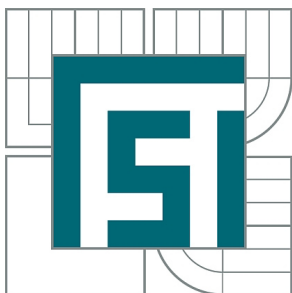


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO POWER HIL SIMULACI LI-POL ČLÁNKU

DESIGN OF POWER HIL UNIT FOR LI-POL CELL SIMULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL PRIBULLA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN CHALUPA

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Daniel Pribulla

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh zařízení pro Power HIL simulaci Li-pol článku

v anglickém jazyce:

Design of Power HIL unit for Li-pol cell simulation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V době nárůstu jednoduchých autonomních elektronických systémů, často bezdrátových, je nutné použití bateriového napájení. Proto je nezbytné, aby designéři těchto zařízení měli možnost rychle a kvalitně testovat vlastnosti systému v závislosti na okolních vlivech. Pokud jsou baterie provozovány v nepříznivých podmínkách, dochází k degradaci jejich parametrů. V praxi je degradace článku relativně dlouhodobá záležitost, proto je vhodné použít simulátoru, a vysledovat vliv degradace článku na napájený systém, v uživatelem definovaném čase. Nahrazení reálné baterie elektronických zařízení, umožní rychlejší, automatizované a efektivnější testování.

Vstupem do matematického modelu článku je jeho teplota, nabíjecí/vybíjecí proud. Výstupem modelu je nabíjecí/vybíjecí proud, hodnota vnitřního odporu, elektromotorické napětí, odhadovaná kapacita a životnost článku.

Cíle bakalářské práce:

Hlavním výstupem práce má být hardwarový simulační nástroj, který nahradí nabíjecí Li-pol článek o kapacitě 10-1500mAh. Jako simulační prostředí použijte Matlab/Simulink. Pro připojení k reálnému zařízení využijte kartu MF624.

1. Proved'te rešerši na téma Li-pol články a jejich použití v praxi.
2. Vytvořit matematický model Li-pol článku.
3. Softwarová simulace pro ověření koncepce Li-pol emulátoru (použití SimElectronics).
4. Na základě bodu 3 navrhnout vhodné hardwarové řešení výkonové části obvodu, snímání proudu a napětí. Zařízení zkonstruujte.
5. Testování daného hardware pro stavy nabíjení/vybíjení.
6. Simulace celého životního cyklu článku v krátkém časovém úseku, kde bude definován proměnný profil zatížení.
7. Vytvořte Realtime GUI pro nastavování aktuálních parametrů Li-pol emulátoru.

Seznam odborné literatury:

- [1] ARENDÁŠ, M., RUČKA, M. Nabíječky a nabíjení. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2002, 112 stran, ISBN 80-86056-61-9.
- [2] NOVOTNÝ, V.: Napájení elektronických zařízení. Skriptum. Brno: VUT FEI v Brně, 1999.
- [3] JUNG, W. Op Amp Applications Handbook. Burlington (USA): Newnes (Elsevier), 2005.
- [4] KREJČÍŘÍK, A. Napájecí zdroje I, II, III. Praha: BEN – technická literatura, 1999
- Katalogové listy výrobců baterií

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Chalupa

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá návrhom a realizáciou Power-HIL simulátora Li-po článku, slúžiaceho na testovanie napájania malých bezdrôtových modulov. Základom simulátora je model akumulátora, ktorý zahŕňa vplyv teploty a degradácie na parametre článku. Na vývoj zariadenia a simulácie bolo použité prostredie Matlab Simulink. Parametre modelu batérie boli určené na základe sérií meraní reálneho článku s kapacitou 250mAh pri rôznych teplotách. Za účelom merania bola zostrojená tepelná komora. Výkonová elektronika zariadenia bola navrhnutá na základe simulácií v knižnici Matlab Simulink SimScape. Výsledkom práce je funkčný simulátor otestovaný pre simuláciu nabíjania a vybíjania batérií s kapacitou 100-1500 mAh. Simulátor je možné ovládať pomocou grafického užívateľského rozhrania, ktoré umožňuje zadávať parametre akumulátora a sledovať priebehy veličín modelu v reálnom čase.

Kľúčové slová

PHIL simulátor, Li-po akumulátor, degradácia, teplota, real-time simulácia, výkonová elektronika, GUI

Abstract

This thesis deals with design and construction of a Li-po cell Power-HIL simulator intended for testing of a small wireless module's powering. The simulator is based on a battery model which includes the influence of temperature and battery degradation on battery parameters. To estimate model parameters a series of tests on real Li-po cell with capacity 250mAh were performed. Charging and discharging tests were performed by different temperatures of the battery. In purpose of this test a simple thermal chamber was constructed. Design of the power electronics of the device was tested in the Simscape library of the Matlab Simulink. The result is a working prototype of the simulator tested for charging and discharging of batteries with capacity in range 100-1500 mAh. The simulator can be controlled with graphical user interface capable of setting the battery parameters and real time observation of the model variables.

Keywords

PHIL simulator, Li-po battery, battery degradation, temperature effect, real-time simulation, power electronics, GUI

Bibliografická citácia práce:

PRIBULLA, D. *Návrh zařízení pro Power HIL simulaci Li-pol článku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Chalupa.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že bakalársku prácu som vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité zdroje a literatúru.

V Brne dňa

.....

Daniel Pribulla

Pod'akovanie

Chcel by som poďakovať všetkým ľuďom, ktorý mi pomáhali pri tvorbe bakalárskej práce, predovšetkým vedúcemu práce Ing. Jánovi Chalupovi.

Ďakujem tiež svojim rodičom, za podporu počas doterajšieho štúdia a cenné pripomienky k písaniu práce.

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Ciele práce.....	11
3 Li-ion články a ich použitie v praxi.....	12
3.1 Batérie.....	12
3.2 Lítiové batérie.....	12
3.2.1 Princíp činnosti.....	13
3.2.2 Nabíjanie.....	14
3.2.3 Vybíjanie.....	16
3.2.4 Závislosť parametrov akumulátora od teploty	17
3.2.5 Degradácia.....	17
3.2.6 Samovybíjanie batérií.....	19
3.2.7 Typy lítiových batérií.....	20
3.2.8 Konštrukcia	21
3.2.9 Porovnanie Li-ion a oloveného akumulátora.....	22
3.3 Modelovanie akumulátorov.....	24
3.3.1 Empirické modely.....	24
3.3.2 Modely elektrochemického inžinierstva.....	24
3.3.3 Multifyzikálne modely.....	25
3.3.4 Elektrické veličiny charakterizujúce stav batérie.....	25
3.3.5 Javy ovplyvňujúce vlastnosti akumulátora.....	27
3.3.6 Elektrické modely Li-ion akumulátorov.....	28
3.3.7 Modelovanie degradácie Li-ion akumulátora.....	30
4 Analýza problému.....	31
4.1 Elektrický model.....	31
4.2 Model degradácie.....	32
4.3 Výber hardvérového riešenia.....	32
4.3.1 Zdroj napätia	33
4.3.2 Snímač prúdu.....	33
4.3.3 Meracia karta.....	34
4.3.4 Overenie hardvérovej koncepcie SimScape®.....	35
5 Výsledky, realizácia.....	36
5.1 Implementácia modelu do prostredia Simulink®.....	36
5.2 Identifikácia parametrov modelu.....	37
5.2.1 Metodika určenia parametrov batérie.....	37
5.2.2 Určenie vplyvu teploty na parametre batérie.....	38
5.2.3 Určenie parametrov modelu degradácie.....	39
5.3 Výsledky merania.....	40
5.4 Testovanie simulátora pre stavy nabíjania a vybíjania.....	45
5.5 Tvorba real-time grafického užívateľského rozhrania.....	46
6 Záver.....	47
7 Použitá literatúra.....	49
8 Prílohy.....	52

1 Úvod

Batérie s technológiou Li-ion nahradili za po posledných 15 rokov dovtedy používané technológie takmer vo všetkých aplikáciách. V porovnaní s inými technológiami nabíjajúcich batérií sú ich vlastnosti výrazne lepšie, čo umožnilo rozvoj prenosných bezdrôtových elektrických zariadení (mobilné telefóny, notebooky, lekárske prístroje) ako aj elektromobilizmu, najmä z dôvodu zvýšenia hustoty energie batérií. Technológia Li-ion umožňuje vyrábať zariadenia z dostatočnou výdržou a nízkou hmotnosťou. Konštruktéri potrebujú často testovať batériové napájanie týchto zariadení a vplyv používania na jeho vlastnosti. Pri tom je zvyčajne nutné simulovať aj extrémne situácie a podmienky, v ktorých sa môže zariadenie vyskytnúť, napríklad extrémne nízka, alebo vysoká teplota zariadenia, vysoké prúdové odbery alebo cyklické namáhanie batérie. Pri vývoji zariadení je tiež nutné skúmať vplyv degradácie batérií na ich napájanie. Keďže deje, ako napr. degradácia, sú veľmi pomalé, testovanie na reálnej batérii zaberá veľa času. Riešením tohto problému môže byť nahradenie batérií Power-HIL simulátorom. *HIL (Hardware-In-the Loop)* je zariadenie, ktoré emuluje senzorické signály, ktoré sú za normálnych podmienok snímané v reálnej sústave [1]. Tieto signály sú generované na základe modelu sústavy, ktorý je spustený v riadiacom jadre simulátora. Zariadenie Power-HIL je navyše doplnené o výkonovú elektroniku a reálne senzory. Dôležité je, aby testované zariadenie nedokázalo rozlíšiť, či je napájané pomocou Power-HIL simulátora, alebo reálnou batériou [1].

2 Ciele práce

Cieľom tejto práce je vytvoriť Power-HIL simulátor Li-po článku určeného na testovanie drobnej elektroniky. Simulátor má pracovať na základe modelu batérie. Model batérie je potrebné vytvoriť a overiť jeho parametre na základe reálnej batérie. Model by mal zohľadňovať vplyv teploty a degradáciu batérie. Na ovládanie simulátora je potrebné vytvoriť grafické užívateľské rozhranie.

3 Li-ion články a ich použitie v praxi

3.1 Batérie

Batéria je chemický zdroj elektrického prúdu. Batérie delíme na primárne a sekundárne. Primárne batérie sú určené na jednorázové použitie. Sekundárne zdroje (akumulátory) môžeme použiť opakovane, pretože chemické reakcie vo vnútri batérie môžu prebiehať oboma smermi. Akumulátor sa, ako každá batéria, skladá z katódy a anódy, ktoré sú oddelené separátorom a sú obklopené elektrolytom, ktorý umožňuje prechod iónov medzi katódou a anódou. V dôsledku oxidačno - redukčných dejov vzniká medzi oboma elektródami rozdiel elektrického potenciálu - napätie.

Základné parametre elektrických akumulátorov sú:

- elektromotorické napätie (napätie nezaťaženého článku)
- nominálne napätie (napätie nezaťaženého článku pri 50% stave nabitia)
- vnútorný odpor (odpor batérie prejavujúci sa pri prechode el. prúdu batériou)
- kapacita batérie (kap.3.3.4)
- maximálny vybijací a nabíjací prúd (udávaný v násobkoch kapacity v Ah)

Medzi ďalšie dôležité parametre patrí:

- hustota energie (uschovaná elektrická energia na jednotku hmotnosti alebo objemu)
- rýchlosť samovybíjania
- životnosť (počet cyklov až do zničenia akumulátora)

3.2 Lítiové batérie

Lítium má veľmi dobré predpoklady na použitie v batériách, pretože má najvyšší elektrochemický potenciál (-3,04 V) zo všetkých kovov. Prvé pokusy o vývoj lítiových akumulátorov sa objavili v osemdesiatych rokoch minulého storočia. Podľa vzoru nenabíjateľných lítiových batérii, ktoré vykazovali výnimočné vlastnosti, bolo ako materiál anódy použité kovové lítium. Tieto batérie boli veľmi nestabilné a dochádzalo k ich vzplanutiu počas nabíjania. Tento problém pomohlo vyriešiť nahradenie katódy oxidmi lítia. Na úkor mierneho zníženia špecifickej energie došlo k zvýšeniu bezpečnosti akumulátorov. V roku 1991 bola na trh uvedená prvá komerčne vyrábaná Li-ion batéria. Pre svoje výnimočné vlastnosti sa stala veľmi populárna a postupne vytláča ostatné typy

nabíjateľných akumulátorov. Je to najmä kvôli nasledujúcim vlastnostiam:

- vysokej hustote energie (v porovnaní s NiCd akumulátormi je dvojnásobná)
- plochej vybíjacej krivke (kap 3.2.4), čo umožňuje efektívne zužitkovanie energie
- nulovému pamäťovému efektu, ktorý u NiCd akumulátorov spôsobuje značné problémy
- pomalému samovybíjaniu, v porovnaní s NiMH (Nickel-Metal Hydride) akumulátorom
- absencii toxických kovov (olovo, kadmium)

Od uvedenia na trh prvého lítium-iónového akumulátora poklesla jeho cena približne na jednu pätinu, podarilo sa tiež zvýšiť jeho hustotu energie o cca 50% a vývoj naďalej pokračuje.

Li-ion batériu dnes nájdeme v takmer všetkých druhoch elektroniky, od mobilov a počítačov až po aplikácie vo vojenskom, leteckom priemysle, či lekárskech prístrojoch. Veľký význam majú aj pri vývoji elektromobilov.

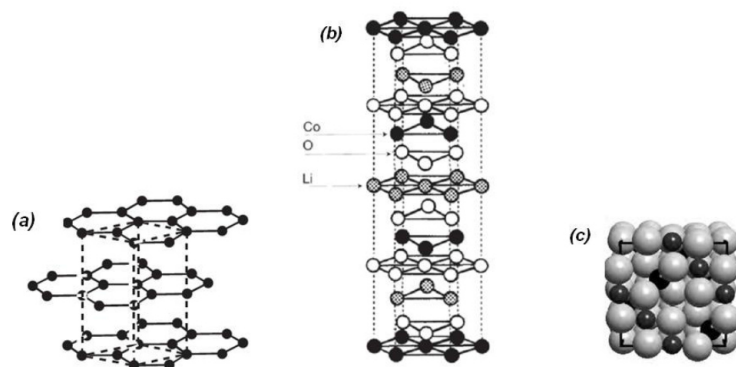
3.2.1 Princíp činnosti

V prípade lítium-iónových akumulátorov dochádza medzi elektródami pri toku elektrického prúdu k prechodu iónov lítia medzi elektródami. Počas vybíjania putujú lítiové ióny z anódy do katódy a opačne pri nabíjaní. Oxidačno - redukčné deje popisujú rovnice [22]:

- anóda: $LiCoO_2 \rightleftharpoons Li_{1-x}CoO_2 + x Li^+ + x e^-$
- katóda: $x Li^+ + x e^- + x C_6 \rightleftharpoons x LiC_6$

LiCoO₂ môžeme nahradiť aj ďalšími vhodnými oxidmi lítia. Materiál elektród lítium iónových akumulátorov je vyrobený tak, aby umožňoval interkaláciu¹ lítiových iónov v štruktúre elektród. Anódu vo väčšine typov akumulátorov tvorí vrstva grafitu, ktorá po nabití vytvorí s iónmi lítia vrstevnatú štruktúru atómov. Medzi iónmi lítia a grafitom vznikajú Van der Waalove väzby a spotrebúva sa energia. Katódu tvorí zmes obsahujúca oxid lítia a prídavné látky. Podľa druhu oxidu, má vrstva buď tunelovú, alebo vrstevnatú štruktúru atómov (Obr. 1). Táto štruktúra má opäť schopnosť interkalácie lítiových iónov.

¹ Reakcia, pri ktorej sú lítiové ióny vpravované alebo odoberané do hostiteľského materiálu, bez toho, aby dochádzalo k významným zmenám v štruktúre tohto materiálu [15].



Obr.1 Atómová štruktúra materiálov elektród: a) grafit b) LiCoO_2 , c) $\text{LiNiMn}_2\text{O}_4$ (prevzaté[15]).

V praxi sa používa niekoľko typov oxidov, čo významne ovplyvňuje vlastnosti vzniknutých akumulátorov. V batériách sa najčastejšie používajú zlúčeniny: *Li-kobalt*, *Li-mangán*, *Li-fosfát* a *Li-NMC (Li-nikel-mangán-kobalt)*. Vlastnosti batérií je možné podľa potreby upravovať rôznymi aditívami, v závislosti od konkrétnych požiadaviek.

3.2.2 Nabíjanie

Aby bola zaručená bezpečnosť používania, musia sa pri nabíjaní Li-ion akumulátorov dodržať dva základné parametre:

Maximálny nabíjací prúd I_m

Jeho hodnota v [A] je udávaná výrobcom ako n násobok kapacity batérie C v [Ah] :

$$I_m = n \cdot C \quad (1)$$

Jeho odporúčaná hodnota sa pri Li-ion batériách pohybuje medzi 0,5 - 1C. Zvýšením nabíjacieho prúdu možno do určitého štádia nabíjania skrátiť čas nabíjania, je to však kompromis medzi životnosťou a stabilitou batérie. Výrazným prekročením maximálneho nabíjacieho prúdu môže dôjsť k prehriatiu a vznieteniu batérie.

Maximálne elektromotorické napätie na jeden článok batérie

V závislosti od chemického zloženia článku je jeho hodnota 4,2 V alebo 3,6 V. Požiadavka na presnosť merania napätia článku pri nabíjaní je výrazne vyššia (± 50 mV) ako u iných typov batérií. Ak batéria obsahuje ochranný obvod, dôjde po prekročení maximálneho napätia k odpojeniu článkov od nabíjačky. Zvýšením napätia nad maximálnu hodnotu dochádza k vylučovaniu lupienkov kovového lítia na katóde a uvoľňovaniu plynného CO_2 z anódy. Pri nabíjaní zabudovaných batérií, keď je zariadenie (napr. notebook) pripojené zároveň na nabíjačku a odoberá z batérie prúd dochádza k zdanlivému poklesu napätia na článkoch, z pohľadu nabíjačky často dochádza k prebitiu akumulátora.

Najpoužívanejší spôsob nabíjania je tzv. CC-CV metóda (konštantný prúd - konštantné napätie), kedy je na začiatku nabíjania udržiavaný konštantný (odporúčaný) prúd a pri priblížení svorkového napätia k maximálnej hodnote sa udržiava táto konštantná hodnota až kým nedôjde k poklesu hodnoty nabíjacieho prúdu na určitý zlomok nominálneho nabíjacieho prúdu.

