912 pod G.N.Lewisem. Komerční využití nastalo ale až v 70. letech a to pro primární články. Snaha o vytvoření dobíjecích článků na bázi Lithia následovala v 80. letech 20. století. Tato snaha ale selhala kvůli nestabilitě kovového lithia, využívaného jako materiál pro výrobu anody. Nestabilita tak posunula výzkum na nekovové řešení využívající lithiové ionty. V roce 1991 firma Sony komercializovala první Li ion články a dnes se tato technologie stala nejslibnější a nejrychleji rostoucí na trhu baterií. V roce 1994 byly náklady na výrobu Li-ion článku 18650 s kapacitou 1,1 Ah vyšší než 10 amerických dolarů. Na přelomu tisíciletí už klesla cena pod 3 \$ s kapacitou 1,9 Ah. Dnes tento článek dosahuje kapacity přes 3 Ah. [6]

### 1.4.1 LiCoO<sub>2</sub>

Pro svoji vysokou měrnou energii velice oblíbená volba pro mobilní telefony, notebooky a kamery. Katoda článku je složena z oxidu kobaltu, anoda z grafitového uhlíku. Nevýhodou těchto článků je relativně krátká životnost, nízká tepelná stabilita a omezený zatěžovací výkon. Li-kobalt článek by neměl být nabíjen nebo vybíjen proudem větším než je jeho kapacita (1 C). To znamená, že článek o kapacitě 2,4 Ah by neměl být nabíjen proudem větším než 2,4 A. Optimální hodnota udávána výrobcem je 0,8 C, asi 2 A. Baterie jsou vybaveny obvody, které chrání články před nadměrným vybíjecím nebo nabíjecím proudem. Vyšší hodnota proudu způsobuje zahřátí, nepřiměřené napětí a snižuje životnost baterie. [6]

Tabulka 1. Vlastnosti LiCoO<sub>2</sub> článků [6]

<b>Napětí</b>	Nominální 3,60 V; typický provozní rozsah 3,0–4,2 V / článek
<b>Měrná energie (kapacita)</b>	150–200 Wh / kg. Speciální buňky poskytují až 240 Wh / kg.
<b>Nabíjecí proud (C)</b>	0,7–1 C (většina buněk); Proud nabíjení nad 1 C zkracuje životnost baterie.
<b>Vybíjecí proud (C)</b>	1C; Výbojový proud nad 1 C zkracuje životnost baterie.
<b>Cyklus života</b>	500–1000, vztahující se k hloubce výboje, zatížení, teplotě
<b>Aplikace</b>	Mobilní telefony, tablety, notebooky, fotoaparáty

## 1.4.2 LiNiMnCoO<sub>2</sub>

Stejně jako LiCoO<sub>2</sub> používá anodu z grafitového uhlíku, katodu ale tvoří kombinace niklu, manganu a kobaltu. Tento článek je jedním z neúspěšnějších Li-iontových systémů. Jeho výhodou oproti LiCoO<sub>2</sub> je jeho výstupní proud, který může dosahovat proudu až 2 C. Články optimalizované pro výkon až 10 C. Tajemství spočívá v kombinaci niklu a manganu. Samotný nikl má velkou měrnou energii, jeho stabilita je ale špatná. Mangan naopak má nízkou specifickou energii, ale vytváří strukturu spinelu pro dosažení nízkého vnitřního odporu. Jejich kombinací dostáváme jejich pozitivní vlastnosti.

Obvyklá kombinace prvků na katodě je třetina niklu, třetina manganu a třetina kobaltu známá jako 1-1-1. Tato směs nabízí snížení nákladů díky snížení obsahu kobaltu. Další významnou kombinací je 5 dílů niklu, 3 díly kobaltu, 2 díly manganu (5-3-2), existují ale i další kombinace s různým poměrem katodových materiálů.

Výrobci baterií se snaží kvůli vysokým nákladům na kobalt odcházet od kobaltových systémů k niklovým katodám. Články s katodou na bázi niklu mají vyšší energetickou hustotu, nižší náklady a delší životnost než s katodou na bázi kobaltu, mají ale mírně nižší napětí. [6]

Tabulka 2. Vlastnosti LiNiMnCoO<sub>2</sub> článků [6]

<b>Napětí</b>	Nominální 3,60 V, 3,70 V ; typický provozní rozsah 3,0–4,2 V / článek
<b>Měrná energie (kapacita)</b>	150–220 Wh / kg
<b>Nabíjecí proud (C)</b>	0,7–1 C, Proud nabíjení nad 1 C zkracuje životnost baterie.
<b>Vybíjecí proud (C)</b>	1 C; 2 C možné na některých buňkách
<b>Životnost (v cyklech)</b>	1000–2000 (vztahující se k hloubce výboje, teplotě)
<b>Aplikace</b>	E-kola, zdravotnické prostředky, EV, průmyslové

### 1.4.3 LiNiCoAlO<sub>2</sub>

LiNiCoAlO<sub>2</sub> baterie existuje od roku 1999, a to především pro speciální aplikace. Tato technologie má podobně jako LiNiMnCoO<sub>2</sub> velkou specifickou energii 260 Wh/kg, odhaduje se potenciál až na 300 Wh/kg, a dlouhou životnost. Proto se na tuto technologii zaměřila i firma Tesla, která ji používá u svých celosvětově známých elektromobilů. Jsou ale více nebezpečné a nákladné na výrobu. [6]

Tabulka 3. Vlastnosti LiNiCoAlO<sub>2</sub> článků [6]

<b>Napětí</b>	Nominální 3,60 V; typický provozní rozsah 3,0–4,2 V / článek
<b>Měrná energie (kapacita)</b>	200 - 260 Wh / kg; předpokládá se až 300 Wh / kg
<b>Nabíjecí proud (C)</b>	0,7 C, u některých článků je možný rychlý náboj
<b>Vybíjecí proud (C)</b>	Typicky 1 C; vysoká rychlost vybití zkracuje životnost baterie
<b>Životnost (v cyklech)</b>	500 (vztahující se k hloubce výboje, teplotě)
<b>Aplikace</b>	Lékařské přístroje, průmyslové, elektrické hnací ústrojí (Tesla)

### 1.5 LiFePO<sub>4</sub>

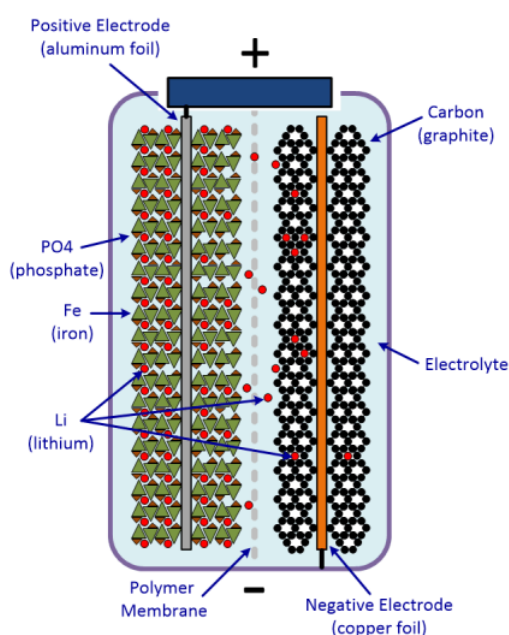
Technologie objevená v roce 1994 na Univerzitě v Texasu. Jak už název napovídá, katoda je vyrobena z železo-fosfátu, anoda jako u ostatních technologií je vyrobena z grafitového uhlíku. Díky materiálu katody jsou výrobní náklady těchto článků nízké a jsou zcela netoxické. Jedna z hlavních výhod vůči ostatním Li-iontovým článkům je i jejich možnost dodávat velmi vysoké proudy, některé články jsou schopny dodat až 40 C. Výhodou je i bezpečnost, články totiž při extrémních teplotách nevybuchují. Nicméně mají nižší hustotu energie a nižší napětí. [6]

Tabulka 4. Vlastnosti LiFePO<sub>4</sub> článků [6]

<b>Napětí</b>	3,20 V 3,30 V nominální; typický provozní rozsah 2,5–3,65 V / článek
<b>Měrná energie (kapacita)</b>	90–120 Wh / kg
<b>Nabíjecí proud (C)</b>	Typicky 1 C
<b>Vybíjecí proud (C)</b>	1 C, pro některé buňky i 25 C
<b>Životnost (v cyklech)</b>	2000 a vyšší (vztahující se k hloubce výboje, teplotě)
<b>Aplikace</b>	Přenosné a stacionární úložiště, vyžadující vysoké zátěžové proudy.

### 1.5.1 Jak funguje LiFePO<sub>4</sub>

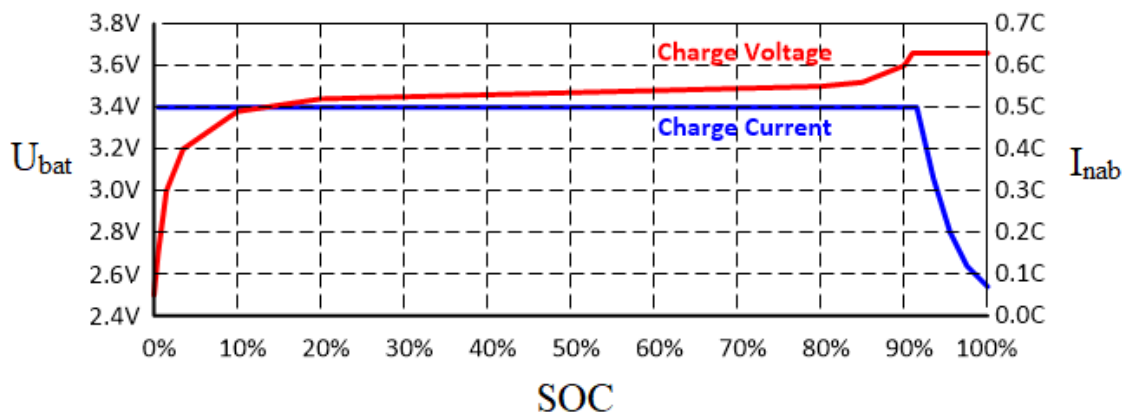
Vnitřní struktura LiFePO<sub>4</sub> článku je vidět na Obrázku 2. Na levé straně je umístěná kladná elektroda z železo-fosfátu a na pravé straně záporná elektroda z grafitového uhlíku. Mezi elektrodami je umístěná membrána z polymeru s malými póry pro průchod iontů lithia. Železo s fosfátem tvoří mřížku, která zachycuje ionty lithia, ty jsou na obrázku vyznačeny červenými tečkami. Stejnou funkci plní i na druhé straně uhlíková mřížka. Při nabíjení článku se ionty lithia přemísťují z kladné železo-fosfátové elektrody přes membránu na zápornou uhlíkovou elektrodu. Pro vybití dochází k opačnému přenosu iontů lithia ze záporné uhlíkové elektrody na kladnou železo-fosfát elektrodu. [1, 7, 8]



