

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Vojtěch Loucký



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MODEL LI-ION AKUMULÁTORU

LI-ION BATTERY MODEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Loucký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radoslav Cipín, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Vojtěch Loucký

ID: 195382

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Model Li-ion akumulátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s principem funkce Li-ion akumulátorů.
2. Provedte literární rešerši na téma matematický model Li-ion akumulátoru.
3. V programu MATLAB Simulink sestavte model Li-ion akumulátoru.
4. Zaměřte se na prakticky použitelné způsoby identifikace parametrů modelu akumulátoru.
5. Provedte porovnání měřeného a simulovaného Li-ion akumulátoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. G. L. Plett. Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. Artech House. 2015. ISBN 1630810231
2. G. L. Plett. Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods. Artech House. 2020. ISBN 1630810274
3. M. S. Farag, R. Ahmed, S. A. Gadsden, S. R. Habibi, J. Tjong. A comparative study of Li-ion battery models and nonlinear dual estimation strategies. DOI: 10.1109/ITEC.2012.6243485
4. S.Barcellona,L. Piegari. Lithium Ion Battery Models and Parameter Identification Techniques. DOI: 10.3390/en10122007

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Radoslav Cipín, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá seznámením s principem Li-ion článků, provedením literární rešerše na téma matematické modely Li-ion článků a tvorbou vybraného matematického modelu v programu MATLAB, který je schopen simulovat průběh napětí a stav nabití v závislosti na čase, a to za různých podmínek baterie, jako je například stárnutí baterie. Je zde popsána tvorba jak modelu, tak postup identifikace parametrů nezbytných pro tvorbu modelu, včetně různých variant identifikace parametrů. Vybraný Theveninův model je následně srovnán s reálným průběhem a je zhodnocena přesnost modelu vůči měřenému průběhu a jeho silné a slabé stránky.

Klíčová slova

MATLAB, Simulink, Li-ion baterie, Matematické modelování, Theveninův model, Identifikace parametrů Li-ion článku

Abstract

This diploma thesis deals with description of the principle of Li-ion cells, literature search on the topic of mathematical models of Li-ion cells and the creation of a selected mathematical model in MATLAB, which is able to simulate the course of voltage and state of charge as a function of time for different ambient conditions, such as various aging of battery. The creation of both the model and the procedure of identification of parameters necessary for the creation of the model are described here as well as different options of identification of parameters. The selected Thevenin model is then compared with the real course and the accuracy of the model is evaluated with respect to the measured course.

Keywords

MATLAB, Simulink, Li-ion battery, Mathematical modelling, Thevenin model
Identification of parameters

Bibliografická citace

LOUCKÝ, Vojtěch. *Model Li-ion akumulátoru* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133067>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Radoslav Cipín.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Vojtěch Loucký</i>
VUT ID studenta:	<i>195382</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Model Li-ion akumulátoru</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radoslavu Cipínovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD.....	11
1. PRINCIP FUNKCE LI-ION ČLÁNKU	12
1.1 BATERIE A GALVANICKÉ ČLÁNKY	12
1.2 CHARAKTERISTIKA LI-ION ČLÁNKU	17
1.2.1 Historie Li-ion článků.....	17
1.2.2 Vlastnosti Li-ion článků.....	17
1.3 PRINCIP FUNKCE LI-ION ČLÁNKŮ	18
2. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ LI-ION ČLÁNKŮ	22
2.1 MODELOVÁNÍ ZALOŽENÉ NA ZÁKLADĚ NÁHRADNÍCH OBVODŮ	26
2.2 MATEMATICKÉ MODEL Y POUŽÍVANÉ PRO SIMULOVÁNÍ.....	30
3. IDENTIFIKACE PARAMETRŮ LI-ION BATERIE.....	41
3.1 METODY IDENTIFIKACE PARAMETRŮ	41
3.1.1 Online identifikace parametrů	41
3.1.2 Offline identifikace parametrů	44
3.1.3 Identifikace parametrů pomocí analytických metod.....	45
3.2 TEORETICKÝ POPIS IDENTIFIKACE PARAMETRŮ PRO LI-ION BATERII	46
3.3 MATEMATICKÉ POPSÁNÍ IDENTIFIKACE PARAMETRŮ.....	49
3.4 MOŽNOSTI PROKLÁDÁNÍ IDENTIFIKOVANÝCH PARAMETRŮ KŘIVKOU	50
4. REALIZACE MODELU V PROGRAMU MATLAB	53
4.1 PRAKTICKY PROVEDENÁ IDENTIFIKACE PARAMETRŮ V MATLAB	53
4.1.1 Ukázka možných proložení a jejich vlivů.....	57
4.2 MODEL V SIMULINK	63
4.2.1 PI regulátor	66
4.2.2 Ovládání proudu a limitace SOC.....	67
4.2.3 Výpočet SOC.....	68
4.2.4 Výpočet vnitřního odporu R_i	69
4.2.5 Výpočet R_i , C_1 a OCV	70
4.2.6 Výpočet paralelní kombinace RC.....	71
4.3 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	71
4.3.1 Za referenčních podmínek	71
4.3.2 Srovnání výsledků při poklesu kapacity o 30 %.....	76
4.3.3 Srovnání s naměřenými daty pro neznámou baterii	78
ZÁVĚR.....	80
LITERATURA.....	81
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	88