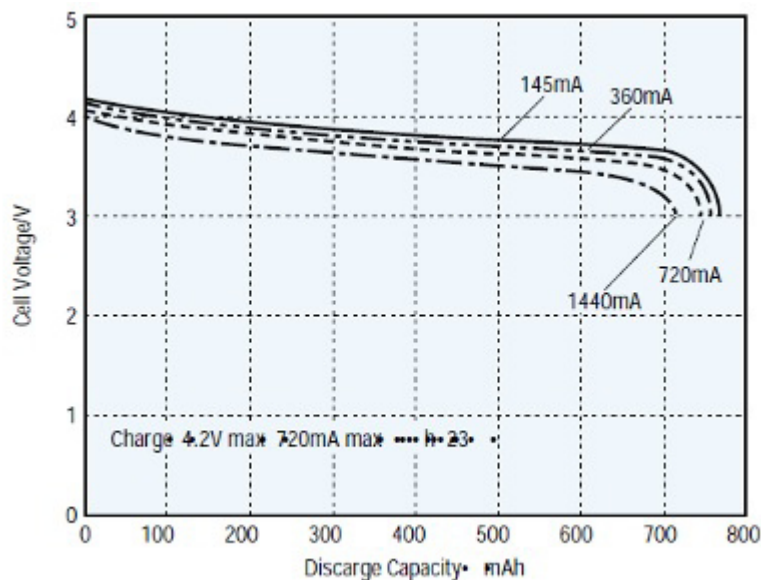
Po poklese nabíjacieho prúdu pod túto hranicu sa nedoporučuje nechávať batériu pripojenú na nabíjačku, pretože môže dochádzať k jej prebíjaniu a degradácia batérie sa výrazne zrýchľuje. Oveľa lepšie je batériu odpojiť a v pravidelných intervaloch dobíjať stratenú kapacitu.

Lítiové batérie nie je potrebné nabíjať na maximum, ako napr. olovené akumulátory, ba naopak, znížením maximálneho napätia môžeme predĺžiť životnosť batérií (na úkor zníženia stavu nabitia). Počas nabíjania sa doporučuje vypnúť zariadenie, ak je batéria jeho súčasťou, pričom nabíjanie by malo prebiehať pri izbovej teplote. Batérie sa za normálnych okolností počas nabíjania neohrievajú o viac ako 5°C .

Ak je batéria zložená z viacerých článkov, je nutné nabíjať každý článok samostatne, alebo použiť vyvažovací obvod, ktorý vyrovnáva napätia článkov počas nabíjania. Tým je zabezpečené dosiahnutie nabitia na maximálnu kapacitu a zároveň bezpečné napätie na každom z článkov[21].

3.2.3 Vybíjanie

Na obr. 2 vidíme, že lítiový článok má relatívne plochú vybíjaciú charakteristiku, pričom k výraznému poklesu napätia dochádza až na konci vybíjacieho cyklu.



Obr.2: Typický tvar vybíjacej krivky Li-ion akumulátora (prevzaté [10]).

To je výhodné, pretože väčšina zariadení je schopná pracovať v celom rozsahu napätia batérie. Pri vybíjaní je nutné dodržať dva hlavné parametre:

Maximálny vybíjací prúd

Pohybuje sa v intervale 1C - 2C pri batériách optimalizovaných pre maximálnu kapacitu až po viac ako 100C (krátkodobo) pri výkonových batériách. Prekračovaním maximálnych hodnôt dochádza nielen k prehriatiu batérií (na viac ako 100 °C), ale aj k enormnej strate kapacity a poklesu životnosti. Sofistikovanejšie ochranné obvody sú schopné obmedzovať aj vybíjací prúd.

Minimálne napätie článku

Hoci väčšina zariadení prestáva pracovať pri poklese napätia článkov pod hodnotu 3V, v dôsledku napr. samovybíjania alebo ďalšieho odberu prúdu, môže začať napätie relatívne prudko klesať. Ak je batéria vybavená ochranným obvodom, pri poklese napätia pod 2,7V dôjde k odpojeniu konektorov batérie a vypnutiu obvodu kvôli minimalizovaniu odberu. Batériu potom nie je možné kvôli ochrannému obvodu znova nabíjať cez konektor. Je možné obnoviť napätie nabíjaním priamo na vývodoch z článku, ale pri poklese pod 1,5V sa to neodporúča kvôli vylučovaniu medi vo vnútri článku a vzniku vnútorných skratov.

3.2.4 Závislosť parametrov akumulátora od teploty

Teplota má výrazný vplyv na všetky parametre a charakteristiky batérie, od jej kapacity a vnútorného odporu až po rýchlosť degradácie a samovybijania. Lítiová batéria funguje na základe chemických reakcií, pri ktorých dochádza k vzniku rozdielu potenciálu medzi elektródami. Na rýchlosť a rovnováhu chemickej reakcie vplýva najmä koncentrácia reaktantov, produktov, druh reakcie, tlak a teplota. Keďže Li-ion batéria je uzavretá sústava, jediný parameter, ktorým môžeme chovanie batérie ovplyvniť je teplota (do určitej miery aj tlak). Teplota spôsobuje posuv chemickej rovnováhy medzi reaktantami a produktami vo vnútri batérie. Túto rovnováhu popisuje Arrheniova rovnica :

$$K_{eq} = e^{-\left(\frac{\Delta G}{RT}\right)}, K_{eq} = \frac{k_r}{k_p}, \quad (2)$$

kde K_{eq} je rovnovážna konštanta, k_r je koncentrácia reaktantov, k_p koncentrácia produktov, T je teplota prostredia v °K, R univerzálna plynová konštanta a ΔG je zmena Gibbsovej (aktivačnej) energie. S rastúcou teplotou aktivačná energia potrebná na uvoľnenie a prechod iónov lítia z jednej elektródy na druhú klesá [20].

To má za následok tieto javy:

- znižovanie vnútorného odporu
- nárast kapacity
- nárast účinnosti nabíjania
- nárast elektromotorického napätia
- potlačenie relaxačných efektov (kap.3.3.5)
- zrýchlenie samovybijania
- zrýchlenie degradácie

3.2.5 Degradácia

Pod týmto pojmom rozumieme zhoršovanie vlastností batérie, najmä pokles kapacity, počas doby používania. Tento proces je závislý od veľkého množstva faktorov, preto je jeho popis zložitý. Základnou príčinou tohto deja sú nevratné chemické procesy prebiehajúce vo vnútri batérie. Medzi najvýznamnejšie z nich patria:

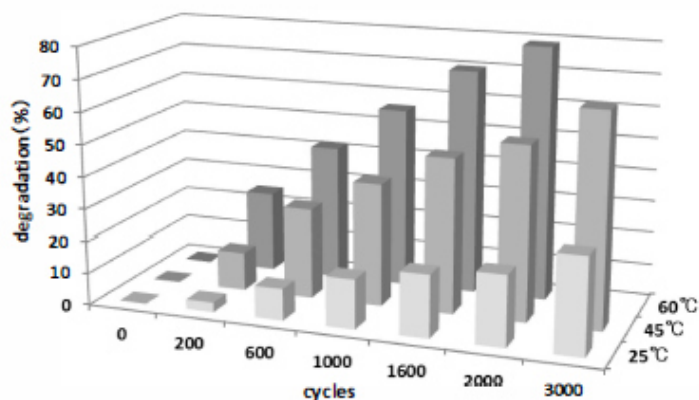
- rast interfázovej vrstvy SEI
- degradácia štruktúry batérie
- rozpúšťanie aktívneho materiálu katódy
- strata kontaktu medzi vrstvami elektród a kolektorom prúdu

Najväčší podiel na degradácii sa prikladá vzniku interfázovej vrstvy SEI (Solid electrolyte interphase) [5]. Rýchlosť týchto chemických reakcií je závislá od teploty, stavu nabitia

a veľkosti nabíjajúcich/vybíjajúcich prúdov. Tieto reakcie prebiehajú nielen počas používania batérie (nabíjanie/vybíjanie), ale aj samovoľne. Degradáciu môžeme preto rozdeliť na statickú a cyklickú.

Cyklická degradácia

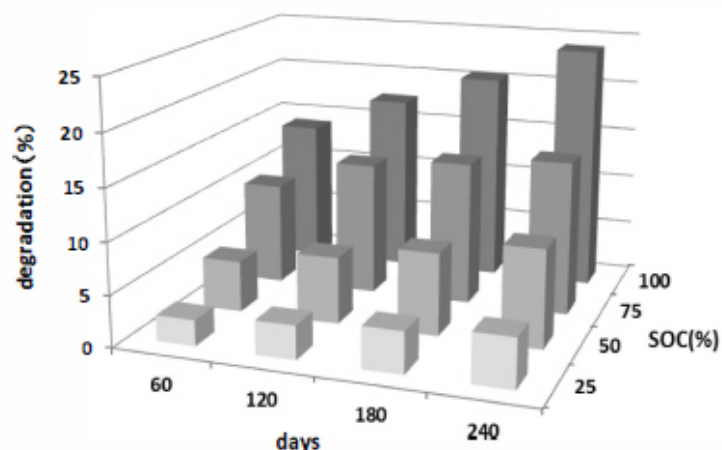
Počas nabíjania dochádza k reakcii medzi grafitovou elektródou a elektrolytom, pričom vzniká pevná vrstva uhličitanu lítneho a oxidu lítneho (SEI layer), ktorá síce zabraňuje ďalšiemu rozkladu elektrolytu, ale tiež zvyšuje elektrický odpor. Hrúbka tejto vrstvy rastie s každým cyklom batérie. Na katóde vzniká podobná vrstva, pričom je známa výrazná závislosť rýchlosti jej rastu od teploty. Batéria prevádzkovaná pri teplote 50 °C môže mať až dvakrát nižšiu kapacitu ako pri izbovej teplote (Obr. 3).



Obr.3: Závislosť degradácie batérie od počtu cyklov a teploty (prevzaté z [11]).

Statická degradácia

Dochádza k nej aj keď batéria nie je používaná. Rýchlosť degradácie je závislá hlavne od teploty a stavu nabitia počas skladovania. Batéria skladovaná pri teplote 50 °C môže za rok stratiť aj 15% z pôvodnej kapacity v porovnaní s 5% pri izbovej teplote (Obr. 4)



Obr.4: Závislosť statickej degradácie batérie od stavu nabitia SoC (vid' kap.7) a času (prevzaté z [11]).

3.2.6 Samovybíjanie batérií

Využitelná kapacita všetkých batérií postupom času klesá, aj keď medzi svorkami batérie neprechádza žiadny prúd. Tento jav je pozorovateľný v časovom intervale od niekoľkých dní až po mesiace, v závislosti od druhu batérie. Rýchlosť samovybíjania sa s časom znižuje. Primárne batérie všeobecne podliehajú menšiemu samovybíjaniu ako nabíjateľné, (napr. menej ako 10% pokles kapacity za päť rokov v prípade špeciálnych lítiových primárnych článkov). Najväčší problém predstavuje samovybíjanie pre akumulátory NiMH (pokles kapacity o 10% už po 24 hodinách, každý ďalší mesiac 10-15%). Akumulátory na báze Li-ion majú hodnotu samovybíjania 5% za prvých 24h a ďalšie 1-2% za mesiac. Väčšina Li-ion batérií obsahuje ochranný obvod, ktorý spotrebúva ďalšie 2-3% kapacity za mesiac [16].

Rýchlosť samovybíjania je závislá od niekoľkých faktorov:

- **Teplota:** rýchlosť samovybíjania u väčšiny batérií z teplotou rastie, približne dvakrát na každých 10°C
- **Degradácia batérie:** s rastúcim vekom a klesajúcou zostatkovou životnosťou sa rýchlosť samovybíjania zvyšuje
- **Spôsob používania batérie:** na rýchlosť samovybíjania vplýva aj história používania. Ak bola napríklad batéria v minulosti skratovaná, môžu sa v nej vytvoriť mikroskopické skraty. Negatívny vplyv má tiež podbitie batérie, ktoré spôsobuje výrazné chemické a mechanické namáhanie vnútornej štruktúry batérie.

3.2.7 Typy lítiových batérií

Vlastnosti lítiovej batérie sa do veľkej miery odvíjajú od použitého materiálu katódy. Orientačné hodnoty základných parametrov akumulátorov v závislosti od materiálu katódy sú zhrnuté v tab. 1.

Tab.1: Porovnanie charakteristík Li-ion batérií s rôznym zložením katódy (prevzaté z [17]).

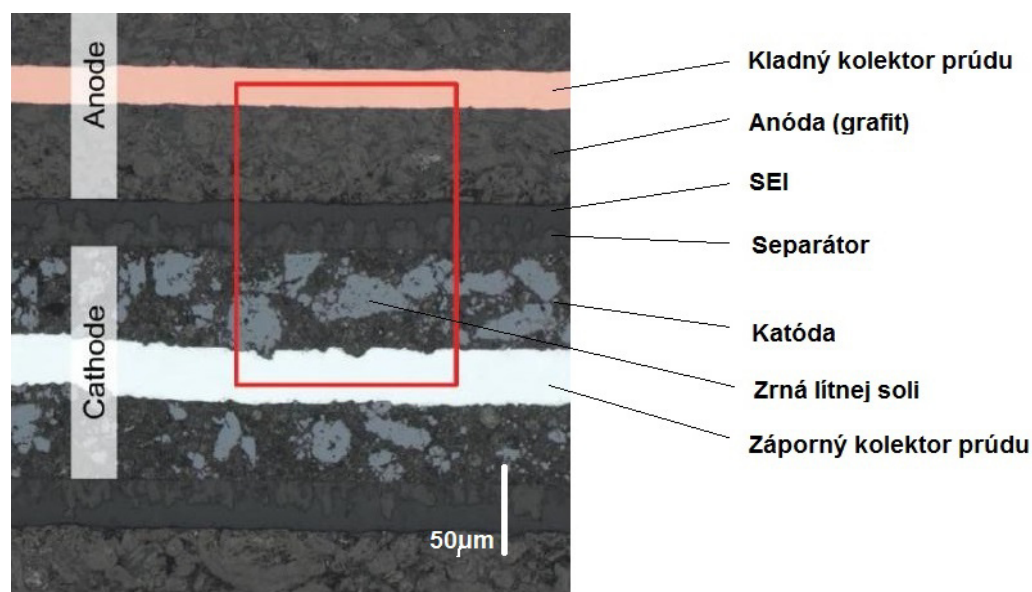
	Li-kobalt (LCO)	Li-mangán (LMO)	Li-fosfát (LFP)	NMC
Materiál anódy	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄	LiNiMnCoO ₂
Menovité napätie	3.60V	3.80V	3.30V	3.60/3.70V
Elektromotorické napätie	4.20V	4.20V	3.60V	4.20V
Životnosť [cykly]	500–1000	500–1000	1000–2000	1000–2000
Špecifická energia	150–190Wh/kg	100–135Wh/kg	90–120Wh/kg	140-180Wh/kg
Max. vybijací prúd	1C	10C, 40C nárazovo	35C dlhodobo	10C
Bezpečnosť	Priemerná		Veľmi vysoká	Vysoká
Max. prípustná teplota	150°C	250°C	270°C	210°C
Rok výroby	1994	1996	1999	2003
Vlastnosti	Vysoká hustota energie, nízky výkon	Vysoký výkon, stredná až vysoká hustota energie	Vysoký výkon, priemerná hustota energie, vysoká bezpečnosť	Veľmi vysoká hustota energie, vysoký výkon
Použitie	Mobilné telefóny, notebooky	Elektrické náradie, medicínske prístroje, elektromobily	Robotika, elektromobily, RC modely	medicínske prístroje, elektromobily

3.2.8 Konštrukcia

Keďže medzi výrobcami lítiových akumulátorov nie je zavedená takmer žiadna štandardizácia, existuje veľmi veľké množstvo typov konštrukcií a tvarov batérií. Základné časti sú však pre väčšinu akumulátorov spoločné.

Článok

Aby mal aktívny povrch medzi elektródami čo najväčšiu plochu, majú jednotlivé časti batérie tvar tenkých, dlhých pásov. Tie sú zvinuté do zvitku tak, aby vrstvy čo najlepšie priliehali (Obr. 5). Prvú vrstvu tvorí tenká vodivá fólia vyrobená z hliníka, alebo medi, ktorá slúži ako zberný vodič elektrického prúdu. Na ňu je nanosený tenký náter aktívneho materiálu katódy. Nasleduje separátor, ktorý je tvorený tenkou fóliou s drobnými pórnymi². Najbežnejšími materiálmi separátora je polyetylén a polypropylén. Na separátor prilieha vrstva katódy nanosená na kovovú fóliu. Na konce fólie sú pripevnené prípojné vodiče vyvedené z obalu článku. Každý článok je zabalený do ochranného obalu z plastovej fólie, ktorého hlavnou úlohou je chrániť elektrolyt pred vyschnutím. Elektrolyt umožňuje pohyb iónov lítia cez separátor. V prípade lítiových článkov je tvorený soľou lítia rozpustenou v organickom rozpúšťadle. Pomer medzi množstvom elektrolytu a plochou povrchu elektród je kompromisom medzi kapacitou a maximálnym vybíjacím prúdom článku.



Obr.5: Prierez vrstvami Li-ion článku (prevzaté z [18]).

- 2 Na vrstvu separátoru sú kladené extrémne nároky a jeho výroba je nákladná. Musí obsahovať póry, aby umožňoval prechod iónov lítia medzi elektródami. Jeho hrúbka by mala byť čo najmenšia, aby nezaberal veľa miesta, ale zároveň musí byť dostatočne mechanicky odolný, aby nedošlo k jeho poškodeniu ostrými kryštálmi na elektródach, ktoré vznikajú počas nabíjacích cyklov batérie, prípadne mechanickým namáhaním. Poškodenie separátora môže spôsobiť skrat v batérii.

Obal

Úlohou obalu akumulátorov je predovšetkým ochrana akumulátora pred nepriaznivými vonkajšími vplyvmi (mechanické namáhanie, vlhkosť atď.). Najčastejšími tvarmi balení sú: cylindrický, prizmatický a vreckovitý (Príloha 1).

- **Cylindrický:** zvitok článku je umiestnený v kovovej valcovej nádobe pripomínajúcej ceruzkovú batériu. Výhodou je dobrá mechanická odolnosť a vysoká špecifická energia. Pri skladaní viacerých článkov nie je priestor pre batériu využitý efektívne. Existuje niekoľko štandardných rozmerov cylindrického článku (napr. 18 65 0 alebo 26 65 0, pričom prvé dvojčíslenie udáva priemer a druhé výšku článku v mm). Tieto články sa bežne montujú napr. do batérií notebookov.
- **Prizmatický:** zvitok je umiestnený v hranatej nádobe rozličných rozmerov. Na dosiahnutie požadovanej tuhosti je nutné použiť hrubšie steny nádoby, čo znižuje špecifickú energiu akumulátora. Často sa používa v aplikáciách s požiadavkami na minimalizáciu rozmerov, ako napríklad akumulátory mobilných telefónov.
- **Vreckovitý:** zvitok akumulátora je zabalený v plastovom vrecku. To však neposkytuje dostatočnú mechanickú oporu, takže článok je veľmi zraniteľný. Tento typ balenia vyžaduje použitie gélového elektrolytu, ktorý zlepšuje jednotlivé vrstvy zvitku a zaisťuje ich kontakt. Výhodou je možnosť výroby akumulátorov rozmanitého tvaru, najmä tenkých pásov. To umožňuje lepšie využitie priestoru v konkrétnom zariadení. Vďaka plastovému obalu majú batérie nízku hmotnosť, preto sú populárne medzi leteckými modelármi. Tento typ sa označuje aj ako Li-polymér akumulátor (Li-po).