Obrázek 2. Vnitřní struktura LiFePO<sub>4</sub> článku [8]

### 1.5.2 Nabíjení LiFePO<sub>4</sub>

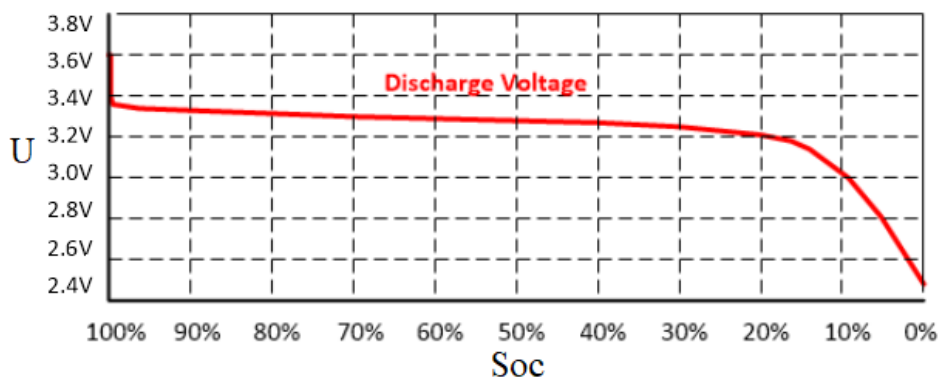
Jak je možné vidět na Obrázku 3, LiFePO<sub>4</sub> baterie je nabíjena ve dvou krocích. V prvním kroku probíhá nabíjení konstantním proudem, kdy je do baterie dodáván konstantní proud, nebo u nabíjení solárními panely maximální dodávaný proud ze solárních panelů. Při tomto kroku dochází k navyšování napětí baterie (článku) až do dosáhnutí absorpčního napětí 3,65 V. Jakmile dosáhne baterie této úrovně, její kapacita je přibližně na 90 %. Pro úplné nabití baterie je nutné přejít ke kroku dva. Druhým krokem je nabíjení konstantním napětím. Nabíječka udržuje absorpční napětí 3,65 V a proud se pomalu snižuje. Po klesnutí nabíjecího proudu pod hodnotu 0,1 C, je baterie plně nabitá. [8, 9]



Obrázek 3. Nabíjecí charakteristika LiFePO<sub>4</sub> článku [8]

### 1.5.3 Vybíjení LiFePO<sub>4</sub>

Při vybíjení LiFePO<sub>4</sub> článků je úroveň napětí od 95 % do 30 % SOC článku blízko úrovni nominálního napětí 3,3 V nebo 3,2 V (podle výrobce). Zatímco v aplikacích je tento jev vítán, určování stavu nabití za pomoci stavu napětí je zásluhou toho velmi nepřesné a je nutné používat Coulombovu metodu. Podle hloubky vybití článku lze ovlivňovat jeho životnost. Při vybíjení článku na 30 % jeho kapacity lze docílit prodloužení životnosti až o 1/3 cyklů a při vybíjení do 50 % dokonce až na trojnásobek cyklů, než při běžném 100 % cyklování. [8]



Obrázek 4. Vybíjecí charakteristika LiFePO<sub>4</sub> článku [8]

## 1.5.4 Porovnání s ostatními technologiemi

### Bezpečnost

Jeden z nejdůležitějších aspektů při vybírání technologie baterií pro stacionární úložiště. Baterie LiFePO<sub>4</sub> jsou jedny z nejbezpečnějších. Oproti jiným lithiovým bateriím nejsou náchylné k výbuchu nebo vzplanutí a nehrozí u nich ani únik elektrolytu, jako u olověných baterií.

### Životnost

Životnost LiFePO<sub>4</sub> dosahuje až 3000 cyklů při využívání 80 % kapacity. Po dosažení konce životnosti je sice její kapacita menší než 80 % počáteční kapacity, baterie ale stále může být využívána. Její životnost je tedy z lithiových baterií jedna z nejvyšších a ani niklové baterie či olověné baterie nedosahují takových čísel.

### Kapacita

LiFePO<sub>4</sub> baterie má z lithiových baterií jednu z nejhorsích hodnot měrné kapacity a to asi 90-120 Wh/kg. Například klasická lithium kobalt baterie dosahuje až dvojnásobných hodnot. U technologií využívajících kobalt je ale velkým problémem jejich bezpečnost. Také bezpečné niklové baterie dosahují podobných čísel jako LiFePO<sub>4</sub>, disponují ale paměťovým efektem a velkými samovybíjecími proudy. Velkou výhodou je i efektivita nabíjení, kdy Coulombova účinnost u LiFePO<sub>4</sub> baterií činí 95 %, zatímco u niklových baterií 60-70 %.

### Odebíraný proud

Zatímco většina baterií umožňuje maximální vybíjecí proud do 1 C. LiFePO<sub>4</sub> umožňují v některých případech dodávat proud až desetinásobek své jmenovité kapacity (10 C), ve špičkách až dvacetipětinásobek (25 C). Baterie mají tedy schopnost pokrývat i vysoké proudové špičky.

## 1.6 Baterie

Typická baterie je složena z několika článků zapojených paralelně nebo v sérii, aby mohla poskytovat požadovaný výkon. Při navrhování bateriového úložiště je nutné brát v potaz provozní napětí a špičkový proud, které baterie musí zvládat. Pro zvýšení napětí baterie se jednotlivé články řadí sériově. Výsledné napětí je poté dáno součtem napětí jednotlivých článků. Naopak při požadavku na velký proudový odběr je nutné zvýšit náboj (kapacitu) a tím i povolený maximální výstupní proud zapojením článků paralelně. Kapacita a proud baterie jsou poté dány součtem kapacit a proudů jednotlivých článků.

Kompromis při skládání baterie, kolik bude sériově a paralelně zapojených článků pro požadovaný výkon, je určen ekonomickými a bezpečnostními faktory. Například baterie, známé pod názvem moduly, mají kvůli bezpečnosti maximální napětí pod 50 V. Nejvyšší napětí baterií bývá 600 V, jelikož výkonová elektronika pro vyšší napětí je velice drahá. Z ekonomického hlediska je častější zvyšovat napětí baterie na úkor proudu (kapacity). Důvodem jsou menší ztráty energie vlivem odporů v baterii. A to vlivem vnitřního odporu samotného článku, ale i kabelů a spojek, kterými jsou články propojeny ( $P = I^2 \cdot R$ ). Ušetřit se dá i na vedení, jelikož při nižším proudu není potřeba, aby baterie disponovala kabely o širokém průměru.

Větší baterie jsou často modulární. To znamená, že baterie je při návrhu rozdělena na menší části, tzv. moduly. Jedná se o malé skupiny článků, které jsou různě paralelně a sériově zapojeny. Tyto moduly jsou pak mezi sebou spojeny. PCM (Parallel-cell-module) je označení pro modul s paralelním zapojením článků, naopak SCM (Series-cell-module) je označení pro modul se sériovým zapojením. Design modulu baterie nemusí být jen o paralelním nebo sériovém zapojení. Příkladem může být modul 3P6S. Ten má v zapojení 6 článků v sérii a 3 články paralelně. Při stejných vlastnostech všech článků mají všechny moduly o stejném počtu článků stejný výkon. To ale neodpovídá skutečnosti, jelikož každý článek baterie se vždy svými vlastnostmi liší. Proto se využívají nejrůznější topologie. [10]

### 1.6.1 OVC

Napětí otevřeného obvodu (Open-circuit voltage) je rozdíl elektrického potenciálu mezi svorkami baterie. Hodnota napětí, které naměříme na svorkách baterie je závislá na stavu nabití SOC a teplotě. Pomocí naměřené hodnoty napětí a teploty lze z tabulek vyčíst stav nabití. Při zatížení je naměřené napětí na svorkách baterie závislé též na součinu vnitřního odporu  $R_i$  a proudu  $I$ .

### 1.6.2 SOC

Po BMS je požadován výpočet předpokládaného stavu nabití baterie. Výstupní hodnota je udávána v procentech a přibližuje uživateli kapacitu baterie, jako obsah paliva v nádrži. Zatímco ale dokážeme senzory měřit přesně hladinu paliva v nádrži, u článku už to tak snadné není. Výsledná hodnota není závislá pouze na dodaném a odebraném proudu, ale spočívá na vlastnostech baterie, které se v průběhu používání mění, jako například celková kapacita či vnitřní odpor článku. Výsledná hodnota SOC je tak odhadována z měřených hodnot napětí, proudu a teploty. Existuje několik typů odhadů stavu baterie, jejich přesnost je úměrná k ceně zařízení. Mnoho vědců se zabývá touto problematikou a snaží se přijít na nejlepší algoritmus pro zjišťování stavu nabití. [10]

### 1.6.3 SOH

Zkratka z anglického State of Health, tedy stav zdraví, nám udává celkový stav baterie. Jedná se o poměr dodané kapacity baterie na začátku životního cyklu a aktuálně dodávanou kapacitu. Máme-li tedy baterii, která při zakoupení v nabitém stavu měla kapacitu 100 Ah a dnes dodává 90 Ah, její stav SOH je 90 %. Baterie je tedy schopna dodat o 10 % méně energie nežli na začátku jejího životního cyklu. Hodnota SOH klesá s počtem provedených nabíjecích cyklů a věkem baterie. Většina aplikací počítá s výměnou baterie po dosažení hodnoty 80 %.