Ochranné prvky

Kvôli vysokej hustote energie a použitým materiálom sú lítiové batérie obzvlášť citlivé na spôsob používania. Ak dôjde vo vnútri batérie alebo na kontaktoch ku skratu, batéria môže v dôsledku prehriatia vzplanúť a spôsobiť požiar. Ako ochrana pred mechanickým poškodením slúži obal, prípadne miesto a spôsob uloženia akumulátora. Batéria obsahuje zvyčajne aj ochranný obvod a pretlakový ventil. Ochranný obvod je malý plošný spoj zabráňujúci skratu článkov pri skrate výstupných kontaktov akumulátora. Pretlakový ventil zabráňuje výbuchu článkov v kovových obaloch. Po prekročení určitého tlaku dôjde k roztrhnutiu obalu [14].

3.2.9 Porovnanie Li-ion a oloveného akumulátora

V tabuľke 2 sú porovnané vlastnosti dvoch najčastejšie používaných typov akumulátorov.

Tab.2: Porovnanie vlastností Li-ion a oloveného akumulátora.

	Li-ion	Olovený akumulátor
Menovité napätie článku	3,60V	2,10 V
Elektromotorické napätie článku	4,20V	2,0V
Životnosť(cyklov)	1200-2000, pri 80% vybití	200-300 , pri 80% vybití
Špecifická energia	150–190Wh/kg	30-40Wh/kg
Max. vybíjací prúd	1-40C	5C(trakčné),10-20C(štartovacie)
Bezpečnosť	-riziko vzplanutia, -citlivé na mech. poškodenie	-tvorba výbušných plynov -riziko poleptania, toxické
Teplotná stabilita	150°C	>100°C
Rozsah prac. teplôt	cca 5-50°C	-20 - 50°C
Uvedenie na trh	1994	1859
Použitie	-počítače, mobily,elektronika -lekárske prístroje -elektrické náradie -letecké aplikácie -dôraz na minimalizáciu rozmerov a hmotnosti	-autobatérie -elektromobily, elektrické vozíky -štartovacie autobatérie -náhradné zdroje -použitie, ak vysoká hmotnosť nie je problém
Výhody	-vysoká špecifická energia -vysoké napätie na článok -nemajú pamäťový efekt -absencia ťažkých kovov -plochá vybíjacia krivka -malé samovybíjanie -dlhá životnosť	-nízka výrobná cena -jednoduchá výroba -extrémne malé samovybíjanie -dobrý výkon pri nízkych teplotách -dobrý pomer hmotnosti a výkonu
Nevýhody	-zložitá výroba -vysoká cena -nutnosť použitia ochranných prvkov -dramatický pokles výkonu pri nízkych teplotách -podliehajú degradácii -prísne prepravné pravidlá	-nízka špecifická energia -pomalé nabíjanie -vznik sulfatácie, pri skladovaní vo vybitom stave -limitovaná životnosť pri hlbokom vybíjaní -toxické, zaťažujú životné prostredie -riziko úniku elektrolytu (so zaplavenými elektródami)

3.3 Modelovanie akumulátorov

Pri vytváraní modelu reálneho systému je vždy veľmi dôležité definovať požiadavky na model, ako napríklad:

- vlastnosti systému, ktorý chceme modelovať
- veličiny a stavy systému, ktoré chceme modelovať
- rýchlosť výpočtu
- presnosť výpočtu

Z dôvodu rôznych požiadaviek existuje aj v prípade Li-ion batérií veľa druhov modelov. Približne ich môžeme rozdeliť do štyroch skupín:

- empirické modely
- modely elektrochemického inžinierstva
- multifyzikálne modely
- molekulárno-atomárne modely

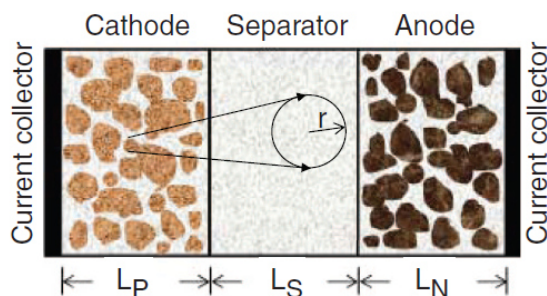
3.3.1 Empirické modely

Vznikajú na základe experimentálne získaných dát, ktoré sú prekladané pomocou rôznych polynomiálnych, exponenciálnych a iných funkcií. Keďže tieto modely nezohľadňujú fyzikálnu podstatu modelovaného systému, fungujú len pri veľmi špecifických podmienkach, pri ktorých boli získané dáta. Pri akejkoľvek odchýlke od pôvodných podmienok, napr. zmena teploty okolia, sa zvyčajne presnosť modelu rapídne zhoršuje. Tento typ modelu nie je vhodný pre návrh a optimalizáciu chemického zloženia, či štruktúry batérií.

3.3.2 Modely elektrochemického inžinierstva

- **Single particle model:** modeluje chovanie batérie na úrovni drobných zrníkov materiálu elektród. Priebehy chemických reakcií sa uvažujú tiež na úrovni jednotlivých častíc elektród. Zahŕňa difúziu a interkaláciu vnútri jedného zrníčka, ale zanedbáva potenciálový a koncentračný gradient medzi jednotlivými zrnkami. Vďaka tomuto zjednodušeniu je model výpočtovo nenáročný.
- **Ohmic porous electrode model:** model zahŕňa navyše priestorové rozloženie potenciálu medzi protiľahlými elektródami a zmeny vodivosti v závislosti od porozity elektród a separátora. Model je možné použiť napr. na optimalizáciu hrúbky vrstiev batérie.
- **Pseudo 2D model:** model navyše zahŕňa aj priestorové rozloženie koncentrácie a difúziu elektrolytu pozdĺž plošného rezu batérie. Jednotlivé vrstvy batérie uvažuje ako suspenziu častíc s rôznym polomerom a elektrolytu (obr. 7). Tento typ

modelu je rozšírený pri elektrochemickom a priestorovom návrhu a optimalizácii batérií.



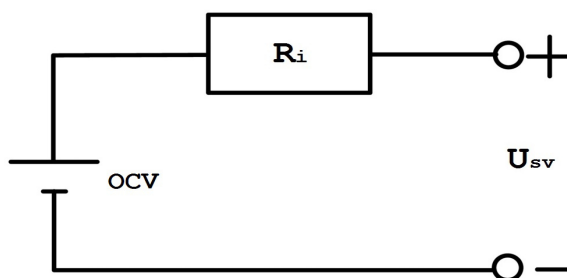
Obr 7: Pseudo 2D modely Li-ion akumulátora (prevzaté z[13]).

3.3.3 Multifyzikálne modely

Oproti elektrochemickým modelom navyše uvažujú rozloženie teploty pozdĺž batérie a jej vplyv na chemické reakcie v celom priestore batérie. Umožňujú dosiahnuť veľmi presné výsledky a sú používané v aplikáciách, ktoré kladú dôraz na vysoký výkon či vysokú hustotu energie.

3.3.4 Elektrické veličiny charakterizujúce stav batérie

V tejto práci sa zaoberáme Li-po batériou, ako elektrickou súčiastkou. Potrebujeme popísať najmä jej výsledné elektrické vlastnosti bez ohľadu na jej chemické zloženie, rozmery atď. Z elektrického hľadiska predstavuje batéria s dvoma vývodmi jednobran, ktorého vnútorný obvod chápeme ako čiernu skrinku. Podľa Théveninovej vety môžeme každý lineárny aktívny dvojbran nahradiť ideálnym zdrojom napätia U_n a odporom R_n [7]. tohto dôvodu môžeme zaviesť náhradnú schému batérie podľa obr. 8, kde OCV (z angl.: Open Circuit Voltage) označuje elektromotorické napätie batérie a R_i vnútorný odpor batérie.



Obr.8: Náhradná schéma batérie, podľa Théveninovej vety.

Základné parametre batérie sú:

Kapacita C [A.h]:

Kapacita všeobecne, je schopnosť vodiča, uchovávať elektrický náboj Q .

$$Q = \int_{t_0}^t i dt \quad (3)$$

V prípade batérií kapacitu zvyčajne udávame v ampérhodinách. Kapacitu batérie definujeme ako: *maximálny náboj, ktorý možno z batérie odobrať pri izbovej teplote, začínajúc pri plne nabití batérii až do jej úplného vybitia*[2].

Nominálna kapacita C_n [A.h]:

Maximálny náboj, ktorý možno z batérie odobrať pri izbovej teplote, začínajúc pri plne nabití batérii až do jej úplného vybitia, pri konštantnom prúde[2]. Tento prúd zvyčajne udávame ako zlomok kapacity v [A.h], zvyčajne v rozsahu $C/3 - C/10$.

V prípade Li-po batérií považujeme batériu za plne nabitú, ak nabíjací prúd poklesne na 3% nominálneho prúdu pri nabíjaní zdrojom konštantného napätia a svorkové napätie sa ustáli na zvolenej maximálnej hodnote. Batériu považujeme za plne vybitú, ak svorkové napätie dosiahne minimálnu hodnotu. Tieto hodnoty je nutné pre konkrétny typ batérie zvoliť s ohľadom na doporučenie výrobcu, bezpečnosť prevádzky a životnosť batérie.

Stav nabitia SoC [-]:

SoC (z angl. State of Charge) definujeme ako podiel medzi dostupnou a maximálnou kapacitou batérie v priebehu vybíjania:

$$SoC(t) = SoC_0(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t i dt \quad , \quad (4)$$

kde i je prúd prechádzajúci batériou, pričom v tejto práci považujeme prúd za kladný pri dodávaní náboja do batérie a pri odoberaní za záporný. Stav nabitia je základná stavová premenná, na základe ktorej môžeme určiť ostatné parametre batérie:

Elektromotorické napätie OCV [V]:

Elektromotorické napätie batérie je napätie na svorkách batérie, pri prechode nulového prúdu, merané po ustálení všetkých elektrochemických reakcií vo vnútri batérie. Elektromotorické napätie sa u všetkých druhoch batérií výrazne mení v závislosti na stave nabitia.

Vnútorý odpor R_i [Ω]:

Spôsobuje pokles svorkového napätia pri prechode prúdu. Tento odpor je tiež závislý od stavu nabitia batérie, ale táto závislosť je pri bežných teplotách zanedbateľná. Vnútorý odpor preto považujeme za konštantný v priebehu jedného cyklu.

3.3.5 Javy ovplyvňujúce vlastnosti akumulátora

Relaxácia batérie

Ak je batéria ponechaná odpojená od spotrebiča (zdroja), za dostatočne dlhú dobu po nabíjaní/vybíjaní, svorkové napätie batérie sa ustáli na novej konštantnej hodnote. Tento jav je spôsobený najmä vyrovnaním koncentrácie iónov lítia v elektrolyte a difúziou elektrolytu do vnútra elektród.

V prípade, že prúdy prechádzajúce batériou majú dynamické priebehy a dosahujú veľké špičkové hodnoty, čo je typické pre použitie batérie napr. v elektrických vozidlách, môže tento jav značne skresľovať odhady parametrov batérie. Naopak, v aplikáciach, ako je spotrebná elektronika, kde zariadenia odoberajú približne konštantný prúd počas celého vybíjacieho procesu, tento jav nespôsobuje veľké odchýlky.

Hysterézny jav

Ak budeme sledovať závislosť elektromotorického napätia od stavu nabitia, pre stavy nabíjania a vybíjania, pri rovnakom prúde a teplote a po odčítaní úbytku napätia na vnútornom odpore batérie zistíme, že obe krivky sa od seba odlišujú, pričom nabíjacia krivka dosahuje vždy vyššie hodnoty napätia ako vybíjacia. Rozdiely oboch napätí sa v prípade lítiových batérií pohybujú okolo 5% v závislosti od *SoC* a teploty. Plocha ohraničená oboma krivkami predstavuje časť energetických strát medzi nabíjaním a vybíjaním.

Samovybíjanie

Vzhľadom k tomu, že lítiové batérie majú veľmi malé samovybíjanie (kap. 3.2.5), rádovo niekoľko percent za mesiac, môžeme tento jav na časovej škále dní až hodín zanedbať.

Vplyv teploty

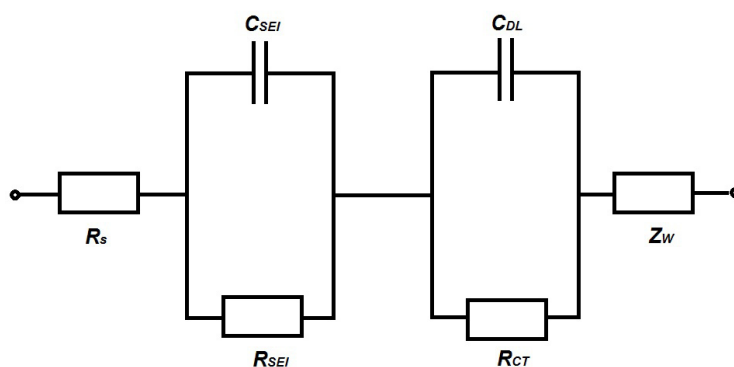
Teplota má zo všetkých vonkajších faktorov najväčší vplyv na chovanie a všetky parametre batérie. Tento fakt je nutné zohľadniť najmä v prípade, ak pri činnosti batérie dochádza ku zmenám teploty. K týmto zmenám môže dochádzať dvoma spôsobmi: prenosom tepla z okolitého prostredia a vznikom tepla na vnútornom odpore batérie pri prechode prúdu. Vlastné zahrievanie batérie je významné hlavne pri batériách s vysokou hustotou energie, kedy výkon na vnútornom odpore dosahuje vyššie hodnoty ako tepelný tok do okolia batérie. Dôležitým faktorom je aj tepelný odpor batérie, ktorý ovplyvňuje najmä veľkosť povrchu a rýchlosť prúdenia vzduchu okolo batérie. U batérií optimalizovaných na vysokú hustotu energie je, naopak, tepelný výkon vznikajúci vo vnútri batérie zanedbateľný a môžeme s dostatočnou presnosťou považovať teplotu batérie a teplotu okolia za rovnakú.

3.3.6 Elektrické modely Li-ion akumulátorov

Je to skupina modelov, ktoré slúžia najmä na odhad stavových premenných (SoC , teplota) a udalostí reálneho zariadenia, napríklad havarijných stavov, času zostávajúceho do vybitia/nabitia batérie atď. Tieto modely je tiež možné využiť na softvérové a hardvérové simulácie týchto zariadení. Väčšina elektrických modelov patrí do skupiny empirických modelov, prípadne kombinujú fyzikálne zákony a empiricky namerané hodnoty.

Najdôležitejšou informáciou, ktorú sa snažíme, najmä v prípade reálneho zariadenia čo najpresnejšie zistiť, je práve SoC , keďže je z neho možné odhadnúť zostávajúci čas do vybitia. SoC je možné určovať niekoľkými spôsobmi, pričom niektoré nie sú pre Li-ion akumulátory použiteľné:

- **Nepoužiteľné metódy:** Veľmi presným spôsobom určenia SoC v danom stave je batériu vybiť na nulovú kapacitu a podľa vzťahu (4) z priebehu prúdu dopočítať vybitý náboj. Túto metódu nemožno z praktického hľadiska použiť v žiadnom reálnom zariadení. Ďalším spôsobom je určenie SoC na základe koncentrácie látok v elektrolyte. Táto metóda je použiteľná napr. v zaplavených olovených akumulátoroch. Orientačne je možné SoC určiť aj na základe svorkového napätia batérie, nepresnosť do merania však vnáša relaxačný efekt, najmä pri dynamických dejoch v batérii.
- **Impedančná spektroskopia:** Táto metóda umožňuje veľmi presne zmerať impedanciu batérie. Na svorky batérie sa privádza harmonický signál s rôznou frekvenciou a na základe odozvy prúdu, je možné určiť reálnu aj imaginárnu zložku impedancie. Keďže vnútorný odpor je závislý aj od stavu nabitia, môžeme ho spätne určiť napríklad pomocou tabuľky. Obmedzením tejto metódy je, že väčšinou nie je prípustné počas prevádzky privádzať na svorky batérie periodické signály, preto je takmer výhradne používaná v laboratórnych podmienkach.
- **Náhradné schémy:** Táto metóda modeluje batériu typicky ako sériovo-paralelnú kombináciu rezistorov a kondenzátorov s veľkou kapacitou. SoC je potom spätne určený na základe napätia na svorkách obvodu. Výhodou je, že týmto spôsobom možno simulovať aj relaxáciu batérie a difúzne javy. V práci [3] použili namiesto vnútorného odporu obvod podľa obr. 9.



Obr. 9: Obvodový model impedancie batérie (prevzaté z [3]).

Jednotlivým prvkom obvodu je možné priradiť aj fyzikálnu podstatu :

- ***C_{sei}, R_{sei}***: reprezentujú kapacitanciu a rezistanciu pevnej vrstvy elektrolytu (SEI layer), uplatňuje sa pri vysokých frekvenciách napätia a prúdu
- ***C_{dl}***: vyjadruje kapacitanciu medzi elektródami a elektrolytom
- ***R_{ct}***: zodpovedá za prenos náboja medzi elektródami a elektrolytom
- ***Z_w***: charakterizuje difúziu iónov lítia medzi elektródami a elektrolytom pri nízkych frekvenciách

Nevýhodou tejto metódy je, že hodnoty jednotlivých prvkov sú silne závislé na SoC. Navyše na určenie hodnôt pre konkrétnu batériu je nutné použiť impedančnú spektroskopiu.

- **Integrácia prúdu**: Metóda spočíva v priamom použití vzťahu (3) na základe merania prúdu prechádzajúceho obvodom. Nevýhoda tejto metódy je nemožnosť určiť počiatočný stav SoC_0 . Touto metódou tiež dochádza k akumulácii chyby merania, preto je dôležité meranie prúdu s vysokou presnosťou. Zvyčajne sa preto integrácia prúdu skombinuje s meraním napätia, keď batéria dosiahne maximálne, alebo minimálne svorkové napätie. Týmto sa vytvorí jednoduchá spätná väzba. V dnešnej dobe je možné skombinovať túto metódu s estimačnými algoritmami, ako napr. Kalmanov filter, nelineárny Kalmanov filter a pod. Aby bolo možné použiť tieto metódy, je nutné vytvoriť stavový model batérie. To môže byť komplikované, keďže batéria je zvyčajne modelovaná ako nelineárny systém. Táto metóda je úspešne použitá v prácach [2] a [4].
- **Neurónové siete, fuzzy logic optimization, SVM³**: Skupina metód modelujúca batériu ako black-box. Na použitie tejto metódy je nutné poskytnúť algoritmom rozsiahle sady meraní, aby bola aproximácia dostatočne presná. Fáza učenia týchto algoritmov je náročná na výpočtový výkon, preto nie je možné jej použitie v reálnom čase. V niektorých okrajových podmienkach môže dochádzať k nestabilite týchto algoritmov.

3.3.7 Modelovanie degradácie Li-ion akumulátora

Zmyslom týchto modelov je popísať alebo odhadnúť zmenu vlastností batérie spôsobených jej používaním a plynutím času. Keďže miera degradácie je závislá od mnohých faktorov, jej modelovanie spôsobuje množstvo problémov a získané odhady sa môžu výrazne odlišovať od skutočných hodnôt. V súčasnosti existujú dva základné prístupy k modelovaniu degradácie: modely založené na empiricky získaných hodnotách a fyzikálne modely založené na popise vedľajších chemických reakcií spôsobujúcich degradáciu batérie.

- **Fyzikálne modely**: Hlavnou príčinou degradácie Li-ion batérií je vznik pevnej vrstvy v štruktúre batérie (SEI layer). Táto vrstva spotrebúva aktívny materiál, čím sa zhoršujú vlastnosti batérie (viď kap. 3.2.6).

3 SVM(z angl. support vector machine) je metóda využívajúca algoritmy strojového učenia.

Rýchlosť priebehu tejto reakcie je možné popísať Eyringovou rovnicou podľa [5]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{kT}{hc^\theta} \cdot e^{\frac{\Delta s^\theta}{R}} \cdot e^{\frac{-\Delta H^\theta}{RT}}, \quad (5)$$

kde P je množstvo produktu reakcie, T je teplota, t čas, R je Moorova konštanta, $\Delta s^\theta, \Delta H^\theta$ sú aktivačná entropia a entalpia, h je Planckova konštanta, k je Boltzmanova konštanta a c^θ je štandardná koncentrácia (zvyčajne 1mol/kg).

Aj keď mechanizmus tejto reakcie je dobre preskúmaný, spoľahlivý predpovedný model životnosti na základe rýchlosti chemických reakcií zatiaľ nebol publikovaný [5]. Je to najmä z dôvodu ďalších vedľajších reakcií a javov, ktoré k výslednej degradácii prispievajú v rôznej miere, v závislosti od používania batérie. Detailné porozumenie týchto závislostí je preto komplikované.

- **Empirické modely:** Predstavujú alternatívu pre fyzikálne modely. Hlavnou výhodou je ich jednoduchosť oproti fyzikálnym modelom, navyše nie je nutné detailne skúmať fyzikálnu podstatu týchto procesov. Existujú dostatočne presné modely, zahŕňajúce aj vplyv teploty, rýchlosť vybíjania a hĺbku vybíjania DOD (Depth of discharge =1/SoC). Nevýhodou je, že pre každý typ batérie je nutné získavať parametre modelu individuálne.

4 Analýza problému

4.1 Elektrický model

Keďže potrebujeme simulovať batériu v reálnom čase, pri výbere vhodného modelu sme kládli dôraz na jednoduchosť modelu a softvérové vybavenie, ktoré máme k dispozícii. Model musí, narozdiel od modelov používaných v BMS (Battery management system) systémoch, fungovať aj bez spätnej väzby s reálnou batériou. Z týchto dôvodov sme sa rozhodli použiť model využívajúci integráciu prúdu. Pri jeho tvorbe sme vychádzali z práce [4]. Ide o kombináciu fyzikálneho a empirického modelu. Náš model zahŕňa vplyv teploty a hysterézy jav. Keďže zariadenie bude použité na testovanie drobnej elektroniky s batériami s malou hustotou výkonu, model nezahŕňa relaxačné a difúzne deje. Zanedbávame tiež zahrievanie batérie jouleovými stratami na vnútornom odpore.

Východiskovou stavovou premennou je SoC . Aby bolo možné súčasne simulovať stav nabíjania aj vybíjania, vzťah (4) je nutné modifikovať do podoby:

$$SoC(t) = SoC_0(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t \eta i dt, \quad (6)$$

kde η je účinnosť nabíjania. Účinnosť nabíjania definujeme ako :

$$\eta = \frac{\int_0^{t_d} i_d(t) dt}{\int_0^{t_c} i_c(t) dt}, \quad (7)$$

kde i_c je nabíjací a i_d vybíjací prúd, t_c čas nabíjania a t_d vybíjania batérie. Pri vybíjaní považujeme $\eta_d = 1$ a pri nabíjaní $\eta_d = \eta$.

Elektromotorické napätie batérie OCV vypočítame na základe modelu použitého v [4]:

$$OCV = K_1 + K_2 SoC + \frac{K_3}{SoC} + K_4 \ln(SoC) + K_5 \ln(1 - SoC) \quad (8)$$

Aby sme mohli zohľadniť hysterézy jav, počítame hodnotu napätia pre každý smer prúdu oddelene. Funkcie sa líšia iba hodnotami koeficientov K_{1-5} .

Z dôvodu identifikácie parametrov sme zvolili najjednoduchšiu náhradnú schému batérie, podľa Théveninovej vety (obr. 8).

Vnútorný odpor uvažujeme iba ako funkciu teploty batérie, jeho závislosť od stavu nabitia zanedbávame. Je to kompromis medzi presnosťou modelu a časovou náročnosťou identifikácie parametrov [23].

4.2 Model degradácie

Vzhľadom k tomu, že použitie fyzikálnych modelov degradácie vyžaduje pochopenie chemických dejov vo vnútri batérie, na čo nemáme vybavenie ani prostriedky, zvolili sme empirický model použitý v [18]. Model zohľadňuje vplyv degradácie na kapacitu a vnútorný odpor batérie. Vstupom do modelu je teplota, čas a počet cyklov batérie. Degradáciu kapacity môžeme rozdeliť na statickú a cyklickú. Aktuálnu kapacitu batérie vypočítame ako:

$$C = C_{init} [1 - (K_{stat} + K_{cykl})] \quad , \quad (9)$$

kde C_{init} je počiatočná kapacita, K_{stat} sú straty statickou degradáciou a K_{cykl} straty spôsobené cyklickou degradáciou. Tieto koeficienty vyjadríme takto:

$$K_{stat} = k_1 \cdot e^{\frac{k_2}{k_3 \cdot T}} \cdot t \quad , \quad (10)$$

$$K_{cykl} = k_4 \frac{N^2}{2} + k_5 N \quad , \quad (11)$$

kde N je počet cyklov batérie t je čas a T je teplota batérie. Zmenu vnútorného odporu určíme podľa vzťahu :

$$Ri = Ri_{init} \cdot (1 + k_6 N^{\frac{1}{2}}) \quad , \quad (12)$$

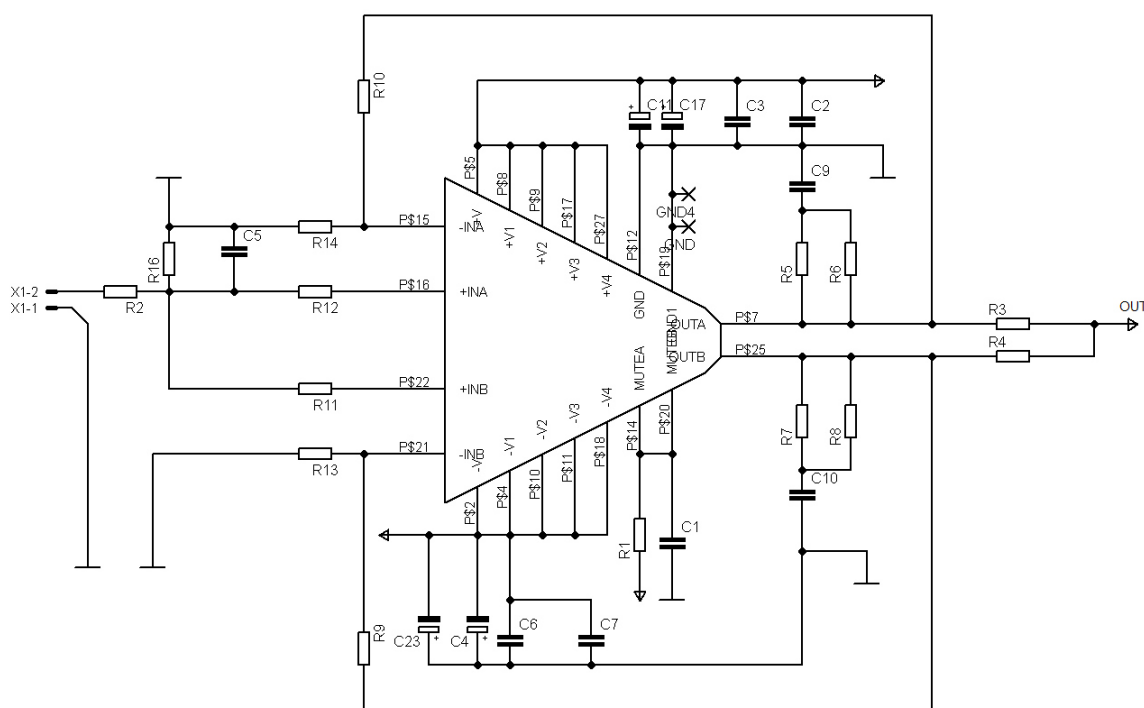
kde Ri_{init} je počiatočná hodnota vnútorného odporu. Koeficienty k_1 - k_6 je nutné určiť experimentálne na základe nameraných dát, pre každú batériu zvlášť. Koeficienty k_4 a k_5 sú závislé od teploty.

4.3 Výber hardvérového riešenia

Vzhľadom na vybraný model a ciele našej práce potrebujeme také hardvérové riešenie, ktoré by bolo schopné generovať svorkové napätie článku v rozsahu 0 - 5V. Vzhľadom na prípadné ďalšie využitie či modelovanie sústavy článkov, by bol vhodný zdroj napätia aspoň 14V, čo zodpovedá batérii zloženej z 3 článkov v sérii (3S). Napätie zdroja sa musí dať v reálnom čase nastavovať z riadiaceho počítača. Maximálny doporučovaný odoberaný prúd batérie pri bežných Li-po článkoch je 1 - 1,5C, čo pri kapacite 1500mAh zodpovedá 1 - 2,5A. Keďže je potrebné meniť vnútorný odpor zdroja, nie je ho možné nahradiť jednoduchým rezistorom. Úbytok napätia na vnútornom odpore je simulovaný softvérovo, na základe spätnej väzby z prúdového snímača zaradeného do obvodu. Pre náš simulátor je potrebný prúdový snímač s rozsahom aspoň 0 - 2A, galvanickým oddelením a malou zotrvačnosťou. Je potrebný A/D, D/A prevodník, ktorý prevádza signály medzi počítačom a simulátorom. Po zvážení dostupných možností boli použité takéto komponenty:

4.3.1 Zdroj napätia

Ako zdroj napätia bola použitá stavebnica analógového operačného zosilňovača z vybavenia laboratória MechLab. Ide o neinvertujúce zapojenie s použitím dvojkanalového audiozosilňovača LM4780 (Obr. 10). Pomocou odporov R10 a R9 je nastavené zosilnenie 10V/V. Vzhľadom na rozsah riadiaceho signálu $\pm 10\text{V}$ by sme na dosiahnutie maximálneho rozlíšenia potrebovali menšie zosilnenie, ale výrobca zosilňovača to nedoporučuje [24]. Tento problém rieši odporový delič so zosilnením 0,1V/V na vstupe zosilňovača X1-2. Zosilňovač je symetricky napájaný z laboratórneho zdroja s napätím $\pm 15\text{V}$. Signál z oboch kanálov je cez výkonové odpory R1, R3 ($0,5\Omega$) vyvedený na výstup OUT. Pretože je potrebný zdroj s nulovým vnútorným odporom, úbytok napätia je kompenzovaný softvérovo.



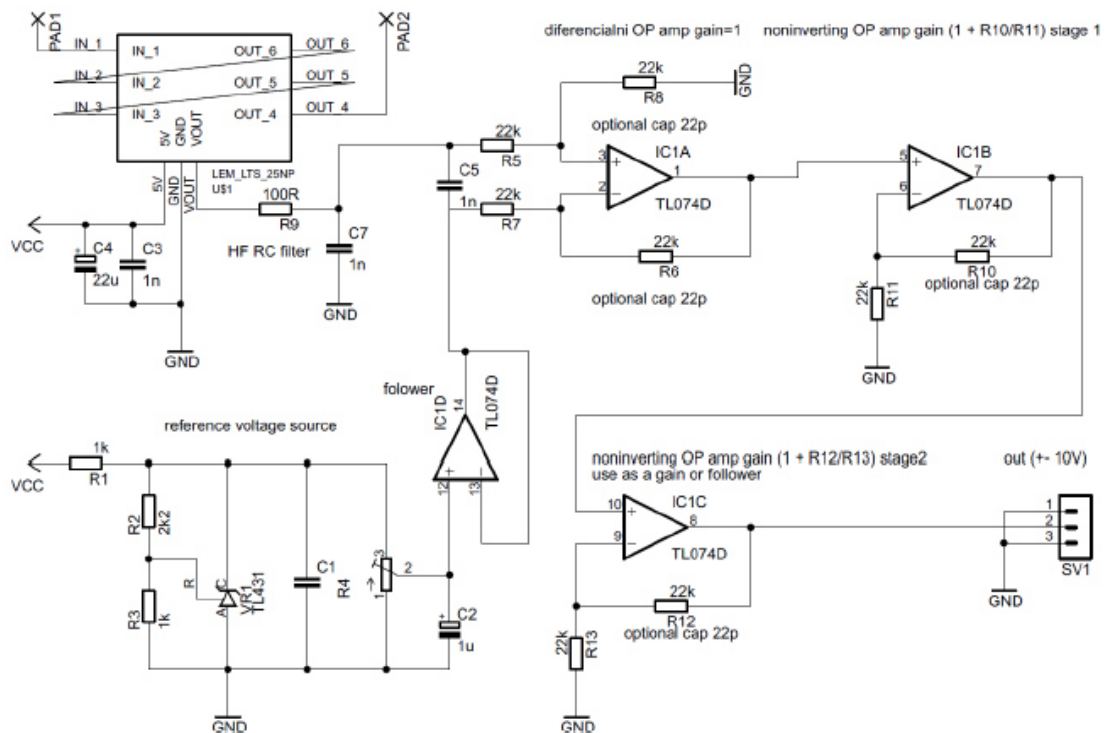
Obr. 10: Schéma zapojenia operačného zosilňovača.

Zdroj bol po zostavení skalibrovaný pomocou multimetra. Pre jeho ďalšie použitie bol vytvorený blok v prostredí Simulink.

4.3.2 Snímač prúdu

Na snímanie prúdu v obvode bol opäť použitý obvod dostupný ako stavebnica vo vybavení laboratória MechLab. Obvod sa skladá z prúdového snímača firmy LEM a napätového prispôsobenia, aby bolo možné využiť celý rozsah meracej karty. Výhodou senzora LEM je, že pracuje na magnetickom princípe, takže výkonový a merací okruh sú galvanicky oddelené. Keďže ide o kompenzovaný snímač (udržiava konštantný magnetický tok

v magnetickom obvode senzora) prevod medzi prúdom a napätím je lineárny. Na obr. 11 je schéma zapojenia bez napájacích obvodov.



Obr.11: Schéma zapojenia prúdového snímača (prevzaté z [7]).

Výstup snímača je privedený spolu s výstupom zo zdroja referenčného napätia na vstup operačného zosilňovača v diferenciálnom zapojení. Výstup je privedený na neinvertujúci operačný zosilňovač, pomocou ktorého je možné upraviť rozsah výstupného napätia. Signál je prúdovo posilnený a vyvedený na signálový výstup. Zdroj referenčného napätia umožňuje pomocou trimra presné nastavenie nulovej hodnoty prúdu. Po zostavení bol snímač skalibrovaný a bol preň vytvorený samostatný blok v prostredí Simulink.

4.3.3 Meracia karta

Na prevod signálu do riadiaceho PC sme použili meraciu kartu MF624 od firmy Humusoft. Karta má tieto základné charakteristiky [8]:

Analógové vstupy:

Kanály:	8 single-ended
A/D prevodník:	14-bitový, doba prevodu 10 microsec.
Čas prevodu:	1,6 microsec. 1 kanál
	1,9 microsec. 2 kanály
	2,5 microsec. 4 kanály
	3,7 microsec. 8 kanálov

Vstupné rozsahy: $\pm 10\text{ V}$
Vstupná impedancia: $10^{10}\Omega$

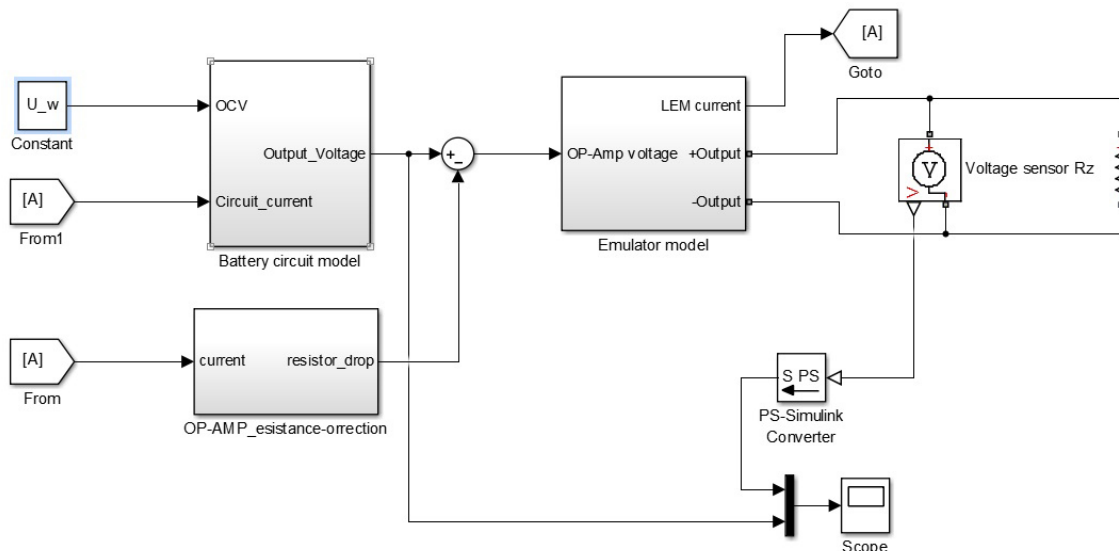
Analógové výstupy:

Kanály: 8 kanálov, 14-bitov
Výstupný rozsah: $\pm 10\text{ V}$
Výstupný prúd: 5 mA max.
Čas ustálenia: 31 μs

Ku karte je tiež dodávaný ovládač na Real-time ovládanie z prostredia Simulink.