## 1.7 Battery Management System

Battery Management System slouží k hlídání správného chodu baterie a hlavně k její ochraně před zničením. Hardwarová část se skládá z elektronických obvodů, zajišťujících bezpečnost baterie a z měřicích obvodů, které měří teplotu a napětí jednotlivých článků baterie a dodávaný či odebíraný proud. Softwarová část pracuje s naměřenými daty a dává uživateli zpětnou vazbu o stavu baterií. Zároveň podle potřeby a stavu baterie upravuje vyráběný či dodávaný výkon. [10]

### 1.7.1 Hlavní úkoly BMS

- Nejdůležitějším úkolem BMS je zaručení bezpečnosti pro pracovníka, který pracuje se stacionárním úložištěm. BMS musí detekovat nebezpečné podmínky a patřičně na tyto podmínky reagovat. Například odpojením a izolováním baterie od zátěže nebo varováním pracovníka pomocí kontrolky či displeje.
- Důležitým úkolem je i samotná ochrana článků baterie před jejich selháním nebo zničením, například z důvodu selhání některé části systému stacionárního úložiště. Tento úkol může být řešen softwarově, když při detekci chyby nebo při dosažení špatných podmínek pro chod baterie dojde k odpojení zátěže a izolaci baterie.
- BMS může sloužit i k prodloužení životnosti baterie. BMS modul za využití komunikace s řídicí elektronikou zdroje a zátěže hlídá dynamické limity výkonu baterie, které mohou nastat v blízkém intervalu. Tím zajišťuje, že nedojde k podbití baterie pod bezpečnou hodnotu a naopak přebití baterie.
- Čtvrtým úkolem je udržování baterie ve stavu, v kterém může plnit funkční požadavky. To znamená, že umožní baterii vybit pouze na takovou úroveň, po kterou je schopná dodávat jmenovitý výkon a naopak neumožní baterii nabít do stavu, kdy nedokáže přijímat jmenovitý výkon.

Ne všechny BMS disponují všemi těmito funkcemi, levnější systémy plní pouze ochrannou část a o řízení baterie už se nestarají. U větších stacionárních úložišť se ale na BMS nevyplácí šetřit, jelikož bez řízení baterie se snižuje životnost a to může přinést zvýšení investice kvůli nutné výměně poškozených článků či celé baterie. Stejně velký důraz na řízení baterie je i u zařízeních s vyššími požadavky (například armáda), kde selhání baterie je vysoce nežádoucí. [10]

### **1.7.2 Balancování**

Při používání lithiových baterií dochází k rozbalancování jednotlivých článků, které způsobuje, že každý článek poté disponuje odlišným nábojem. Pokud nedojde k vybalancování článků, baterie nedodá svoji jmenovitou kapacitu, jelikož se všechny články nenabijí na maximální hodnotu. Nebo není-li správně ošetřena baterie, může dojít k ničení článku nebo celé baterie vlivem přebití nebo podbití. Lithiové články disponují velice plochou charakteristikou, odhadování náboje v člancích podle naměřeného napětí je tedy velmi složité. Z Obrázku 4 lze pozorovat, že při nízkém a vysokém SOC je nárůst/pokles napětí vysoký a je tedy vhodné balancovat podle napětí na hranici nabití nebo na hranici vybití článků. [11]

### **1.7.3 Pasivní balancování**

Nejjednodušší a zároveň nejlevnější metodou balancování článku je metoda pasivní. Pasivní balancování je nejčastěji realizováno pomocí paralelně zapojených rezistorů, které jsou pomocí tranzistorů připojovány/odpojovány k článku baterie. Přebytečný náboj je poté přeměněn na teplo, u větších baterií je z tohoto důvodu vyžadováno externí chlazení. [11]

### **1.7.4 Aktivní balancování**

Aktivní balancování přebytečnou energii z článků s větším nábojem nepřeměňuje na teplo, ale využívá ji pro zvýšení náboje ostatních článků. Aktivní metoda balancování využívá složitější obvody a řídicí elektroniku. Jedna z metod aktivního balancování je balancování s využitím kondenzátoru. Článek s vyšším nábojem nabije kondenzátor, který pak předává svůj náboj článku s nižším nábojem. Tento princip je efektivní, ale také pomalý. Pro rychlejší reakce se využívají obvody s transformátory. [12]

## 2. Praktická část

Cílem bakalářské práce je vytvoření funkčního bloku pracujícího jako BMS pro PLC centrály řady Foxtrot CP-1000 a řady Foxtrot CP-2000 s využitím modulů C-BM-0202M a B-BM-0201X firmy Teco a vytvoření, ověření a zvolení správného algoritmu pro balancování článků.

Práce byla prováděna na sestavě, kterou mi poskytla firma Teco a.s. Vytvořený funkční blok má plnit hlavní úkoly Battery Management Systému, tedy zabezpečit co nejdelší životnost a bezpečný provoz baterie, detekovat nebezpečné situace a správně na ně reagovat, například odpojením baterie od zátěže po jejím vybití.

### 2.1 Hardware

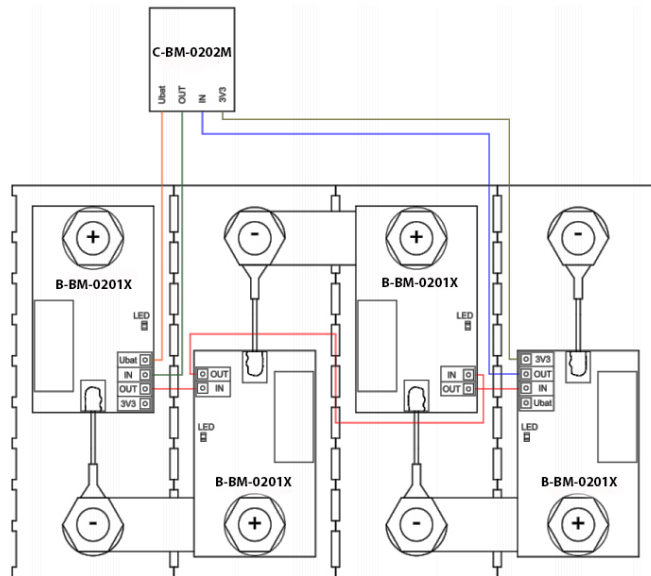
#### 2.1.1 Použitá zařízení

##### **Foxtrot CP-1000**

Foxtrot CP-1000 je centrální jednotka systému Tecomat od firmy Teco a.s., určena především pro komunikaci s CFox moduly (komunikace po CIB sběrnici) a RFox moduly (bezdrátová komunikace). Jednotka CP-1000 disponuje dvěma digitálními vstupy pro 230 V AC, čtyřmi volitelnými vstupy pro analogický nebo digitální signál, dvěma digitálními výstupy, TCL2 sběrnici, dvěma CIB sběrnici, RS-232 sběrnici, ethernetem a jednou volitelnou sériovou sběrnici podle zvoleného submodulu.

##### **C-BM-0202M a B-BM-0201X**

C-BM-0202M a B-BM-0201X jsou moduly systému Tecomat od firmy Teco a.s., sloužící pro řízení bateriových úložišť. Slave modul B-BM-0201X je umístěn mezi elektrodami článku, z kterých je napájen. Modul provádí měření teploty a napětí článků a zároveň obstarává spínání balančního odporu. Jednotlivé moduly jsou napojeny na sběrnici, která umožňuje modulům komunikovat s master modulem C-BM-0202M. Ten zpracovává data od slave modulů a pomocí Hallovy sondy zapojené na analogový vstup měří proud. Výsledná data přeposílá centrální jednotce Foxtrot pomocí CIB sběrnice a zároveň předává slave modulům řídicí signály pro balancování od centrální jednotky.



Obrázek 5. Princip zapojení modulu B-BM-0201X na LiFePO<sub>4</sub> články

## VONSCH FOTO CHARGER DC 48

Solární nabíječka FOTO CHARGER DC 48 od firmy Vonsch přeměňuje stejnosměrné napětí generované na svorkách fotovoltaického panelu na nabíjecí napětí pro baterii s jmenovitým napětím 48 V. Měnič je napájen ze sériově zapojených fotovoltaických panelů, při vyšších výkonech zapojených panelů je možná integrace více měničů pro nabíjení baterie. Pro maximální účinnost měniče je využíván systém MPPT (Maximum Power Point Tracking), díky kterému je měnič schopný sledovat bod maximálního výkonu fotovoltaického panelu.

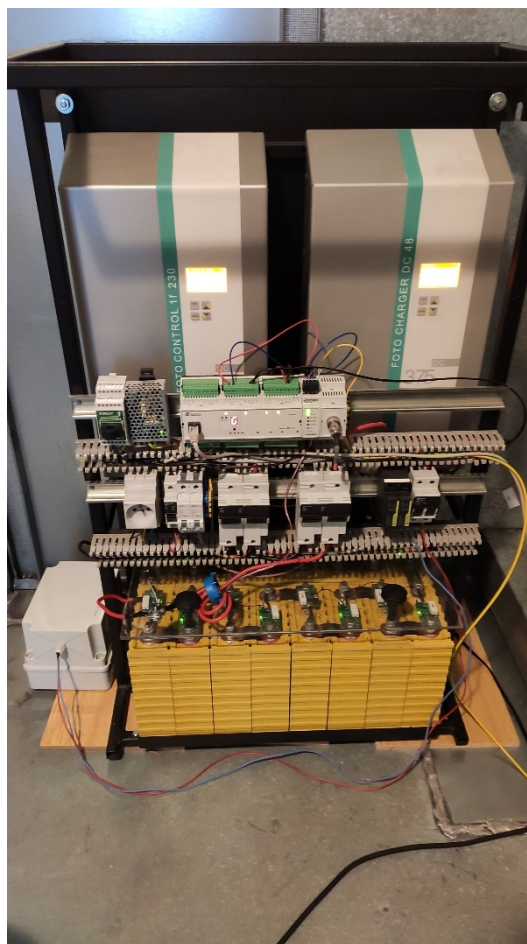
## VONSCH FOTO CONTROL 1f 230/48 DC

Střídač FOTO CONTROL 1f 230/48 DC od firmy Vonsch je určený pro přeměnu stejnosměrného napětí z baterie na jednofázové napětí rozvodné sítě. Střídač je schopný pracovat v ostrovním režimu, tedy starat se sám o napájení všech spotřebičů v síti. Nebo v hybridním režimu, kde je střídač připojen přímo do sítě a při vyšším odběru, než je střídač nebo baterie schopná pokrýt, dochází k odebírání energie z rozvodné sítě. Pro pokrytí celé trojfázové soustavy je nutné využít integraci tří měničů.

### 2.1.2 Zapojení

Testování navržených algoritmů bylo provedeno na LiFePO<sub>4</sub> článkách o kapacitě 90 Ah od společnosti Winston. Baterii tvoří šestnáct těchto článků zapojených do série o celkovém jmenovitém napětím 51,2 V a celkovém výkonu 4608 Wh. Ke každému článku byl paralelně zapojen modul B-BM-0201X pro snímání napětí, teploty a balancování článků. Každý z těchto modulů je propojen sériovou komunikací do mastera C-BM-0202M, který řídí komunikaci se slave moduly a pomocí analogového vstupu pro Hallovu sondu měří elektrický proud, který je do baterií dodáván nebo z nich odebírán. Všechna tato data posílá po CIB sběrnici do centrální jednotky CP-1000, která se stará o řízení celé soustavy.