4.3.4 Overenie hardvérovej koncepcie SimScape®

Na overenie funkčnosti navrhnutej koncepcie bol pred zostrojením hardvéru, v sade nástrojov Simulinku SimScape vytvorený model Li-po emulátora (Obr. 12). Vnútna schéma blokov modelu je zobrazená v prílohe 4.



Obr.12: Schéma modelu Li-po emulátora.

Do modelu emulátora vstupuje požadovaná hodnota napätia zosilňovača a vystupuje hodnota prúdu z prúdového snímača. Model emulátora je spojený s modelom batérie, ktorý je popísaný v kap.4.1.

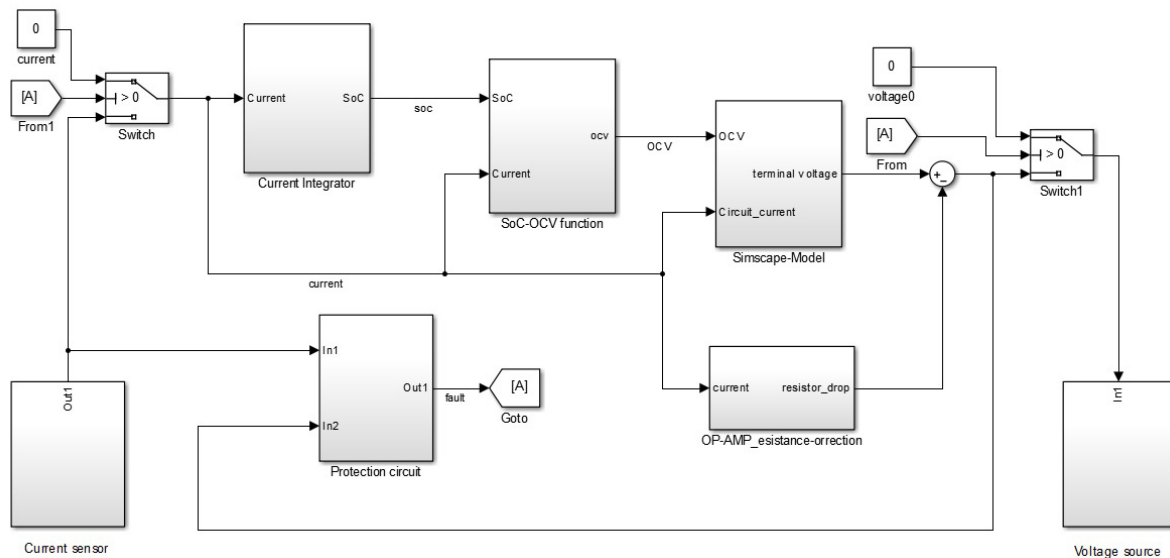
Generátorom signálu sme generovali požadované elektromotorické napätie batérie. Na elektrické svorky modelu emulátora bola pripojená odporová záťaž. Snímačom napätia bolo snímané svorkové napätie a porovnávané s hodnotou vypočítanou v modeli batérie. Vzhľadom k tomu, že išlo o softvérovú simuláciu, oba priebehy napätí sa úplne zhodovali. Tým bolo overené, že navrhnutá koncepcia je principiálne funkčná.

5 Výsledky, realizácia

5.1 Implementácia modelu do prostredia Simulink®

Simulink® je programovacie prostredie vyvíjané firmou MathWorks®. Je založené na grafickom programovaní blokových schém. Jednotlivé bloky predstavujú signálové vstupy, operácie so signálom, výstupy a pod. Simulink® je určený na multidoménové simulácie a návrh na základe modelu. Podporuje simulácie, automatické generovanie kódu a ďalšie funkcie. Simulink je úzko prepojený s prostredím MatLab®, čo umožňuje nastavovanie parametrov, ovládanie simulácií a spracovanie výsledkov [9].

Na obr. 13 je blokový model celého zariadenia. Model obsahuje niekoľko funkčných podsystémov:



Obr.13: Blokový model simulátora batérie.

- **Prúdový snímač:** prispôsobuje a filteruje signál z prúdového snímača.
- **Integrátor prúdu:** slúži na výpočet *SoC* podľa vzťahu (8).
- **Funkcia určujúca OCV:** prevádza *SoC* na elektromotorické napätie batérie. Pre každý smer prúdu je vytvorená funkcia zvlášť. Výstupy sú prepínané prepínačom podľa aktuálnej hodnoty prúdu.
- **Náhradná schéma batérie:** model zapojenia obvodu bol vytvorený s použitím knižnice SimScape, ktorá slúži na modelovanie elektrických obvodov. Do obvodu náhradnej schémy batérie je zapojený zdroj prúdu, ktorý obvodu vnucuje prúd určený prúdovým snímačom. Na svorkách batérie je pripojený voltmeter, ktorý sníma požadovanú hodnotu na svorkách zdroja.
- **Kompenzácia vnútorného odporu zdroja:** slúži na kompenzáciu úbytku napätia na vnútornom odpore zdroja pri prechode prúdu.

- **Ochrana batérie:** simuluje ochranné obvody v batérii. Model zahŕňa nadprúdovú, prepäťovú a podpäťovú ochranu. Tá je realizovaná sústavou relé, ktorá po prekročení niektorej z medzných hodnôt generuje chybový signál. Signály zo všetkých relé sú spracované logickým súčtom. Jeho výstup ovláda spínač, ktorý odpojí zdroj napätia.
- **Zdroj napätia:** slúži na kalibráciu signálu pri výstupe na zdroj napätia.

Vnútorňa schéma blokov modelu je zobrazená v prílohe 4.

5.2 Identifikácia parametrov modelu

Na identifikáciu parametrov bol použitý Li-po článok LP502030 z rady batérií od výrobcu Celevia Batteries. Je to batéria s najmenšou kapacitou z celej vyrábanej rady. Túto batériu sme zvolili kvôli dobrej dostupnosti, ale hlavne z bezpečnostného hľadiska, aby sme minimalizovali potenciálne škody spôsobené požiarom pri zlyhaní meracieho zariadenia. Batéria má navyše integrovaný ochranný obvod s ochranou proti prepätiu a podpätiu. Parametre batérie sú v tab. 3 [10].

Tab.3: Katalógové parametre použitej batérie.

Rozmery	50x30x20 mm
Kapacita	250mAh
Menovité napätie	3,7V
Maximálny pracovný rozsah napätia	3,0-4,2V
Maximálny nabíjací prúd	125mA
Maximálny vybíjací prúd	250mA
Životnosť	>500 cyklov, pri prúde 0,5C/0,5C
Vnútorňa impedancia pri 1kHz	0,085Ω

Výrobca tiež uvádza vypínacie hodnoty ochranného obvodu a rýchlosť samovybíjania v závislosti od teploty skladovania. O batérii sa nám nepodarilo zistiť žiadne ďalšie informácie.

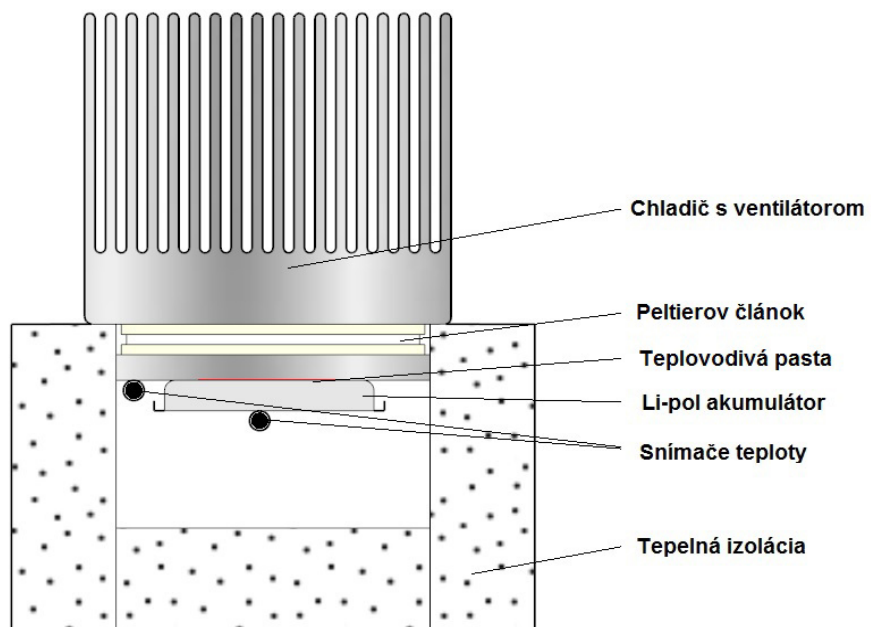
5.2.1 Metodika určenia parametrov batérie

- **Meranie vnútorného odporu batérie:** Vnútorňa odpor batérie sme určili ohmovou metódou pri nominálnom napätí batérie 3,7V.
- **Test nabíjania/vybíjania:** Na určenie ostatných parametrov batérie sme použili test, pri ktorom sme batériu vybili a nechali ustátiť na minimálnom napätí (3V).

Následne sme batériu nabíjali metódou CC-CV prúdom $C/3$, čo je pre použitú batériu 80mA, až kým batéria nedosiahla maximálne svorkové napätie (4,2V). Nabíjací prúd potom začal klesať. Keď nabíjací prúd poklesol na 3% nominálneho prúdu, nabíjanie sme ukončili. Batériu sme odpojili od zdroja a nechali 30 minút ustáliť svorkové napätie. Potom sme batériu vybíjali konštantným prúdom $C/3$ až kým hodnota svorkového napätia neprekročila 3V. Počas testu sme zaznamenávali svorkové napätie batérie, prúd v obvode a čas. Z nameraných hodnôt sme určili kapacitu batérie, účinnosť nabíjania a po odčítaní úbytku na vnútornom odpore krivku *SoC-OCV*.

5.2.2 Určenie vplyvu teploty na parametre batérie

Na určenie vplyvu teploty sme zostrojili jednoduchú tepelnú komoru. Na obr. 14 je schéma samotnej komory.



Obr.14: Rez tepelnou komorou.

Batéria je pripevnená na hliníkový profil s veľkou tepelnou vodivosťou a kapacitou. Profil je obalený 2cm hrubou vrstvou tepelnej izolácie z polystyrénu. Teplo je z profilu prevádzané pomocou dvoch peltierových článkov na vonkajšie rebrované chladiče, ofukované ventilátormi. Na povrch batérie a hliníkový profil sú pripevnené teplotné snímače. Peltierove články sú napájané pomocou štvorkvadrantového meniča, na ktorého výstupe je pripojený robustný RC filter. Ten znižuje zvlnenie prúdu z meniča, ktoré by mohlo poškodiť článok. Tepelný regulátor je opäť implementovaný do prostredia MATLAB Simulink v kombinácii s meracou kartou MF 624, ktorá predáva signál o teplote do počítača a generuje PWM a DIR signál pre menič. Výhodou použitia tohto spôsobu je možnosť plynulej regulácie teploty pod aj nad teplotu okolia. Presnosť regulácie teploty v komore bola 0,1 °C, čo bolo dané hlavne presnosťou kalibrácie

tepelného snímača. Pomocou takto skonštruovanej komory je možné chladit' maximálne do 25 °C a ohrievať o viac ako 25 °C oproti okoliu.

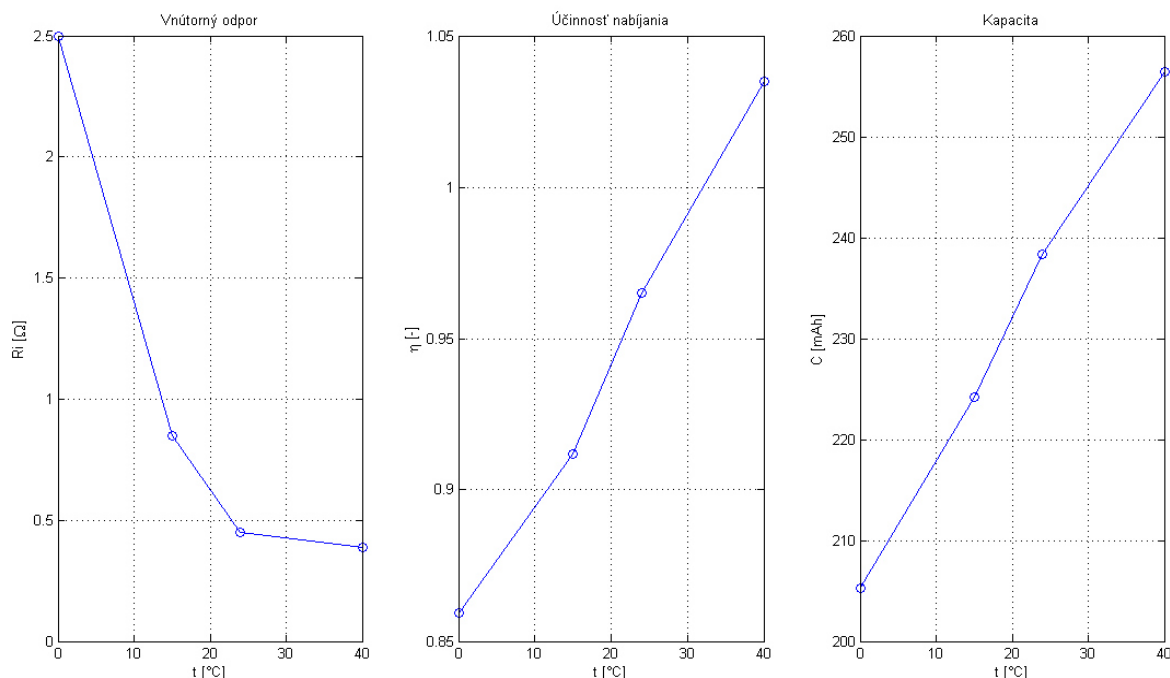
Meranie podľa kapitoly 5.2.1 sme zopakovali pri teplotách: 0 °C, 15 °C, 25 °C a 40 °C.

5.2.3 Určenie parametrov modelu degradácie

Degradácia batérie je dlhodobý proces, ktorý sa prejavuje v rádoch stoviek cyklov a jednotkách mesiacov až rokov. Meranie degradácie bežnými spôsobmi je preto veľmi časovo náročné, ba takmer nemožné. Na meranie sa preto používajú špeciálne tepelné komory, ktoré batériu ohrievajú na vysokú teplotu, aby sa proces starnutia urýchlil. Na meranie cyklickej degradácie sa používajú automatické cyklovače, ktoré, okrem iného, dokážu v prípade problémov zastaviť meranie a zabrániť tak prípadným škodám. Keďže sme takéto zariadenie k dispozícii nemali a na batériu je nutné neustále dohliadať, nepodarilo sa nám tieto testy uskutočniť. Parametre udávané výrobcom batérie sú málo podrobné a koeficienty modelu sa z nich určiť nepodarilo.

5.3 Výsledky merania

Na obr. 15 je zobrazená zmeraná závislosť vnútorného odporu, účinnosti nabíjania a kapacity batérie od teploty:

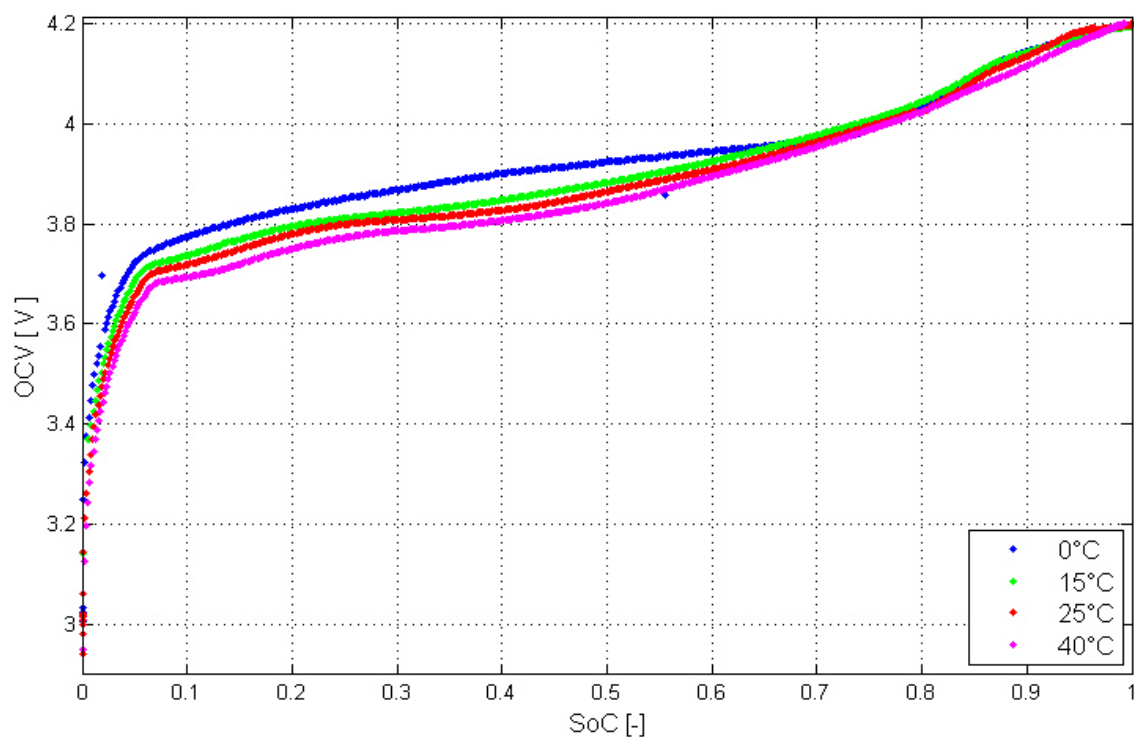


Obr.15: Závislosť vnútorného odporu, účinnosti nabíjania a kapacity od teploty.