Sestava byla navržena pro hybridní nebo ostrovní fotovoltaický systém, o nabíjení baterií se stará zařízení VONSCH FOTO CHARGER DC 48, vpravo na Obrázku 6. Jedná se o DC/DC měnič, který mění vstupní elektrické napětí z fotovoltaických panelů na nabíjecí napětí baterie. Měnič disponuje funkcí MPPT, která zaručuje, že se fotovoltaické panely pohybují v pracovním bodě s maximálním výkonem, čímž zajišťuje maximální možnou účinnost. Vybíjení baterií obstarává zařízení VONSCH FOTO CONTROL 1f 230/48DC, vlevo na Obrázku 6. Tento DC/AC měnič se stará o převod stejnosměrného napětí baterie na jednofázové napětí 230 V o frekvenci 50 Hz. Oba měniče jsou pomocí rozhraní RS-485 spojeny s centrální jednotkou CP-1000 a probíhá mezi nimi komunikace protokolem ModBUS. Při testování nebyly baterie nabíjeny pomocí fotovoltaických panelů, ale výkon panelů pro DC/DC měnič byl simulován pomocí autotransformátoru, jehož výstupní napětí bylo poté usměrněno. Pro vybíjení byl na výstup střídače měniče zapojen přímotop.



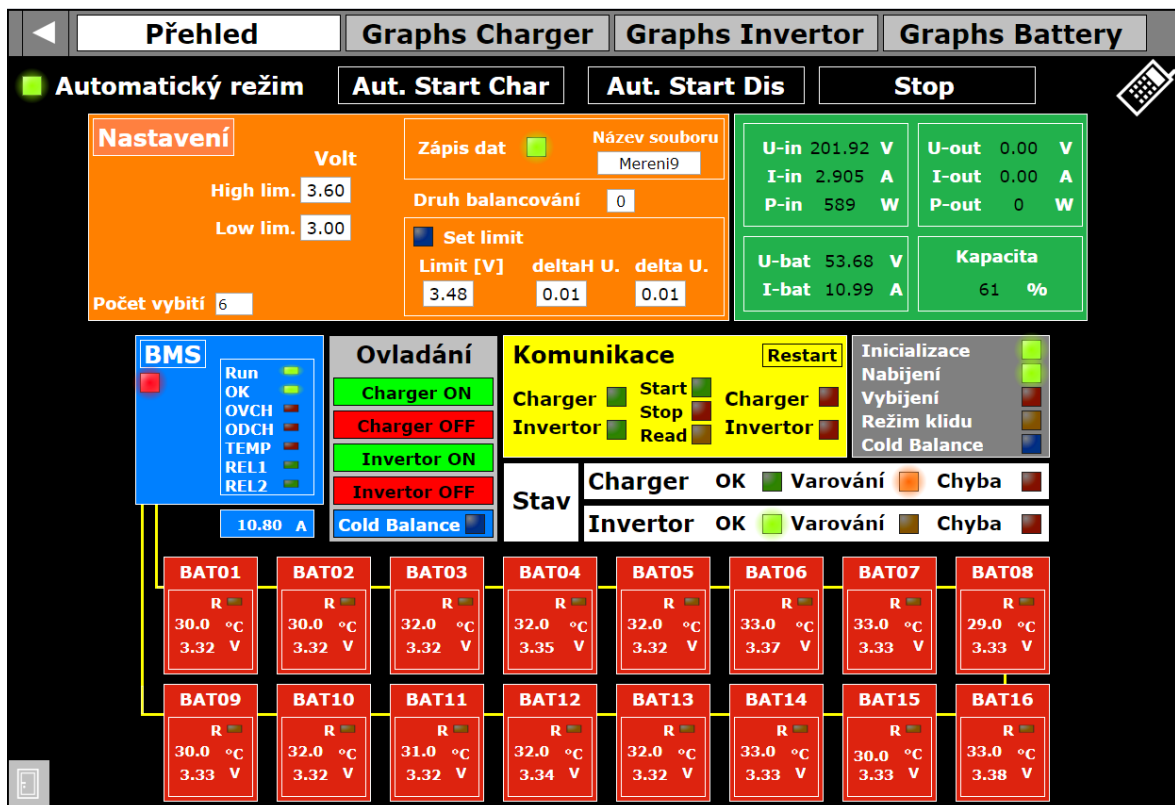
Obrázek 6. Hardware pro testování algoritmů

## 2.2 Program

Hlavní program je napsán v grafickém jazyce CFC. Program je rozdělen do pěti funkčních bloků, které jsou napsány v jazyce ST. Hlavní funkční blok fbBaterie plní funkci Battery Management Systemu a stará se tak o správu baterií. Další dva funkční bloky se starají o komunikaci mezi centrální jednotkou Foxtrot CP 1000, DC/DC měničem a střídačem od firmy VONSCH. Čtvrtý funkční blok slouží k řízení celého programu, vyhodnocuje výstupy Battery Management Systemu, funkčního bloku generujícího testovací algoritmy a naše manuální příkazy. Dle těchto informací vysílá příkazy funkčním blokům pro komunikaci s měniči. Poslední funkční blok slouží pro řízení vytvořených testovacích algoritmů, udává, kdy se má nabíjet/vybíjet podle zadaného algoritmu.

### 2.2.1 Webové prostředí

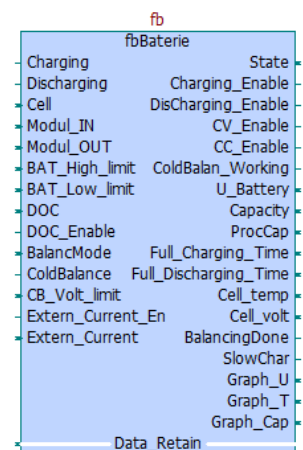
Pro vytvořený program bylo zhotoveno i webové prostředí Obrázek 7, které zobrazuje aktuální stav baterie a jejího řízení. V dolní části prostředí jsou zobrazeny jednotlivé články baterie. Zobrazena je zde jejich teplota, napětí měřené na člancích a dvoustavový obrázek informující, zda je článek balancován. Prostředí informuje o stavu komunikace s měniči a umožňuje volit automatické nebo manuální řízení, sloužící pro testování navržených algoritmů. Levá horní část slouží k nastavení mezních hranic napětí článků, druhu algoritmu balancování, nastavení názvu souboru pro zápis měřených dat a nastavení coldbalancu, který umožňuje balancovat články na libovolnou hodnotu napětí, za podmínky, není-li v provozu žádný měnič. V pravé horní části jsou zobrazeny aktuální stavy hodnot, které jsou získány z měničů. Na horní liště může uživatel překliknout na zobrazení grafů, které jednotlivé funkční bloky nabízejí.



Obrázek 7. Webové prostředí programu

## 2.2.2 fbBaterie

Grafickou podobu funkčního bloku lze vidět na Obrázku 8, jako vstupní proměnné jsou zde proměnné identifikující, zda je baterie nabíjena nebo vybíjena. Informace o počtu článků, z kterých se baterie skládá, a ukazatel na proměnné modulu C-BM-2020M. Blok umožňuje nastavit vlastní limity napětí pro ukončení vybíjení či nabíjení, nastavení hloubky vybití baterie (DOC) a nastavení balancovacího algoritmu. Důležitou vstupní proměnnou je proud, který slouží pro výpočet SOC, ale i pro hlídání maximálního výkonu. Uživatel si může sám zvolit, zda využije analogový vstup modulu pro zapojení Hallovy sondy, nebo použije vlastní měřicí modul. Proměnná Data\_Retain je struktura, sloužící pro proměnné, jejichž hodnota je PLC zachována i při jeho výpadku.



Obrázek 8. Funkční blok fbBaterie

Výstupní proměnné slouží pro řízení systému a pro podání informací uživateli. Proměnná State v textové podobě informuje, v jakém pracovním stavu se baterie nachází, zda je například nabíjena, vybíjena nebo dochází k balancování článků. Funkční blok dále informuje uživatele o stavu nabití baterie a za jakou dobu bude baterie nabitá nebo vybitá. Uživatel také může číst data o jednotlivých člancích baterie, též může využít grafy pro vizualizaci dat ve webovém prostředí WebMaker.

### **Ochrana proti zničení baterie**

Aby nedošlo k poškození či dokonce zničení článků, ale naopak k prodloužení životnosti, hlídá vytvořený funkční blok dolní i horní hranici napětí jednotlivých článků baterie. Horní napěťová hranice článků je v programu nastavena na 3,6 V, dolní hranice na 3,0 V. Po dosažení těchto hranic je nabíjení nebo vybíjení baterie ukončeno.

Při dosažení hranice 3,6 V přechází zařízení od firmy Vonsch do módu nabíjení konstantním napětím. Tím drží napětí baterií na konstantní hodnotě a udržuje je v plně nabitém stavu. Úroveň napětí 3,6 V byla zvolena kvůli zaznamenání upouštění přetlaku baterie za pomoci ventilu při nabíjení baterií nad úroveň 3,6 V a tedy lehkému úniku elektrolytu baterie. Firma PowerStream na základě měření kapacity článků při nabíjení na různé úrovně napětí, zaznamenala pro úroveň napětí 3,6 V stav nabití článku na hodnotě 99 %. [13] Toto měření odpovídalo i hodnotám naměřeným na mnou testovaných LiFePO<sub>4</sub> člancích. Při nabíjení článků na vyšší úroveň napětí dochází k minimálnímu nárůstu kapacity a zároveň dochází ke zkracování životnosti.

Pro životnost a bezpečnost článků je důležité i hlídání jejich teploty. Dojde-li k přehřátí, či naopak klesne teplota článku příliš nízko, dojde k přerušení nabíjení nebo vybíjení. Maximální teplota článku je nastavena na hodnotu 50 °C a minimální teplota nastavena na 3 °C.

### **Balancování**

Pomocí funkčního bloku dochází dle zvolených algoritmů k balancování článků baterie. Funkční blok vyhodnocuje vstupní proměnnou BalancMode a podle její hodnoty posílá pomocí modulu C-BM-0202M informaci o spuštění a vypnutí balancování modulu B-BM-0201X. Ten podle přijatých instrukcí připojuje/odpojuje rezistor pro balancování. Jednotlivé algoritmy jsou popsány v kapitole 2.3.



## Stav nabití (SOC)

Jelikož LiFePO<sub>4</sub> má velice plochou vybíjecí charakteristiku, zvolení metody pro zjištění SOC na základě OCV by bylo nevhodné. Pro zjištění stavu nabití baterie jsem proto zvolil Coulombovu metodu rozšířenou o Peukertův zákon, který slouží jako korekční technika. Ten snižuje kumulovanou chybu měření zapříčiněnou ztrátami baterie při zvolení samotné Coulombovy metody. Peukertův zákon formuluje vybíjecí kapacitu jako funkci hustoty proudu.

$$C_p = I^{pk} \cdot t \quad (1)$$

V rovnici (1) značí  $C_p$  Peukertovu kapacitu,  $I$  značí konstantní vybíjecí proud,  $t$  je doba vybíjení a  $pk$  je Peukertův koeficient. Z této rovnice lze odvodit vzorec pro výpočet Peukertova koeficientu. [14]

Výpočet Peukertova koeficientu je proveden po každém úplném cyklu:

$$I^{pk} = \frac{C_p}{t} \quad (2)$$

$$pk \cdot \log(I) = \log\left(\frac{C_p}{t}\right) \quad (3)$$

$$pk = \frac{\log C_p - \log t}{\log I} \quad (4)$$

Výsledný koeficient je poté použit pro výpočet aktuálního stavu nabití:

$$C = C_{max} - \int_0^t I^{pk} dt \quad (5)$$

$$SOC = \frac{C}{C_{max}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

### 2.2.3 fbVonschComm\_Control1f

Funkční blok realizuje komunikaci mezi centrální jednotkou Foxtrot CP-1000 a střídačem. Centrální jednotka Foxtrot CP-1000 nedisponuje v základním provedení rozhraním RS-485 pro možnost komunikace protokolem Modbus. Bylo tedy nutné rozšířit jednotku o submodul MR-0114, který umožňuje centrální jednotce komunikovat na tomto rozhraní.

Funkční blok umožňuje tři hlavní možnosti komunikace. První z nich je funkce Čtení. Při provádění čtení dochází ke čtení datových registrů měniče a stavové slovo, které slouží pro zapínání a vypínání měniče zůstává nezměněné. Jeli zvolená funkce Start, stavové slovo se příslušně nastaví a je odesláno do měniče, zároveň je provedeno čtení všech hodnot. To samé platí i pro funkci vypnutí.

Pro správnou funkci čtení dat z registrů je při zapnutí komunikace nejprve zapsáno do registrů měniče, která data požadujeme číst. V katalogu měniče jsou uvedeny indexy jednotlivých hodnot, které jsou zapsány do příslušných zapisovacích registrů. Podle hodnot uložených v registrech jsou poté nastaveny hodnoty v registrech pro čtení dat.

Pro komunikaci s měničem lze zvolit funkci čtení registrů, zápis registrů nebo čtení a zápis registrů. Pro program byla využita možnost čtení a zápis registrů. Řídící jednotka posílá adresy registrů, do kterých chce provést zápis a data která chce zapsat. Zároveň zasílá adresy registrů, z kterých chce data číst. Měnič přepíše data v požadovaných registrech měniče a poté odešle zpět načtená data ze zvolených registrů.



Obrázek 9. Funkční bloky pro ovládání měničů

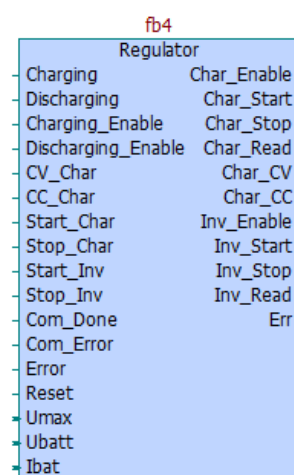
## 2.2.4 fbVonschComm\_Charger

Funkční blok realizuje komunikaci mezi centrální jednotkou Foxtrot CP-1000 a DC/DC měničem. Průběh komunikace je obdobný jako u komunikace se střídačem. Funkční blok pro DC/DC měnič disponuje navíc vstupy pro přepínání mezi nabíjením konstantním proudem nebo konstantním napětím a vstupem pro přepnutí do nabíjení se sníženým výkonem. Dále je možné nastavit maximální nabíjecí proud a maximální povolené napětí baterie.

## 2.2.5 fbRegulator

Pro funkčnost celého programu byl vytvořen tento funkční blok, který z výstupních dat Battery Management Systému, tedy fbBaterie a našich vstupních požadavků generuje vstupy pro funkční bloky, sloužící ke komunikaci s měniči. Funkční blok pracuje cyklicky ve třech úrovních. V první úrovni vyhodnocuje, zda funkční blok fbBaterie nehlásí nepovolený stav baterie a není nutné tedy okamžitě vypnout nabíjení nebo vybíjení baterie. Pokud ano, pošle příkaz k příslušnému měniči a znovu se dotazuje. Nestane-li se tak, pokračuje dál. V druhé úrovni funkční blok vyhodnocuje vstupní proměnné, to jsou zapnutí/vypnutí nabíjení nebo vybíjení a přepínání mezi nabíjením konstantním proudem nebo napětím. Zaznamená-li funkční blok na jednom ze vstupů log. 1, dochází k zapsání příslušného indexu funkce do bufferu a program pokračuje do poslední úrovně. V poslední úrovni dochází ke čtení bufferu a zaslání příslušného příkazu na výstup bloku, je-li ale buffer prázdný, funkční blok pošle příkaz pro čtení dat z měniče. V obou případech se vrací cyklus zpět na začátek.

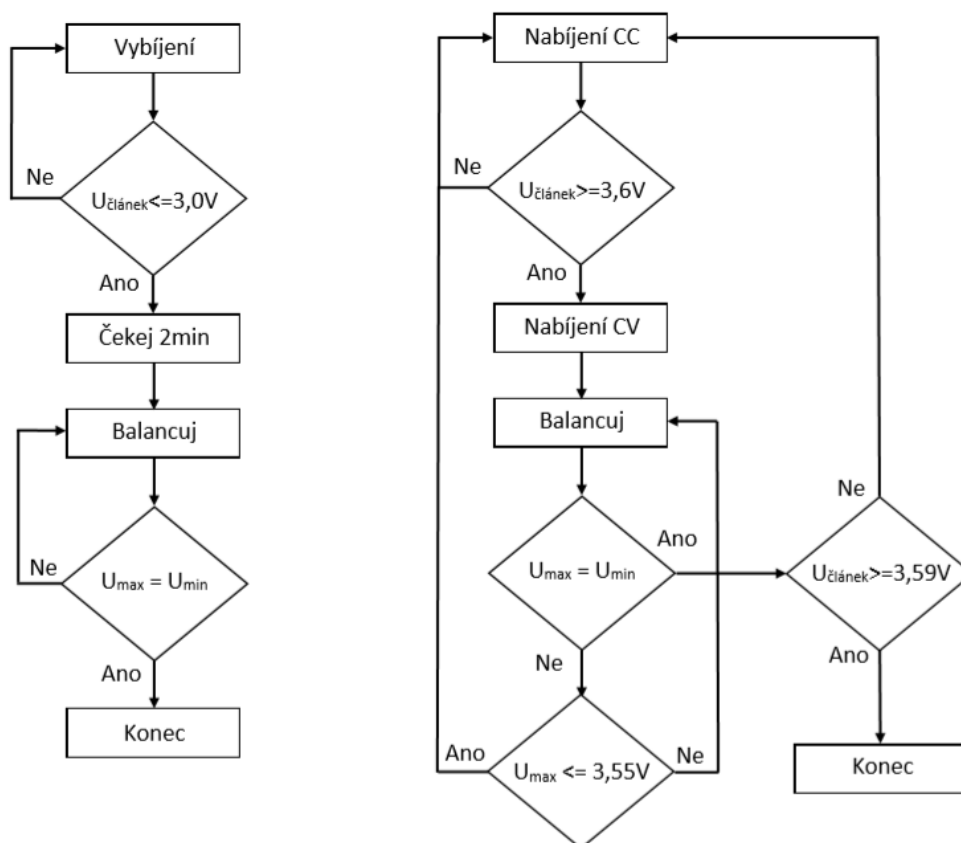
Pro automatické ovládání měničů pro nabíjení a vybíjení baterie, za účelem otestování navržených algoritmů, byl také vytvořen funkční blok fbTestAlgoritmus. Ten podle požadavků nastavuje vstupní proměnné bloku fbRegulátor a stará se tak o automatický chod programu.



Obrázek 10. Funkční blok fbRegulátor

### 3. Algoritmy

Jak bylo napsáno v kapitole 1.7.2. Balancování, pro balancování LiFePO<sub>4</sub> článků podle naměřeného napětí na elektrodách, je vhodné zvolit krajní meze cyklu baterie, při kterých dochází v závislosti na změně SOC k nejvyšší změně napětí. Balancování je tedy prováděno na úroveň vybití a na úroveň nabití. Pro zkrácení doby balancování na úroveň nabití byly navrženy ještě dva doplňující algoritmy, které mají pomoci k zrychlení balancování. Všechny navržené algoritmy byly testovány při pasivním balancování.



a) balancování na úroveň vybití

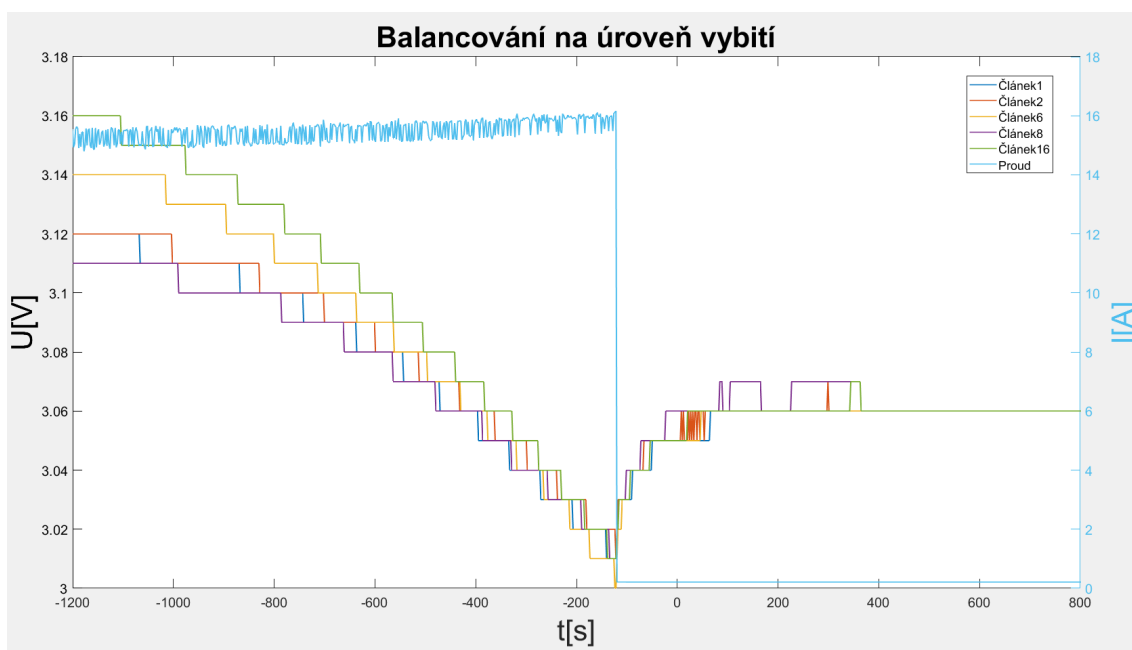
b) balancování na úroveň nabití

Obrázek 11. Algoritmy balancování na úroveň vybití a nabití

### 3.1 Balancování na úroveň vybití

Některé aplikace stacionárních úložišť slouží jako odkladiště přebytků energie. Příkladem těchto aplikací je hybridní fotovoltaický systém. Baterie, které tento systém využívají, jsou většinu svého života na hranici vybití. Přes den jsou za pomoci fotovoltaických panelů, které získávají energii ze slunečního svitu, přebytečnou energií nabíjeny, aby mohla být energie využita v pozdějších denních hodinách, kdy výkon panelů klesá, nebo je nulový. Pro tento typ aplikací je vhodné využívat balancování na úroveň vybití. Grafické schéma algoritmu lze vidět na Obrázku 11.