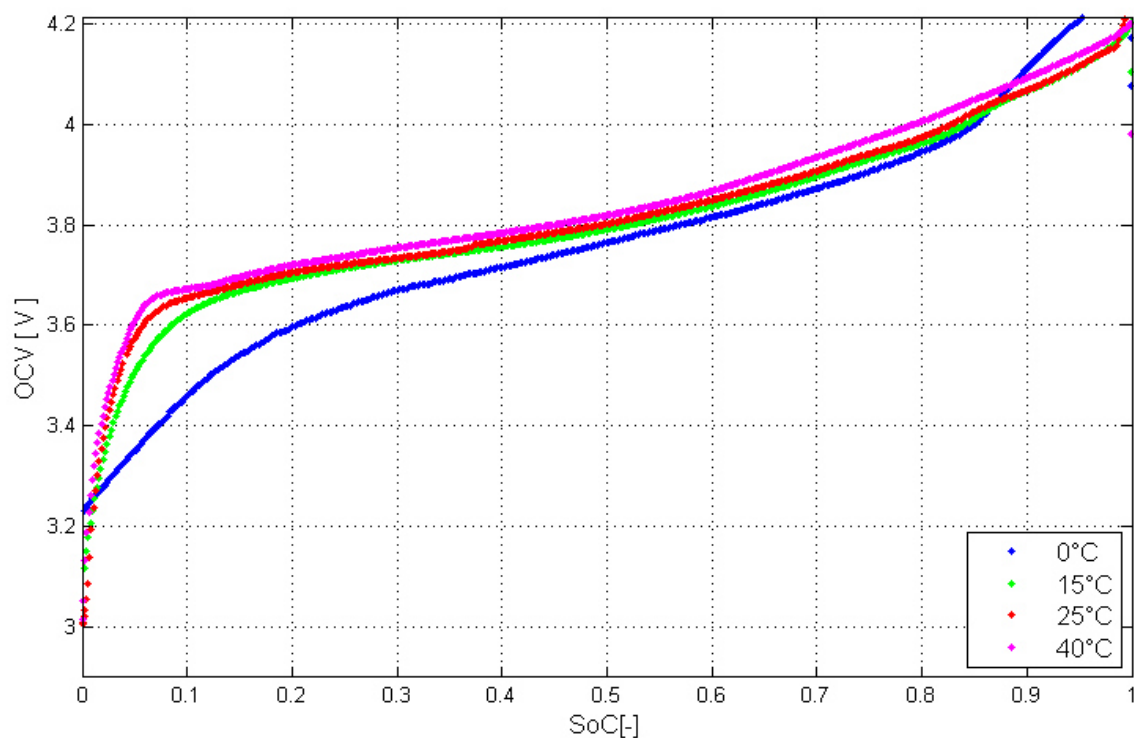
Z nameraných priebehov vyplýva, že kapacita a účinnosť nabíjania približne lineárne rastie s teplotou, pričom okolo 25°C dosiahne hodnotu udávanú výrobcom. Z grafu tiež vyplýva, že pri zvyšovaní teploty nad 35°C prekročí účinnosť nabíjania 100%⁴. Zo závislosti vnútorného odporu je vidieť, že jeho hodnota sa pri bežných prevádzkových teplotách takmer nemení, avšak pri poklese teploty pod približne 20°C začne prudko narastať.

V obr. 16 a obr. 17 sú zobrazené nabíjacie a vybíjacie krivky $SoC-OCV$ pre jednotlivé teploty.

4 Prekročenie účinnosti 100% je spôsobené uvoľnením "nedostupného" náboja po zohriatí batérie. (Po určitom čase pri konštantnej teplote sa účinnosť zníži).



Obr.16: Graf závislosti elektromotorického napätia od stavu nabitia pri nabíjaní.



Obr.17: Graf závislosti elektromotorického napätia od stavu nabitia pri vybíjaní.

Zo získaných kriviek vidieť, že hodnoty elektromotorického napätia sú pri stave nabíjania vždy vyššie ako pri stave vybíjania (hysterézný jav). S klesajúcou teplotou sa rozdiely medzi oboma krivkami zväčšujú a plocha hysteréznej krivky, zodpovedajúca stratovej energii v jednom cykle, narastá. Keďže s poklesom teploty narastá aj vnútorný odpor batérie, celková stratová energia bude s poklesom teploty narastať ešte oveľa prudšie. Keďže pri nízkych teplotách sa začína výrazne prejavovať aj závislosť vnútorného odporu od stavu nabitia, hodnoty namerané pri 0°C nezodpovedajú presne elektromotorickému napätiu. To spôsobilo aj deformáciu tvaru kriviek oproti ostatným teplotám. Získané krivky boli v nástroji na prekladanie kriviek v Matlabe preložené metódou najmenších štvorcov podľa vzťahu (8). Hodnoty jednotlivých koeficientov modelu sú zobrazené v tab. 4.

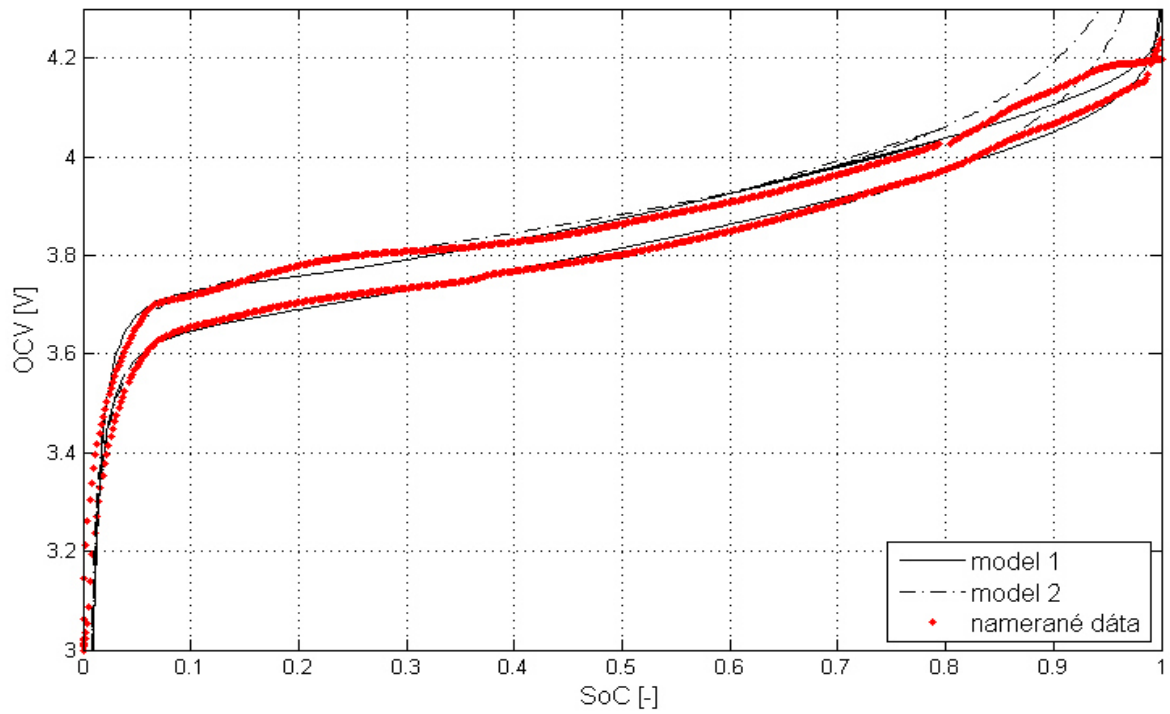
Tab.4: Hodnoty koeficientov modelu krivky SoC-OCV.

	Nabíjanie				Vybíjanie			
	0°C	15°C	25°C	40°C	0°C	15°C	25°C	40°C
K ₁	3,502	3,490	3,450	3,383	3,939	3,446	3,466	3,449
K ₂	0,5202	0,4760	0,5549	0,6939	-0,0667	-0,6797	0,6528	0,6393
K ₄	-0,0045	-0,0126	-0,0171	-0,0122	-0,0006	-0,0105	-0,0104	-0,0109
K ₄	0,016	-0,092	-0,111	-0,150	0,076	-0,138	-0,131	-0,127
K ₅	-0,0439	-0,0578	-0,0457	-0,0299	-0,1074	-0,0163	-0,0241	-0,0303

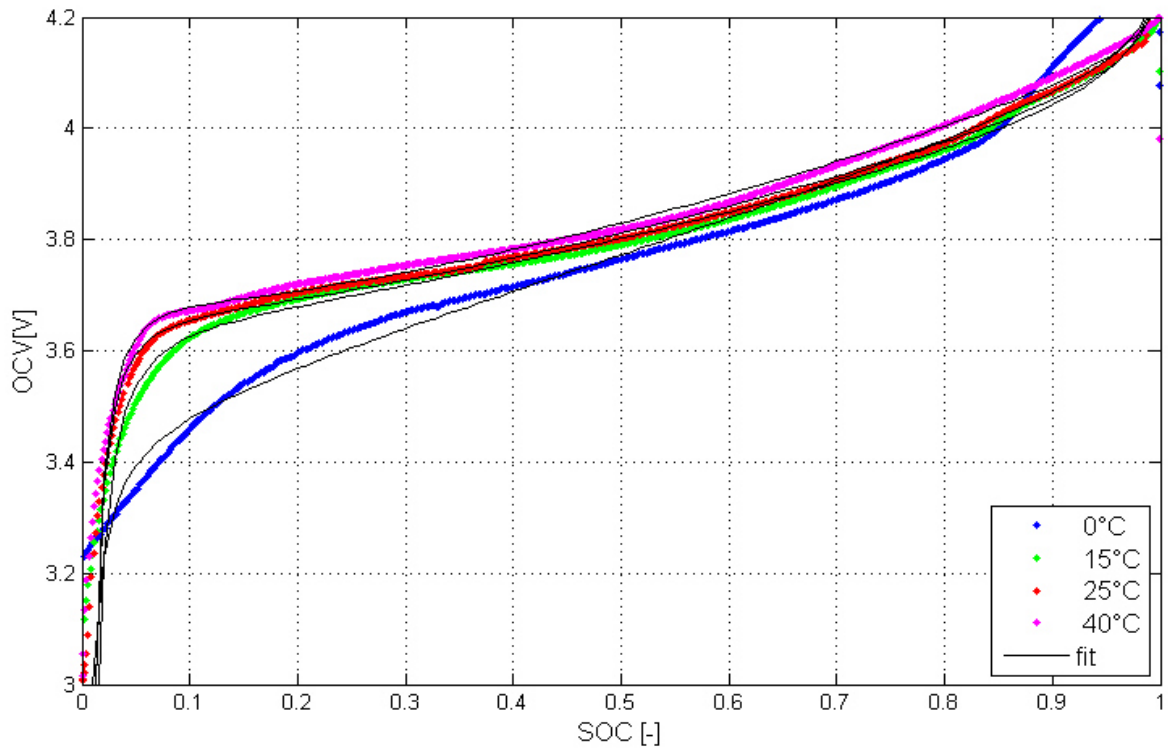
Nevýhodou tohto modelu je, že aplikácia metódy najmenších štvorcov na vzťah (8) nie je veľmi numericky stabilná, pretože závislosti niektorých členov od SoC sú si veľmi podobné. Výsledkom je, že medzi koeficientami z tab.4 a teplotou nie je možné nájsť žiadnu závislosť. Preto sme sa tiež pokúsili niektoré členy vzťahu (8) vynechať, pričom sme dostali nasledovný tvar modelu:

$$\varepsilon = K_1 + \frac{K_3}{SoC} + K_5 \ln(1 - SoC) \quad . \quad (13)$$

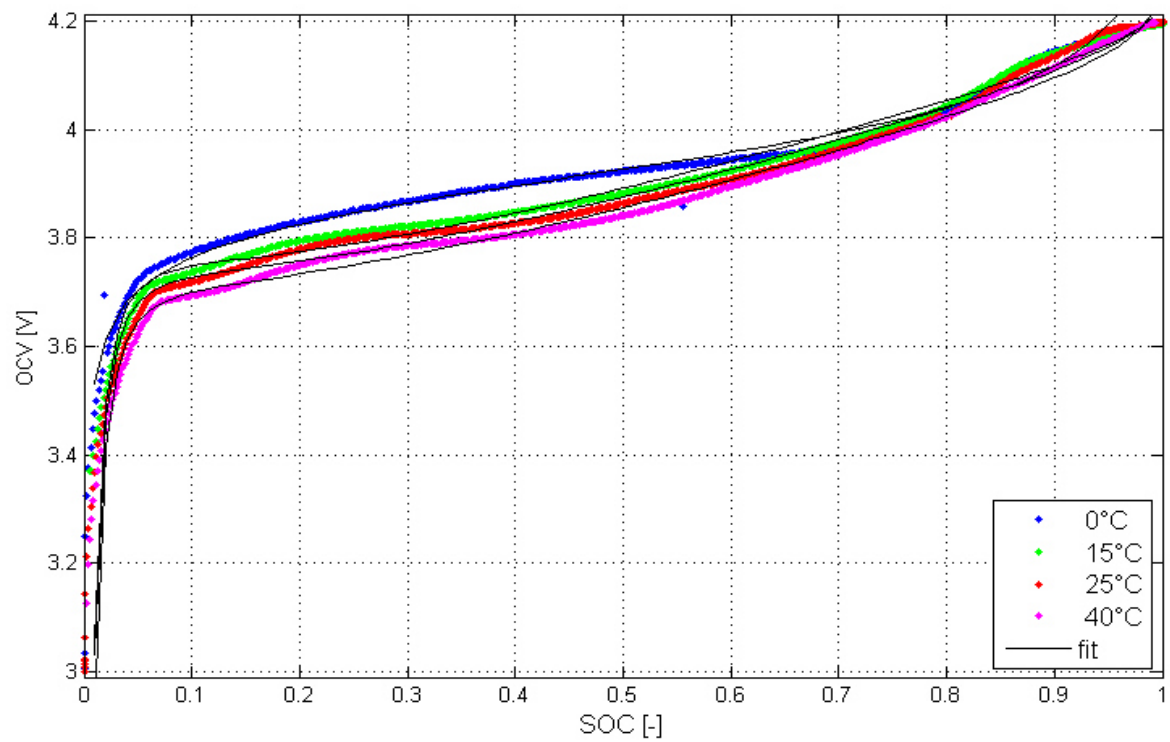
Výhodou tohto modelu je lepšia stabilita preloženia dát, takže medzi hodnotami koeficientov a teplotou je možné pozorovať určité trendy, avšak model vykazuje značné nepresnosti v rozsahu SoC=[0,9 ; 1]. Preto sme sa rozhodli použiť model (7), bez možnosti plynulého nastavovania teploty. Na obr. 18 je zobrazené porovnanie oboch modelov, pri teplote 25°C s nameranými hodnotami. Detailné porovnanie modelov je zobrazené v prílohe 3, kde je zobrazený aj priebeh relatívnej chyby oboch modelov pre stav nabíjania a vybíjania zvlášť. Na obrázku 19 a 20 sú modelované priebehy kriviek SoC-OCV pre nabíjanie a vybíjanie pre všetky merané teploty. Grafické porovnanie nabíjania a vybíjania súčasne pre všetky teploty je zobrazené v prílohe 2.



Obr.18: Porovnanie modelov kriviek SoC-OCV: Model1-podľa vzťahu(8), Model2 - podľa vzťahu(13).



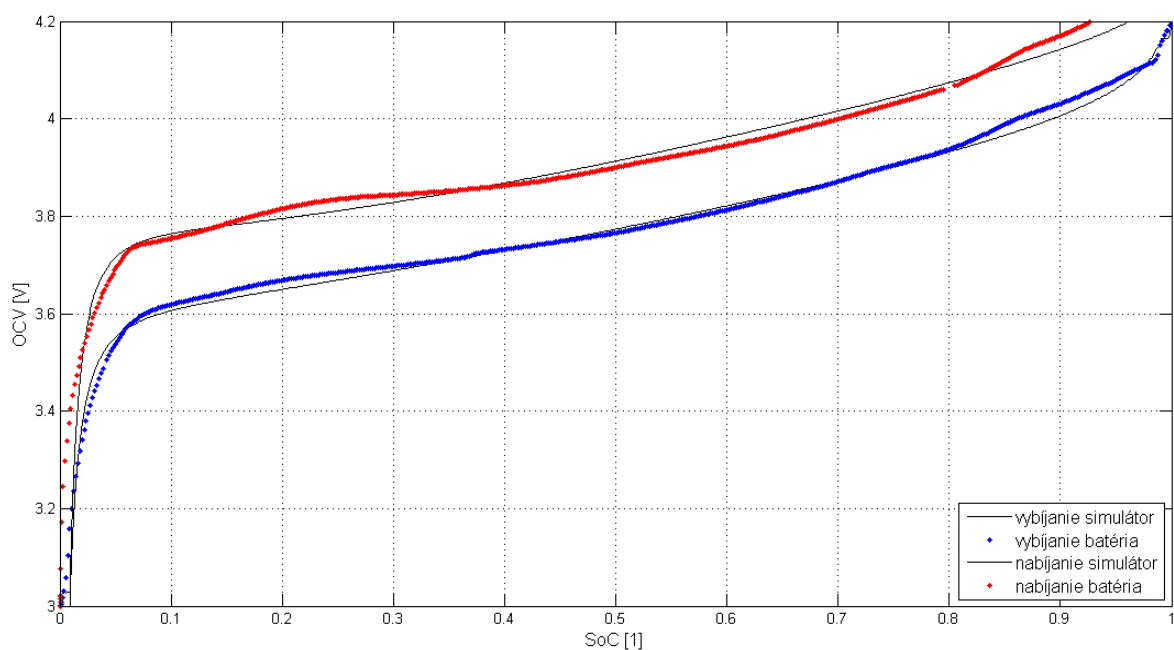
Obr.19: Porovnanie nameraných a preložených vybijacích kriviek SoC-OCV.



Obr.20: Porovnanie nameraných a preložených nabijacích kriviek SoC-OCV.

5.4 Testovanie simulátora pre stavy nabíjania a vybijania

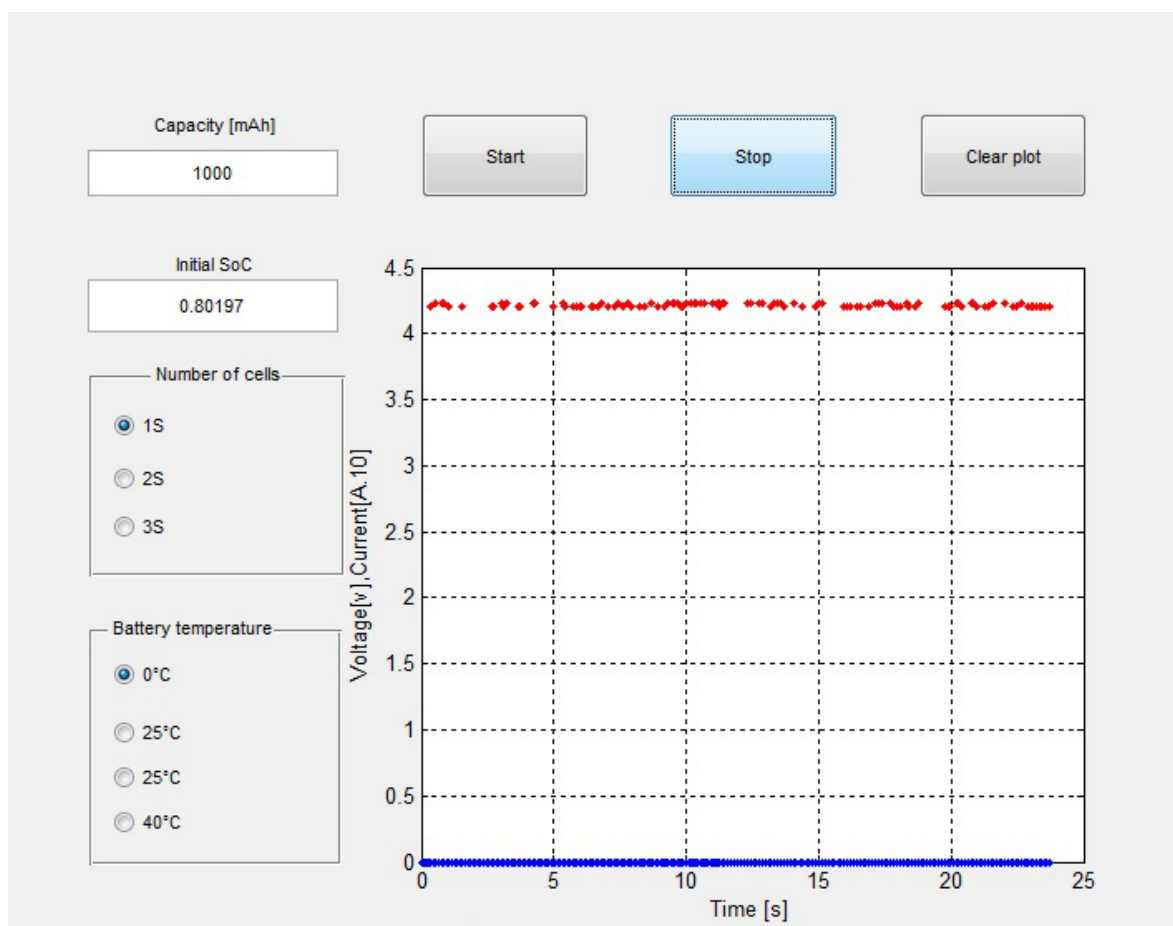
Funkčnosť zostrojeného simulátora bola overená testom nabitia a vybitia pri 25°C. Na svorky simulátora sme pripojili rezistor s odporom 45Ω. To približne zodpovedá prúdu 80mA, v závislosti od napätia simulátora. Týmto spôsobom sme simulátor vybili z plného nabitia až na úplné vybitie. Následne sme na svorky simulátora pripojili laboratórny zdroj a simulátor sme nabíjali metódou CC-CV s obmedzením na 80mA a 4,2V. Počas testu sme zaznamenávali svorkové napätie simulátora, prúd v obvode, stav nabitia a čas. Do obr.21 sme zobrazili porovnanie závislostí svorkového napätia od stavu nabitia medzi simulátorom a reálnou batériou.



Obr.21: Porovnanie priebehov nabíjajúcich a vybijajúcich kriviek skutočnej batérie a simulátora.

5.5 Tvorba real-time grafického užívateľského rozhrania

Na zjednodušenie ovládania celého simulačného zariadenia bolo vytvorené grafické užívateľské rozhranie (GUI). Vzhľad a rozloženie jednotlivých prvkov sme nastavili v grafickom toolboxe Matlabu GUIDE. Tento toolbox automaticky vygeneruje sadu funkcií, pre obsluhu prvkov v grafickom okne. Základné funkčné prvky GUI vidíme na obr. 22.



Obr.22: Snímka grafického rozhrania.

GUI umožňuje pomocou tlačidiel 'Start' a 'Stop' zastaviť alebo spustiť simuláciu batérie. Tlačidlom 'Clear plot' je možné kedykoľvek vymazať históriu údajov v grafe. Pred spustením simulácie je možné nastaviť základné parametre batérie a modelu ako je: kapacita batérie, počiatočný stav nabitia, počet článkov v sérii a teplota prostredia. Tie sú predané do 'base workspace' Matlabu. Po stlačení tlačidla 'Start' sa načíta do pamäte model batérie. Pomocou funkcie `set_param` je model batérie spustený na pozadí. Po spustení modelu sa aktivuje časovač, ktorý periodicky vyvolá prerušenie. V obslužnej funkcii prerušenia sa pomocou funkcie `get_param` vyčítajú aktuálne hodnoty napätia a prúdu z modelu a vykreslia sa do grafu. V grafickom rozhraní sa tiež zobrazuje hodnota stavu nabitia, upravovaním nastavenej počiatočnej hodnoty. Týmto spôsobom je možné zobrazovať aktuálne hodnoty modelu s periódou najmenej 500ms .

6 Záver

Cieľom tejto práce bolo zostrojiť funkčný Power-HIL simulátor Li-po akumulátora. Jeho úlohou je zrýchliť testovanie napájania malých bezdrôtových modulov.

Simulátor funguje na základe matematického modelu akumulátora. Po preskúmaní dostupných možností modelovania bol s využitím už existujúcich modelov vytvorený kombinovaný model, ktorý spája výhody empirického a fyzikálneho modelu. Východiskovou veličinou modelu je stav nabitia batérie, ktorý je odhadovaný na základe integrácie prúdu. Závislosť medzi stavom nabitia a elektromotorickým napätím bola modelovaná empirickým vzťahom. Na zohľadnenie vplyvu hysterézie bola táto závislosť modelovaná zvlášť pre nabíjanie a vybíjanie akumulátora. Pri vývoji modelu boli vynechané niektoré členy modelu, avšak toto zjednodušenie spôsobilo zhoršenie presnosti modelu na okrajoch intervalu stavu nabitia. Medzi koeficientami zložitejšieho modelu a teplotou nebola nájdená žiadna závislosť, takže teplotu prostredia je možné nastaviť len v štyroch diskretných bodoch : 0°C, 15°C, 25°C, 40°C. Myslíme si, že tieto hodnoty dostatočne pokrývajú rozsah teplôt, v ktorých môže zariadenie pri bežných podmienkach pracovať. V modeli bol zanedbaný vplyv relaxačných javov a závislosť dostupnej kapacity na veľkosti prúdu, pretože odber prúdu bezdrôtových modulov je veľmi malý oproti maximálnemu vybíjaciemu prúdu použitých batérií. Zanedbaná bola tiež zmena vnútorného odporu batérie v závislosti od stavu nabitia. Merania ukázali, že túto aproximáciu pri nízkych teplotách nie je možné použiť. Do budúcnosti by túto závislosť bolo vhodné preskúmať.

Po preštudovaní existujúcich modelov degradácie bolo zistené, že parametre modelu, ktorý by sme dokázali použiť na simuláciu, nie je v našich podmienkach možné určiť, nakoľko toto meranie by trvalo bez použitia špeciálneho vybavenia približne pol roka. Potrebné hodnoty sa nám nepodarilo získať ani v katalógu výrobcu. Vplyv degradácie sa preto nepodarilo do modelu zahrnúť.

Na základe predošlých skúseností a už odskúšaných zapojení bola navrhnutá hardvérová časť simulátora. Pred zostrojením bola táto koncepcia nasimulovaná v knižnici nástrojov Simulinku -Simscape. Simulácia potvrdila funkčnosť návrhu.

Následne bol hardvér zostrojený. Ten sa skladá z výkonového operačného zosilňovača a snímača prúdu so senzorom LEM. Hardvér simulátora je ovládaný pomocou meracej karty MF 624. Zariadenie dokáže generovať napätie v rozsahu 0-14V pri prúde 0-1,5A. Pri testoch batérie s malou kapacitou (250mAh) však takéto vysoké hodnoty napätia a prúdu neboli použité.

Na identifikáciu parametrov modelu bol použitý malý Li-po článok s kapacitou 250mAh. Pri testovaní bol využitý zostrojený hardvér simulátora. Na batérii bola vykonaná séria nabíjajúcich a vybíjajúcich testov pri veľmi malom prúde 80mA.

Na testovanie batérie pri rôznych teplotách, bola zostrojená jednoduchá tepelná komora. Teplotu v komore je možné nastaviť v rozsahu 0-60°C s presnosťou 0,1°C.

Z nameraných priebehov boli určené všetky parametre modelu. Matematický model bol implementovaný v prostredí Simulink, ktoré komunikuje s meracou kartou.

Aby bolo možné hotový model ovládať aj bez znalosti celého softvéru, pomocou nástroja Matlabu GUIDE bolo vytvorené grafické užívateľské rozhranie. To umožňuje nastaviť základné parametre simulovaného článku a zároveň v reálnom čase sledovať hodnoty prúdu a napätia na svorkách a aktuálny stav nabitia batérie.

Hotový Power-HIL simulátor bol testovaný pre nabíjanie laboratórnym zdrojom a vybíjanie odporovou záťažou. Hodnoty svorkového napätia a prúdu sa s reálnou batériou dobre zhodujú takmer v celom rozsahu stavu nabitia. Problematické je použitie empirického modelu v okolí stavu nabitia 0 a 1, keďže použitý model obsahuje logaritmické funkcie. Tento problém sme sa pokúsili vyriešiť saturáciou výstupu funkcie (8) na maximálnu a minimálnu hodnotu elektromotorického napätia článku. Aj napriek tomu že na okrajoch priebehu stavu nabitia dochádza k miernemu zlomu, táto nezrovnalosť by pri citlivom nastavení saturácie nemala spôsobovať problémy (nesprávne vyhodnotenie ukončenia nabíjania niektorých typov nabíjačiek).

7 Použitá literatura

- [1] CHALUPA, Jan. *Návrh zařízení pro Power HIL simulaci stejnosměrného motoru*. Brno, 2014, s. 91. Diplomová práce.
- [2] PLETT, Gregory L. *Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2. Modeling and identification*. In: Journal of power sources. Colorado Springs: Elsevier, 2004, s. 14.
- [3] PEBRIYANTI, Grace. *A lithium-ion battery modeling for a HIL-battery simulator*. In: 2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA). Bandung: IEEE, 2013, s. 185-190. DOI: 10.1109/IC3INA.2013.6819171. ISBN 978-1-4799-1078-6.
- [4] CHANG, Ming-Hui, Han-Pang HUANG a Shu-Wei CHANG. *A New State of Charge Estimation Method for LiFePO₄ Battery Packs Used in Robots*. Energies. 2013, (6): s. 2007-2030.
- [5] DAI, Haifeng, Xiaolong ZHANG, Weijun GU, Xuezhe WEI a Zechang SUN. *A Semi-Empirical Capacity Degradation Model of EV Li-Ion Batteries Based on Eyring Equation*. In: 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Beijing: IEEE, 2013, s. 1-5.
- [6] CELEVIA BATTERIES. *Lithium Polymer Battery Pack (LP502030) 250mAh 3.7V with Protection Circuit Module (PCM)*. China, 2013. Dostupné z: http://www.tme.eu/sk/Document/5f031952ba7d8c386fffc998074c61fb/ACCU-LP502030_CL.pdf
- [7] Jednobran. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Jednobran>
- [8] *Meracia karta MF 624* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/>
- [9] *Matlab Simulink* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/simulink/index-b.html>
- [10] *Lithium Ion Rechargeable batteries* [online]. 2013 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://cardi.igeofcu.unam.mx/techdocs/PowerSonic_batteries.pdf
- [11] FUKUI, M., I. TANAKA, R. MIYAHARA a S. GORA. *Cost-effective power management for smart house considering degradation of batteries*. In: 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). Auckland: IEEE, 2012, s. 1-6. ISBN 978-1-4673-2868-5.
- [12] TARGRAY TECHNOLOGY INTERNATIONAL INC. *Výrobca Li-ion batérii* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.targray.com/li-ion-battery/>
- [13] RAMADESIGAN, V., P. W. C. NORTHROP, S. DE, S. SANTHANAGOPALAN, R. D. BRAATZ a V. R. SUBRAMANIAN. *Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective*. Journal of the Electrochemical Society. 2012, 159(3): 31-45.
- [14] LAWSON, Barrie. WOODBANK COMMUNICATIONS LTD. *Battery and Energy Technologies* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/about.htm>
- [15] KRŠŇÁK, Jiří. *Studium vlastností katodového materiálu pro Li-ion články v závislosti na struktuře aktivní vrstvy*. Brno, 2014, s. 60. Diplomová práce.
- [16] BUCHMAN, Isidor. CADEX LTD. *Elevated Self-discharge* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25].

Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge

[17] BUCHMANN, Isidor. CADEX LTD. *Types of lithium ion* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

[18] AZOM. *Microstructural Characterization of Li-Ion Batteries Using Correlative Light and Electron Microscopy* [online]. 2011 [cit. 2015-05-25].

Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5813>

[19] ERDINC, O., B. VURAL a M. UZUNOGLU. *A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading*. In: 2009 International Conference on Clean Electrical Power. Capri: IEEE, 2009, s. 383-386. DOI: 10.1109/ICCEP.2009.5212025. ISBN 978-1-4244-2543-3.

[20] Arrhenius equation. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-25].

Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Arrhenius_equation

[21] BUCHMANN, Isidor. CADEX LTD. *Charging Lithium-ion* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries

[22] Lithium-ion battery. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery

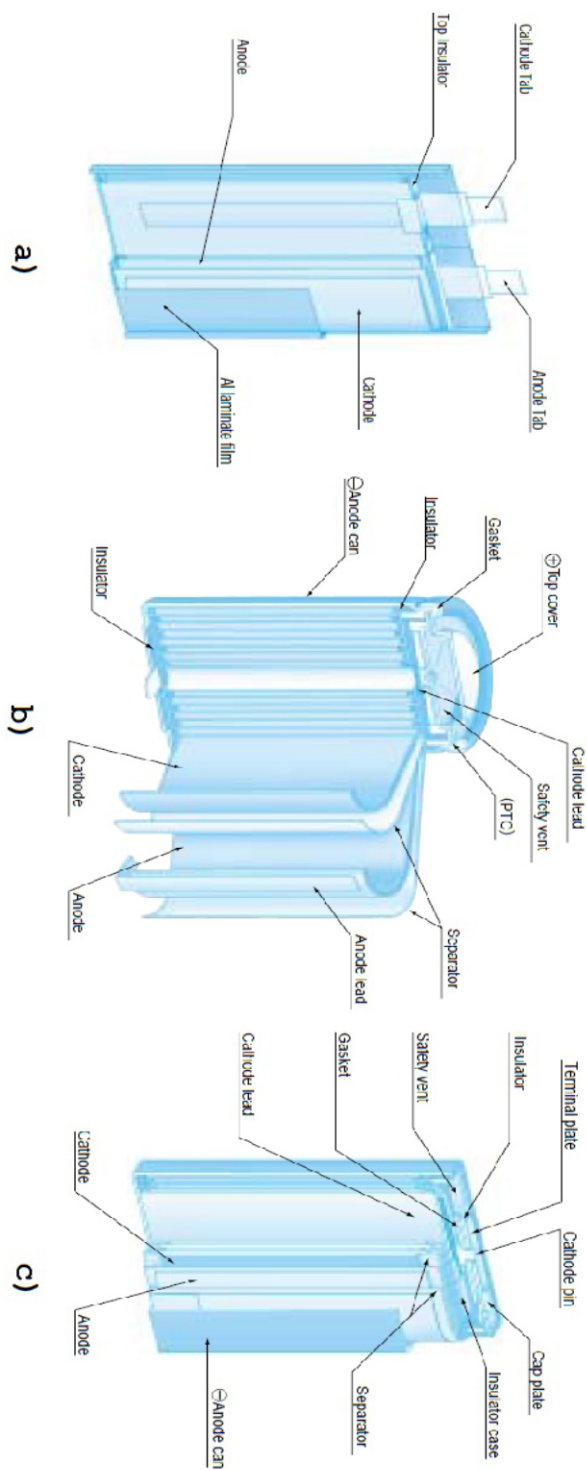
[23] KELLER, Keith a M.A. BANAK. *Getting the most battery life from portable systems*. Analog Applications Journal. 2008, (4): s. 15.