Baterie je vybíjena, dokud některý z článků nedosáhne minimální povolené hodnoty napětí. Po vybití systém čeká 2 minuty, během kterých dochází k elektrochemickým procesům v baterii a napětí článků mírně vzroste na úroveň OVC. Následně jsou pomocí paralelně zapojeného odporu články s vyšším napětím, než je hodnota nejnižšího napětí článku, vybíjeny, a dochází k vyrovnání jejich napětí. Průběh balancování lze vidět na Obrázku 12.

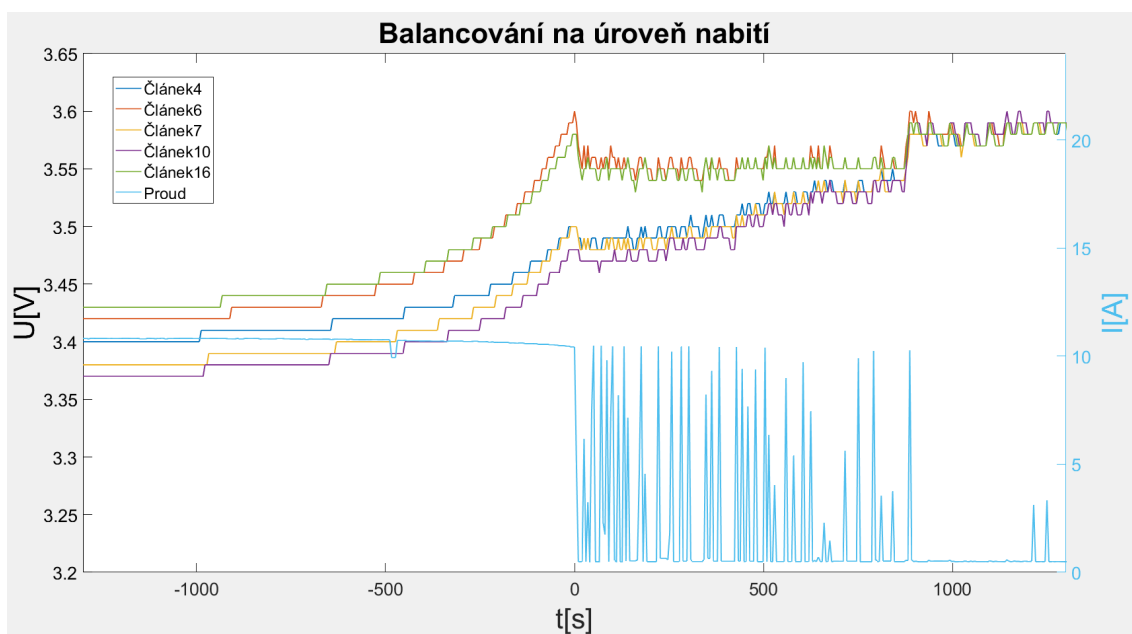


Obrázek 12. Graf balancování na úroveň vybití

## 3.2 Balancování na úroveň nabití

Úložiště používané jako UPS, nebo úložiště v přenosných zařízeních, jsou vždy maximálně nabíjena, aby po následném výpadku dodávky energie či odpojení od napájecího kabelu byla schopna dodávat požadovaný výkon po co nejdelší dobu. Po obnovení dodávky elektrické energie či dokončení úkonu a zapojení přenosného přístroje do napájení je baterie znovu maximálně dobíta. K úplnému vybití baterie zpravidla vůbec nedochází, je tedy balancování na úroveň vybití v tomto případě nevhodné použít. Pro balancování u takovýchto aplikací je vhodné použít balancování na úroveň nabití.

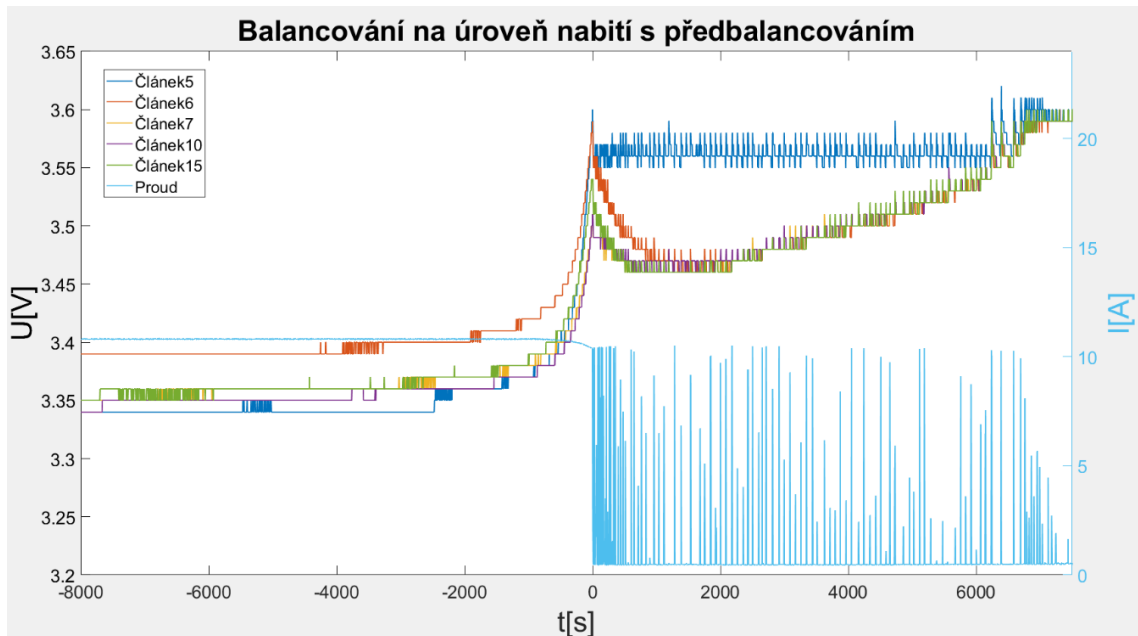
Jak je znázorněno na Obrázku 11, baterie je nabíjena konstantním proudem, dokud jeden z článků nedosáhne maximálního povoleného napětí, v tomto případě dochází k přechodu do nabíjení konstantním napětím. Nabíjecí proud baterie klesá a napětí je měničem udržováno na konstantní hodnotě. Na testovaném hardwaru je možné udržování konstantního napětí pouze celé baterie. Při dosažení maximálního napětí jednoho z článků baterie tedy neodpovídá hodnota napětí baterie maximální možné hodnotě a při balancování by články vlivem rozbalancování byly balancovány na nižší hodnotu, nežli je nastavená hodnota 3,6 V. Z toho důvodu je po poklesu napětí článku s nejvyšší hodnotou na hodnotu 3,55 V nebo dojde-li k vybalancování článků na nižší úroveň nežli 3,6 V, znovu umožněno nabíjení baterie mimo režim konstantního napětí.



Obrázek 13. Graf balancování na úroveň nabití

### 3.3 Balancování na úroveň nabití s balancováním při nabíjení

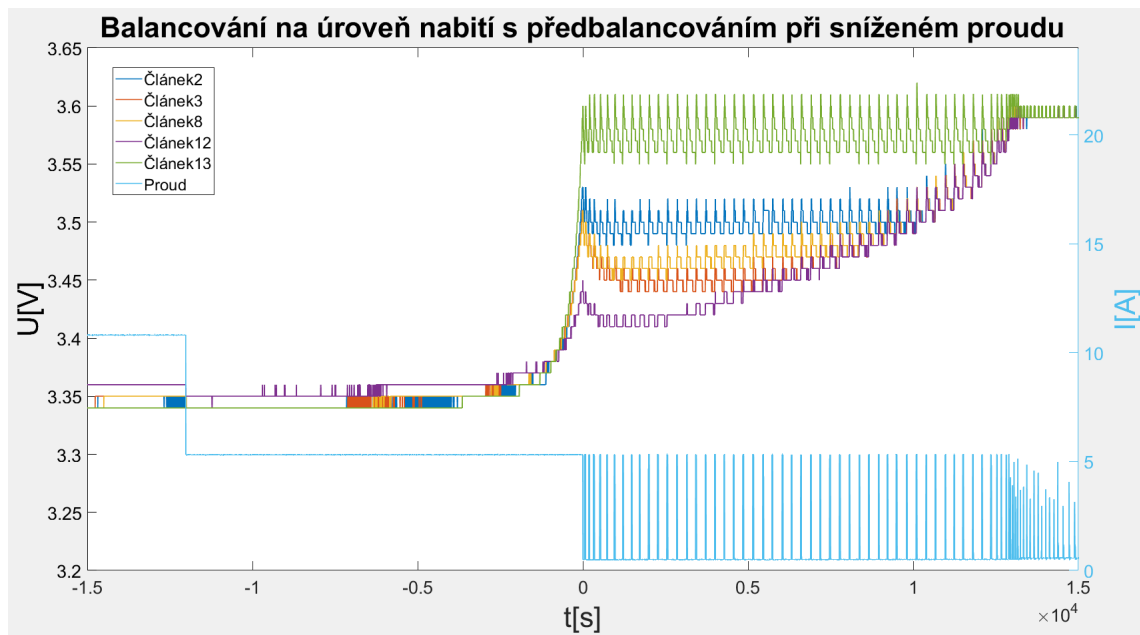
Pro zkrácení doby balancování na úroveň nabití byl navržen algoritmus, který vychází z předchozího algoritmu, je ale doplněn o balancování v průběhu nabíjení konstantním proudem. Překročí-li článek hranici 80 % své kapacity a jeho napětí je vyšší, nežli napětí článku s nejnižší hodnotou, centrální jednotka vyše informaci a dojde k balancování článku. Při nabíjení je velikost napětí článků ovlivněna vnitřním odporem ( $U_{\text{cell}} = U_{\text{ovc}} + R_i \cdot I$ ), který zvyšuje napětí baterie. Článek, který je balancován, nemusí mít větší napětí způsobené větším akumulovaným nábojem, ale může mít jen větší vnitřní odpor a místo k balancování článků tak může docházet k rozbalancování. K tomuto jevu může docházet hlavně u nabíjení při vyšších proudech. Celý algoritmus je zobrazen na Obrázku 16.