Zoznam použitých skratiek

PHIL	Power HIL	výkonové zariadenie v slučke
HIL	Hardware In the Loop	zariadenie v slučke
Li-ion	Lithium ion	
Li-po	Lithium polymer	
NiCd	Nickel Cadmium	
NiMH	Nickel Metal -hydride	
NMC	LiNiMnC	typ chemického zloženia batérie
CC-CV	Constant Current-Constant Voltage	konštantný prúd-konštantné napätie
SEI	Solid Electrolyte interphase	pevná vrstva v elektrolyte
SVM	Support Vector Machine	inteligentný výpočtový algoritmus
A/D	Analog/Digital	analogovo-digitálny
D/A	Digital/Analog	digitálne-analogový
OZ	Operačný Zosliňovač	
PWM	Pulse Width Modulation	pulzná šírková modulácia
DIR	Direction	smer
GUI	Graphical User Interface	grafické užívateľské rozhranie

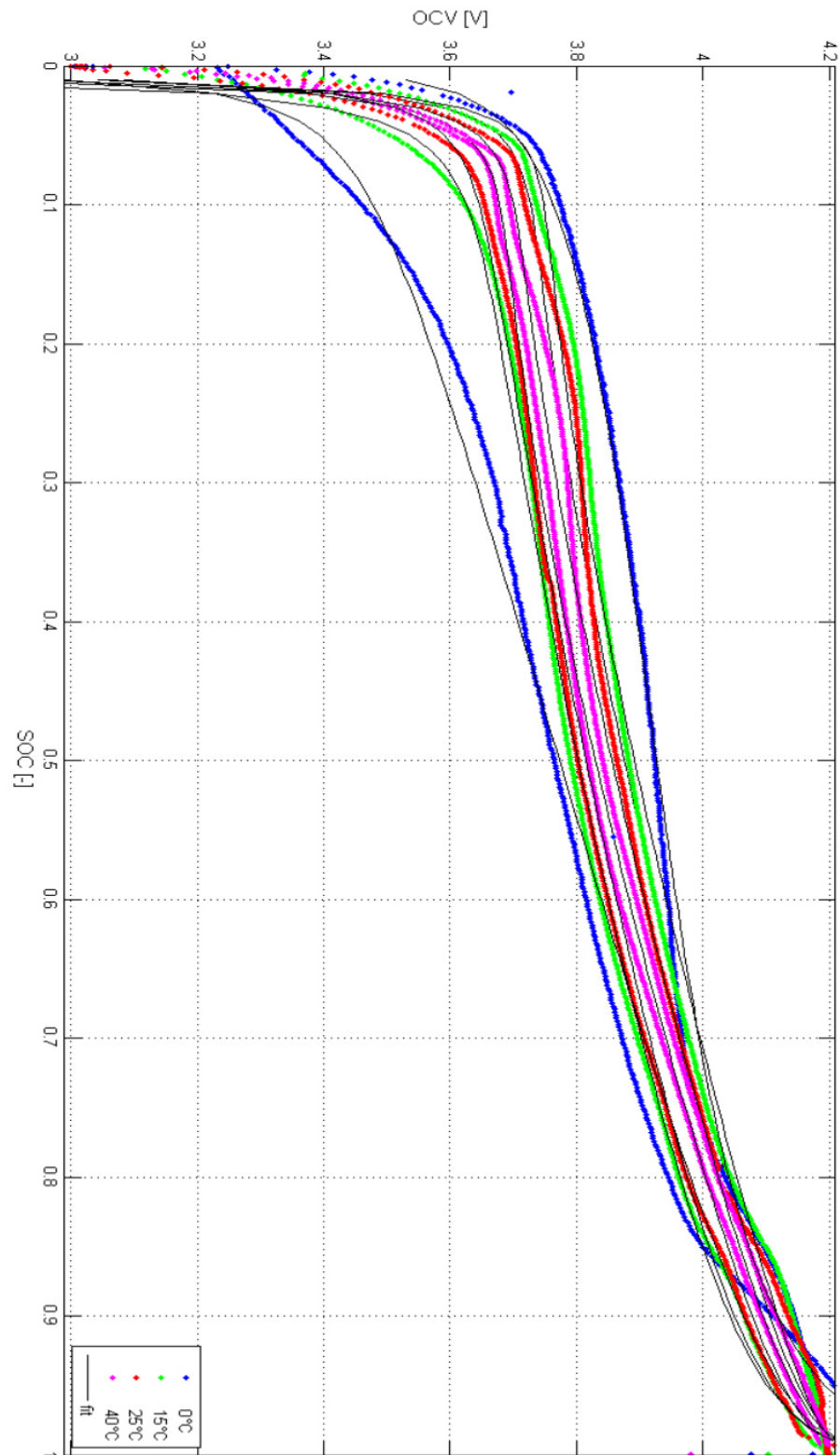
8 Prílohy

Príloha 1



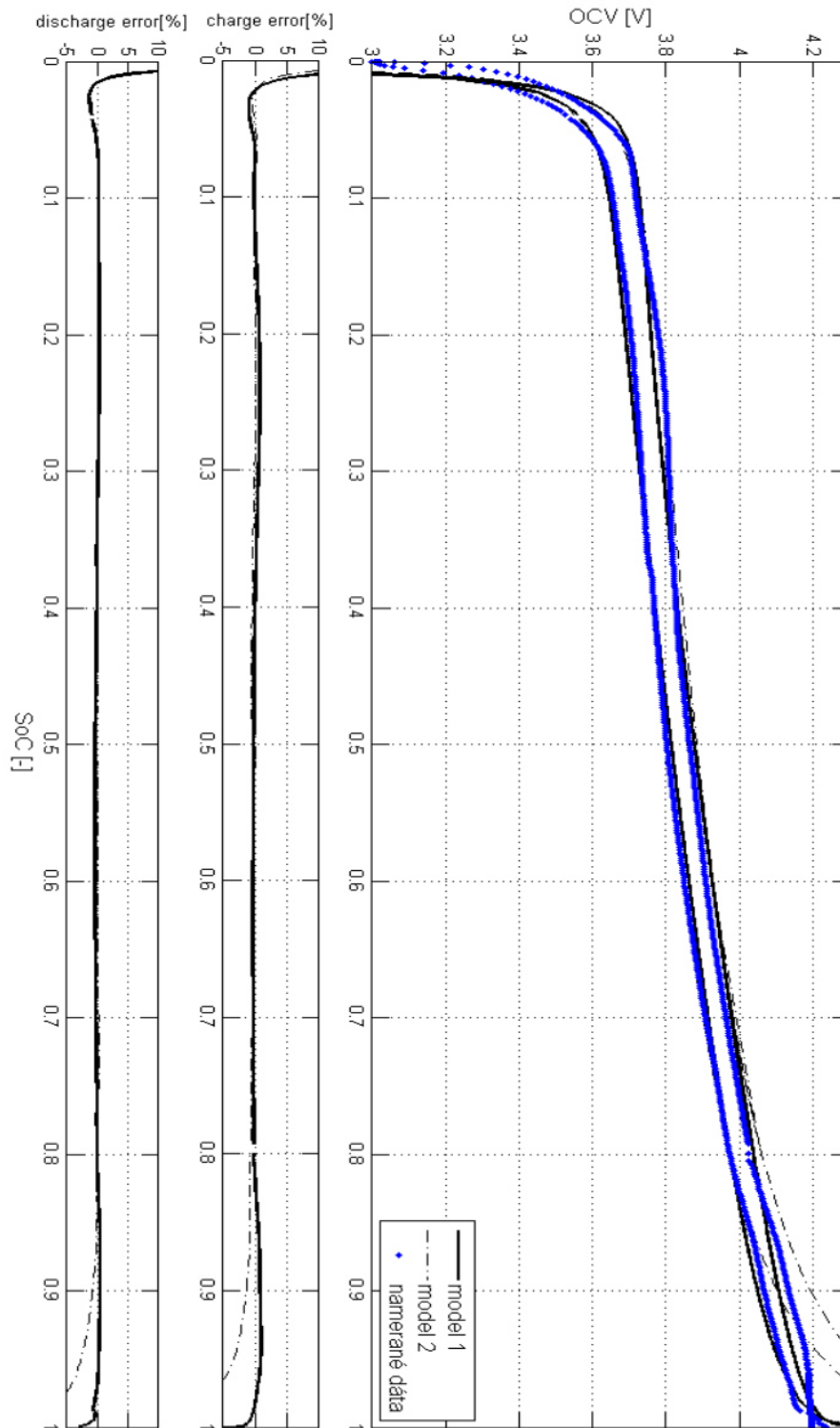
Obr.1.1: Základné typy prevedenia Li-ion článku: a) vreckovitý b) cylindrický c) prizmatický (prevzaté z [10]).

Príloha 2



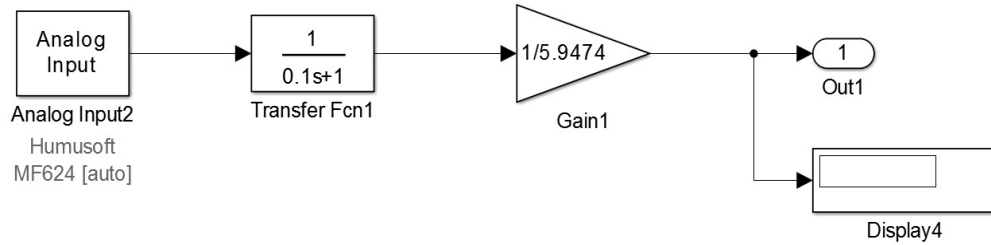
Obr.2.1: Graf závislosti meraného a modelovaného elektromotorického napätia od stavu nabitia.

Príloha 3

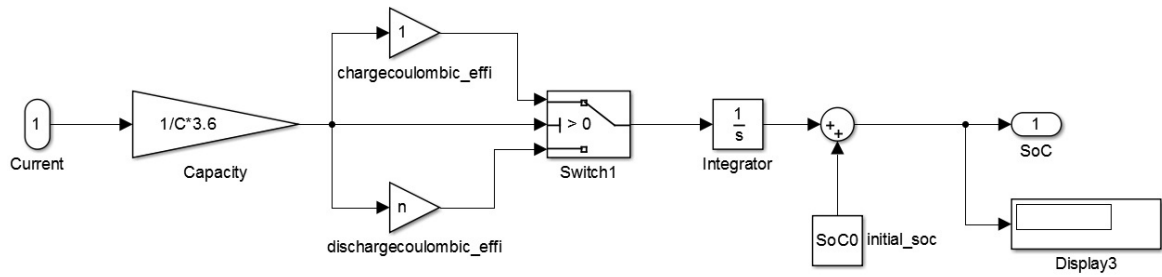


Obr.3.1: Porovnanie modelov kriviek SoC-OCV: Model1-podľa vzťahu(8), Model2-podľa vzťahu(13).

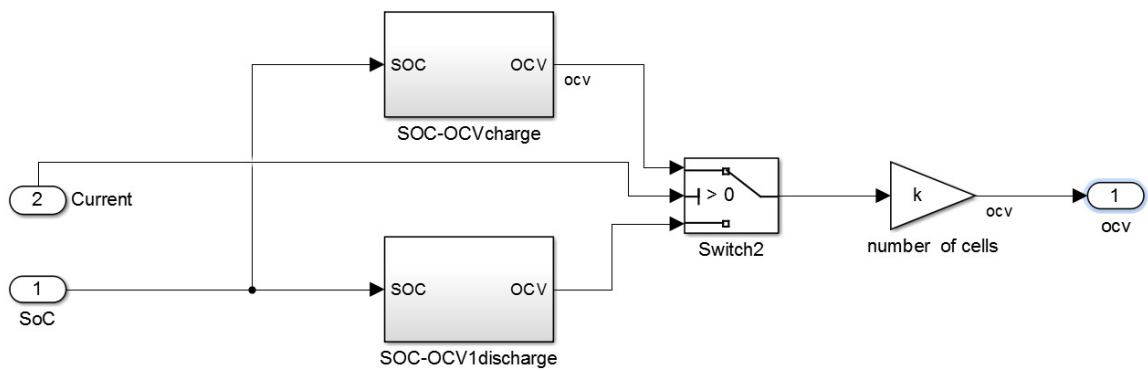
Príloha 4



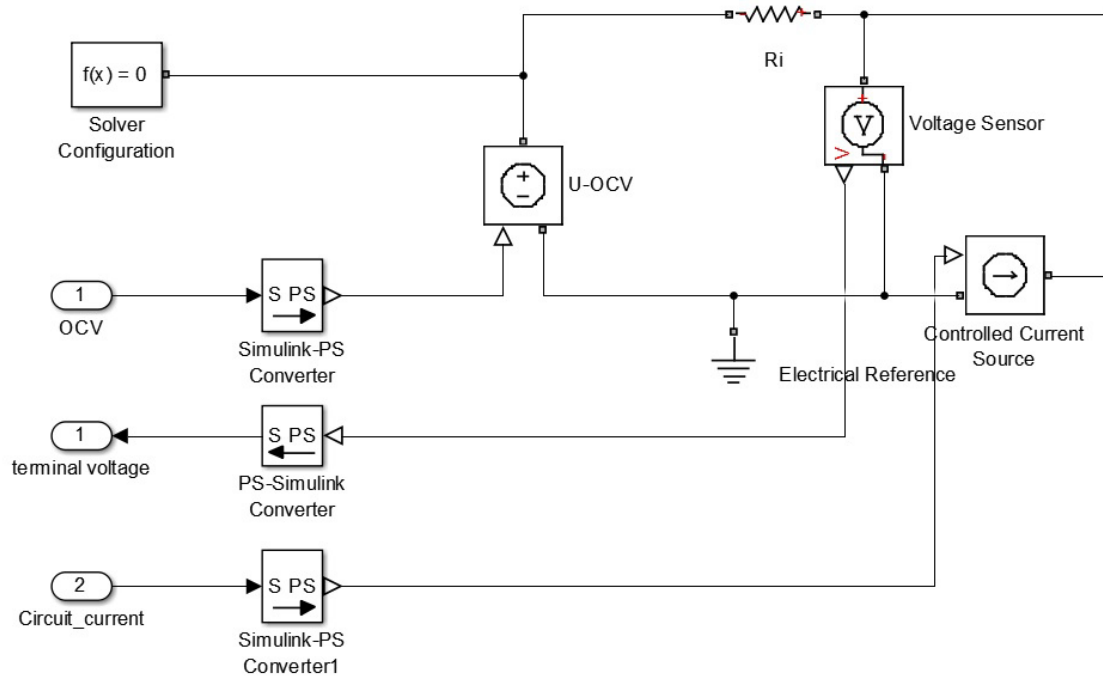
Obr.4.1: Bloková schéma prúdového snímača



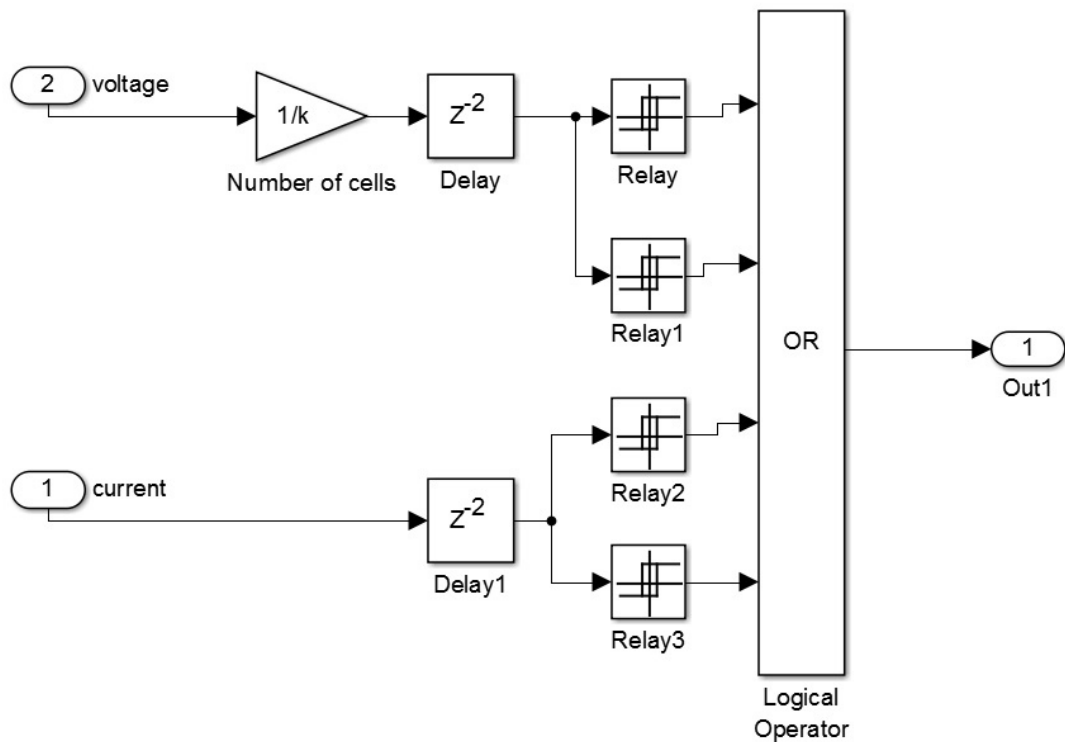
Obr.4.2: Bloková schéma integrátora prúdu



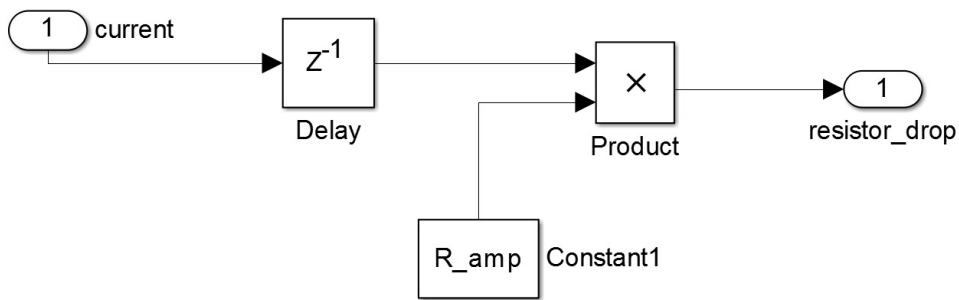
Obr.4.3: Bloková schéma funkcie určujúcej stav nabitia



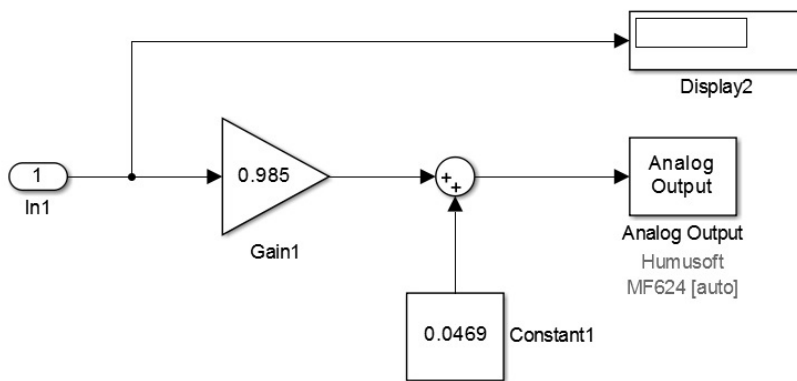
Obr.4.4: Náhradná schéma akumulátora v Simscape.



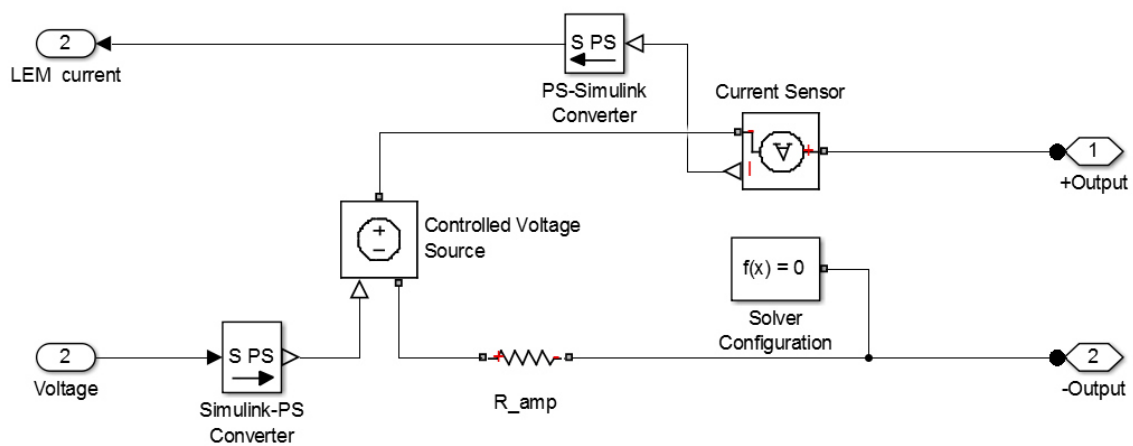
Obr.4.5: Bloková schéma ochranných obvodov.



Obr.4.6: Bloková schéma funkcie korigujúcej vnútorný odpor zosilňovača.



Obr.4.7: Bloková schéma výstupu do operačného zosilňovača.



Obr.4.8: Náhradná schéma emulátora v Simscape.