Obrázek 14. Graf balancování na úroveň nabití s předbalancováním

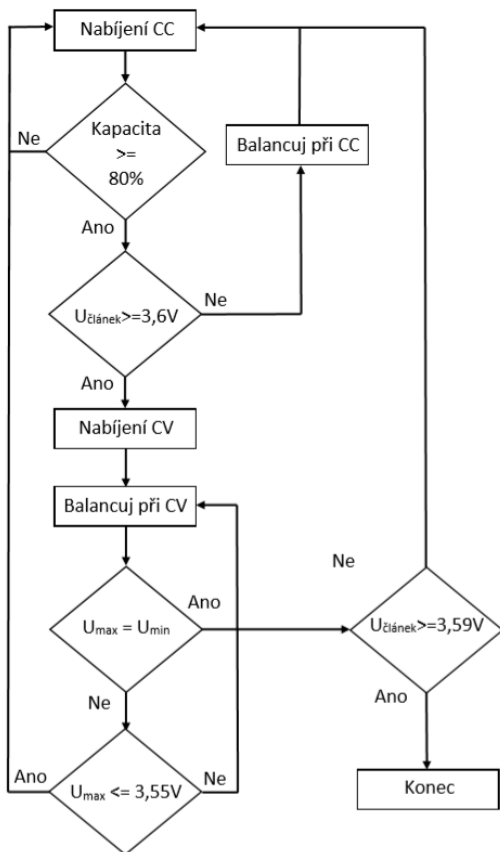
### 3.4 Balancování na úroveň nabití s balancováním při nabíjení sníženým proudem

Se snahou předejít rozbalancování při balancování v průběhu nabíjení, byl předchozí algoritmus upraven tak, že při dosažení hranice 80 % kapacity dochází k balancování článku, ale zároveň dochází ke snížení nabíjecího proudu, čímž klesá napětí způsobené vnitřním odporem článků baterie a snížení pravděpodobnosti nechtěného rozbalancování. Graficky znázorněný algoritmus lze vidět na Obrázku 16, průběh balancování je znázorněn na Obrázku 15.

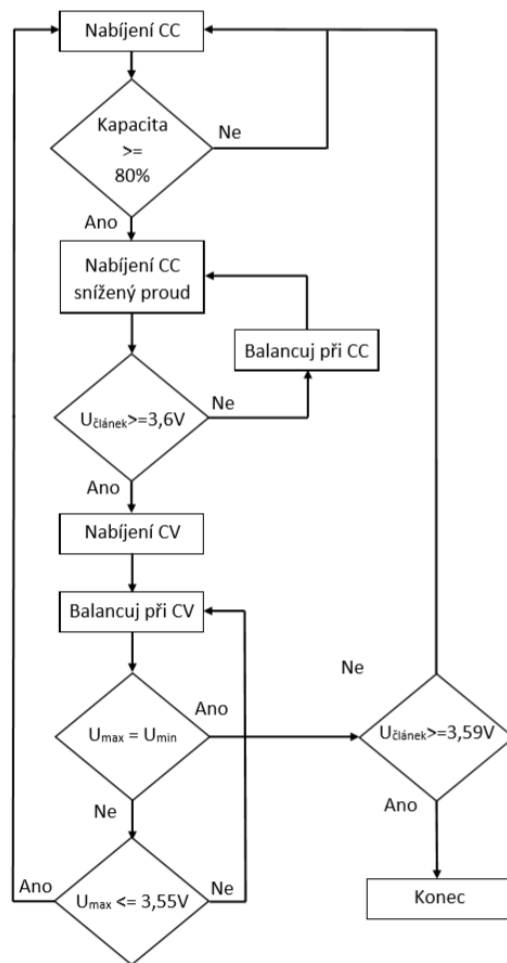


Obrázek 15. Graf balancování na úroveň nabití s předbalancováním 2





a) s balancováním při nabíjení konstantním proudem



b) s balancováním při nabíjení se sníženým proudem

Obrázek 16. Algoritmy balancování na úroveň nabití s předbalancováním

## **3.5 Měření**

### **3.5.1 Podmínky měření**

Při testování navržených algoritmů byl využit výše popsany hardware. Na vstup FOTO CHARGER 48 DC byl místo fotovoltaických panelů připojen autotransformátor, jehož výstup byl usměrňovačem přeměněn na stejnosměrný proud. Z důvodů maximálního povoleného zatížení využívaného usměrňovače byl maximální nabíjecí proud omezen na 11 A. Pro vybíjení baterie byl na výstup FOTO CONTROL 1f 230/48 DC připojen přímotop s maximálním odběrem 25 A.

### **3.5.2 Provedená měření**

Naměřená data odpovídají balancování po jednom cyklu baterie. Baterie byla při realizaci balancování na úroveň vybití nejdříve vybalancována na úroveň vybití, poté byla nabita a v poslední řadě byla vybita a znovu balancována. Opačný postup platil u realizace balancování na úroveň nabití, baterie byla nabita a vybalancována, poté vybita a znovu nabita a balancována podle zvoleného algoritmu.

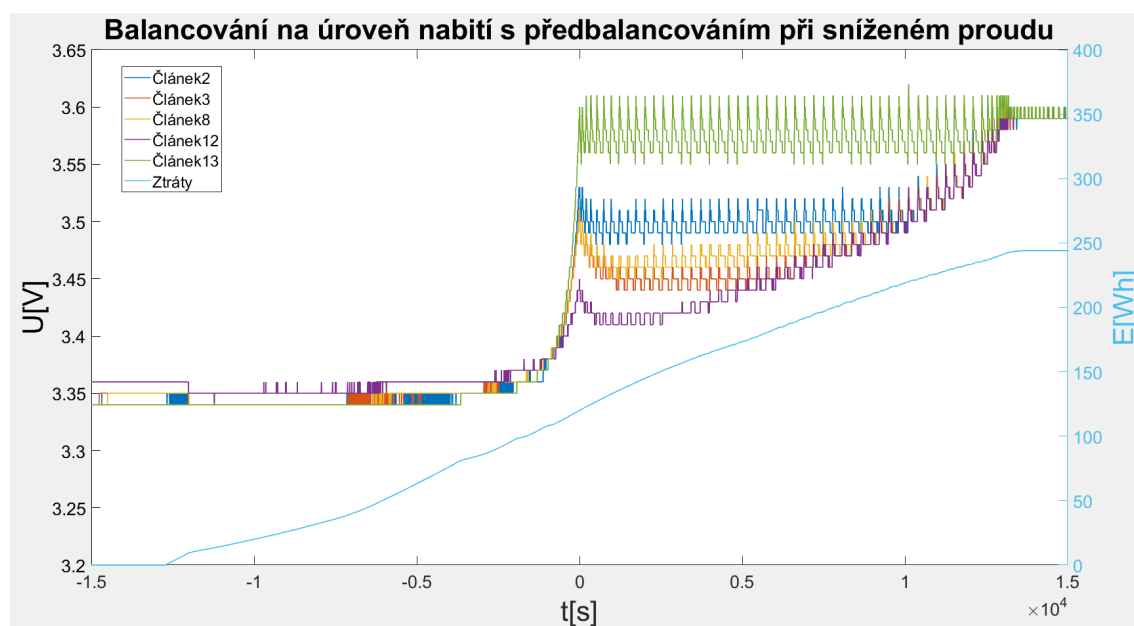
V Tabulce 5 lze pozorovat hodnoty jednotlivých měření. Měření 1 a 2 představují balancování na úroveň vybití, při měření 1 bylo vybíjení baterie prováděno proudem 15 A, u měření 2 byl vybíjecí proud 25 A. Měření 3 a 4 jsou algoritmy balancování na úroveň nabití s balancováním při nabíjení konstantním napětím. U měření 3 byl nabíjecí proud 5,5 A, u měření 4 byl nabíjecí proud 11 A. Poslední dvě měření jsou algoritmy balancování na úroveň nabití s předbalancováním. Měření 5 je algoritmus s balancováním po dosažení 80 % kapacity při nabíjecím proudu 11 A. Měření 6 je algoritmus s balancováním po dosažení 80 % kapacity se sníženým proudem. Po dosažení 80 % kapacity byl nabíjecí proud snížen z 11 A na polovinu (5,5 A). Měření bylo u každého algoritmu provedeno třikrát a výsledná data v tabulce tvoří průměrnou hodnotu naměřených dat.

Tabulka 5. Naměřená data

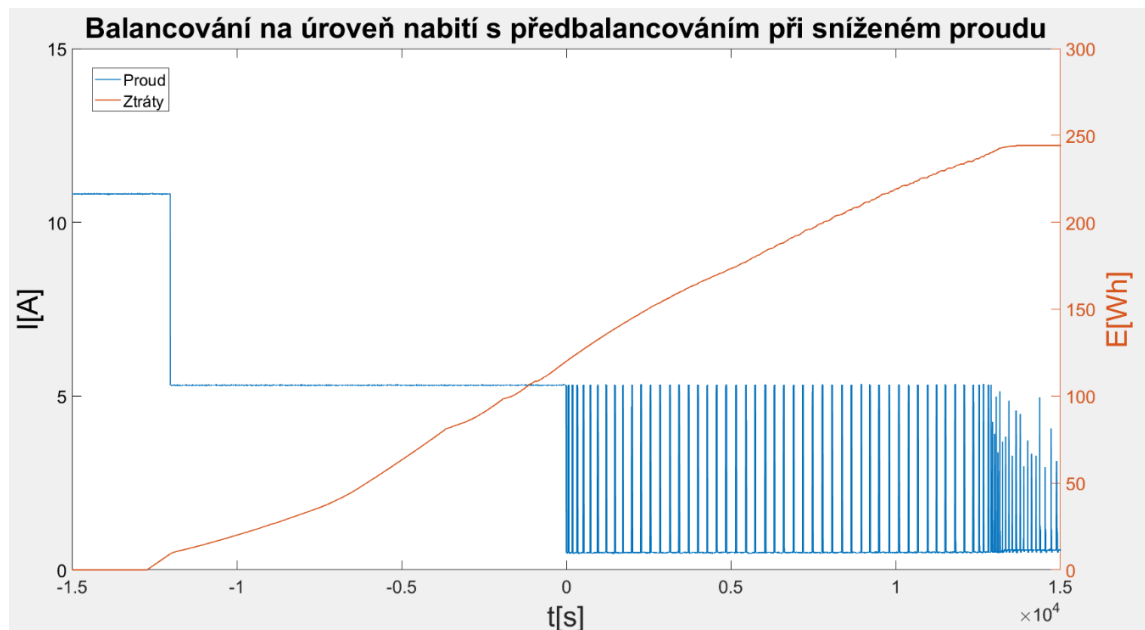
Měření	Doba nabíjení/vybíjení	Doba balancování	Celková doba	Ztráty [Wh]
1	5h 40m 14s	6m 11s	5h 48min 25s	1,21
2	3h 20m 42s	3m 33s	3h 24m 15s	1,53
3	18h 47m 4s	33m 26s	19h 20min 30s	21,4
4	8h 43m 28s	21m 25s	9h 4m 52s	13,8
5	8h 43m 23s	2h 0m 21s	10h 43m 44s	146,4
6	10h 31m 33s	3h 46m 56s	14h 18m 30s	244,2

### 3.5.3 Zhodnocení provedeného měření

Při testování algoritmů byl dán důraz na dobu potřebnou k vybalancování a na ztráty energie při balancování článků, která se měnila přes paralelně připojený odpor na teplo. Na Obrázku 17 je zobrazen průběh ztrát energie v závislosti na čase u algoritmu balancování na úroveň nabití s balancováním od 80 % kapacity baterie při nabíjení se sníženým proudem. Na grafu lze také sledovat vývoj balancování článků. Na Obrázku 18 je zobrazena také závislost ztrát energie na čase, s ní je zde ale vidět i závislost nabíjecího proudu. Na grafu je patrné, že k balancování dochází dříve, než ke snížení nabíjecího proudu. Tato doba je způsobena zpožděnou reakcí DC/DC měniče.



Obrázek 17. Graf ztrát energie balancováním



Obrázek 18. Graf ztrát energie balancováním 2

Z naměřených dat můžeme konstatovat, že nejlepším z navržených algoritmů pro použitý hardware s pasivním balancováním je algoritmus balancování na úroveň vybití. Doba balancování se pohybuje okolo 5 min, zásluhou toho dosahují ztráty energie hodnoty menší než 2 Wh na cyklus. K nízkým ztrátám pomáhá i hodnota napětí článků na úrovni vybití a nulový proud. U vybíjení 15 A lze pozorovat větší ztráty, ale kratší čas balancování, než u vybíjení proudem 25 A. U vybíjení nižším proudem nedošlo k rozbalancování tolika článků, ale jednotlivé články měly větší rozdíly náboje, tím pádem trvalo delší dobu jejich vybalancování. Jelikož ale bylo balancováno méně článků, hodnota energie přeměněné na teplo byla i přesto menší.

Balancování na úroveň nabití trvalo mezi 20-35 minutami v závislosti na nabíjecím proudem. Při nabíjení vyšším proudem 11 A nedošlo k takovému rozbalancování baterie a balancování probíhalo rychleji a tedy i s nižšími ztrátami.

U navržených algoritmů s předbalancováním, pro rychlejší balancování, nedošlo k rychlejšímu balancování, ale k rozbalancování, které způsobil vnitřní odpor článků ( $U_{\text{cell}} = U_{\text{ovc}} + R_i \cdot I$ ). Tím se zvýšila doba balancování i ztráty. Jak se ukázalo i u prvního algoritmu balancování na úroveň nabití při nabíjení nižším proudem, nedošlo k menšímu rozbalancování, ale naopak k většímu. Zároveň zásluhou nižšího nabíjecího proudu došlo k prodloužení doby nabíjení a tedy i delší době balancování a tím i k vysokým ztrátám.

Využití pasivního balancování je tedy dobré pro aplikace, které umožňují balancování na úroveň vybití. Příkladem mohou být hybridní fotovoltaické systémy, kde je přes den baterie nabíjena přebytečnou energií z fotovoltaický panelů a ve večerních hodinách je nahromaděná energie spotřebou domácnosti vybita a přes noční hodiny je ponechána na úrovni vybití a je tedy možné ji balancovat.

Možné je i využití pro aplikace typu UPS a balancování na úroveň nabití. Nedochozí tak k vysokým ztrátám, a pokud bude systém využíván občasně, ztráty balancováním nemusí být tak velké a jednodušší a levnější pasivní balancování může být dostačující.

Pasivní balancování při nabíjení se ukázalo jako nevhodné a výsledné hodnoty ukazují, že se jedná o neefektivní algoritmus balancování. Chce-li ale uživatel balancovat baterie při nabíjení, měl by využít aktivní balancování, kde je snaha o zamezení ztrát a nadbytečný náboj z článku je předán článkům s nižší hodnotou náboje. Pro balancování článků během nabíjení je možné využít také balancování podle vypočtené hodnoty SOC. Tato technika ale vyžaduje sofistikované výpočty a je vhodná především pro aplikace využívající umělou inteligenci.

## Závěr

V úvodu práce se čtenář seznámil se základními aplikacemi bateriových úložišť a typy baterií. Jednotlivé typy baterií jsou zde rozebrány, popsána jejich vhodnost využití pro stacionární úložiště. Největší pozornost v práci je věnována článkům  $\text{LiFePO}_4$ , které vykazují velkou hustotu energie, velké vybíjecí proudy, dlouhou životnost, ale i bezpečnost, která je pro stacionární úložiště důležitá. Čtenář se též seznámí se základními zkratkami, používanými při práci s bateriemi, zjistí jejich význam i postup dosažení hodnot, které reprezentují. Pro správné řízení baterií je důležitý Battery Management System. V práci je popsána jeho funkce hlídání bezpečného provozu baterie, se zaměřením především na balancování článků, kterému se věnuje praktická část.

V praktické části práce je popsán hardware, na kterém byl testován vytvořený program a algoritmy pro balancování článků baterie. Vytvořený program se stará o správu baterií, zamezuje jejich přebití a podbití a hlídá jejich správnou teplotu. Uživateli nabízí sledování naměřených hodnot a s pomocí výpočtů i sledování stavu nabití baterie. Hlavním cílem práce bylo navržení algoritmů pro balancování článků baterií. Jednotlivé algoritmy jsou zde popsány a otestovány. Z naměřených dat bylo zjištěno, že pro pasivní balancování, které bylo použito při testování algoritmů, vychází nejlépe balancování na úroveň vybití. Plně nevhodné vyšlo pasivní balancování při nabíjení konstantním proudem, při kterém docházelo k rozbalancování.

Zhotovené funkční bloky programu byly při testování algoritmů balancování otestovány a jsou připraveny pro testování v reálném hybridním fotovoltaickém systému. Pro zhotovený funkční blok realizující Battery Management System byly pro balancování vybrány algoritmy balancování na úroveň vybití a nabití. Uživatel podle aplikace může nastavením vstupní proměnné vybrat vhodný algoritmus.

## Seznam použité literatury

- [1] C. D. Ranh a C.-Y. WANG, Battery systems engineering, Chichester: Wiley, 2013.
- [2] „Co je UPS?“, Critical, s.r.o., [Online]. Dostupné na:  
<https://www.ups-cz.cz/co-je-ups.html>.
- [3] „How does the Lead Acid Battery Work“, Cadex Electronics Inc., 30 5 2019.  
[Online]. Dostupné na:  
[https://batteryuniversity.com/learn/article/lead\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries).
- [4] J. P. Doc. Ing. Hammerbauer , „Olovněné akumulátory“, [Online]. Dostupné na:  
<http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>.
- [5] „Nickel-based Batteries“, Cadex Electronics Inc., 25 2 2020. [Online]. Dostupné na:  
[https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries).
- [6] „Types of Lithium-ion“, Cadex Electronics Inc., 10 7 2019. [Online]. Dostupné na:  
[https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion).
- [7] Redakce, „cnews.cz“, Mladá fronta a. s., 15 4 2011. [Online]. Dostupné na:  
<https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>.
- [8] R. Beckers, „Solacity“, Solacity Inc. , [Online]. Dostupné na:  
<https://www.solacity.com/how-to-keep-lifepo4-lithium-ion-batteries-happy/>.
- [9] PowerStream, „How to charge Lithium Iron Phosphate Rechargeable Lithium Ion Batteries“, PowerStream Technology, 31 7 2019. [Online]. Dostupné na:  
<https://www.powerstream.com/LLLF.htm>.
- [10] G. L. PLETT, Battery management systems. Volume II, Equivalent-circuit methods, Boston: Artech House, 2016.
- [11] K. Scott a S. Nork, „Passive Battery Cell Balancing“, Analog Devices, [Online].  
Dostupné na:  
<https://www.analog.com/en/technical-articles/passive-battery-cell-balancing.html>.

- [12] K. Scott a S. Nork, „Active Battery Cell Balancing,“ Analog Devices, [Online].  
Dostupné na:  
<https://www.analog.com/en/technical-articles/active-battery-cell-balancing.html>.
- [13] PowerStream, „How does capacity correlate with charge voltage for lithium ion batteries?,“ PowerStream Technology, 31 7 2020. [Online]. Dostupné na:  
<https://www.powerstream.com/lithium-ion-charge-voltage.htm>.
- [14] J. Xie, J. Ma a J. Chan, „Peukert-Equation-Based State-of-Charge Estimation for LiFePO4 Batteries,“ School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Harbin, 2018.
- [15] „FOTO CHARGER DC 48,“ Vonsch, [Online]. Dostupné na:  
[https://www.vonsch.sk/produkty/fotocharger\\_dc48.php?lang=sk](https://www.vonsch.sk/produkty/fotocharger_dc48.php?lang=sk).
- [16] „FOTO CONTROL 1f 230/48 DC,“ Vonsch, [Online]. Dostupné na:  
[https://www.vonsch.sk/produkty/fotocontrol\\_1f\\_23048.php?lang=sk](https://www.vonsch.sk/produkty/fotocontrol_1f_23048.php?lang=sk).