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vybíjecí křivka primárních článků pro různé materiály elektrod [1]	13
1.2	Vybíjecí křivka sekundárních článků pro různé materiály elektrod [1].....	14
1.3	Princip aktivace amonné rezervní baterie [1]	16
1.4	Princip funkce Li-Ion článku [10].....	19
1.5	Struktura sekundárního Li-Ion článku [13]	21
2.1	Závislost vnitřního odporu R_i na okolní teplotě [34].....	28
2.2	Základní matematický model Li-Ion článku.....	31
2.3	Odezva na vybíjecí impuls [2].....	32
2.4	Theveninův model	33
2.5	Vylepšený Theveninův model	34
2.6	RC model	35
2.7	PNGV model	36
2.8	Vylepšený PNGV model.....	37
2.9	Srovnání odezvy na vybíjecí impuls [15] a) RI model b) Theveninův model c) Vylepšený Theveninův model	38
2.10	Randlův obvod.....	38
2.11	Hystereze napětí Li-ion baterie.....	39
3.1	Vybíjecí a nabíjecí impuls pro identifikaci parametrů	47
3.2	Průběh vybíjecího impulsu	49
4.1	Identifikované parametry při vybíjení.....	55
4.2	Identifikované parametry při nabíjení	56
4.3	Proložení naměřeného OCV exponenciálou.....	57
4.4	Proložení naměřeného OCV polynomem 1. stupně	58
4.5	Proložení naměřeného OCV polynomem 8. stupně	59
4.6	Proložení naměřeného OCV součtem 8 sinusových funkcí.....	60
4.7	Proložení naměřeného OCV součtem 8 Gaussových křivek	61
4.8	Náhled na celkový model v Simulink	63
4.9	Přehled celkového uspořádání hlavního subsystému	65
4.10	Subsystém PI regulátor	66
4.11	Průběh nabíjení Li-Ion baterie [25].....	66
4.12	Subsystém kontroly proudu a limitace SOC.....	67
4.13	Blokové schéma výpočtu SOC	68
4.14	Schéma subsystému pro určení původního SOC	69
4.15	Schéma výpočtového bloku pro vnitřní odpor.....	69
4.16	Schéma výpočtového bloku pro výpočet OCV	70
4.17	Schéma výpočtového bloku pro paralelní kombinaci.....	71
4.18	Nastavení vybíjecího pulsního generátoru.....	72
4.19	Průběh SOC a napětí při vybíjení baterie	72
4.20	Srovnání simulovaného pulsního vybíjení s reálným průběhem baterie	73
4.21	Detail srovnání simulovaného pulsního vybíjení s reálným průběhem baterie.....	73
4.22	Průběh SOC a napětí při nabíjení baterie	74
4.23	Srovnání simulovaného pulsního vybíjení s reálným průběhem baterie	75
4.24	Detail srovnání simulovaného pulsního vybíjení s reálným průběhem baterie.....	75
4.25	Průběh napětí na baterii při poklesu kapacity o 30 %	76
4.26	Průběh nárůstu vnitřního odporu baterie při poklesu kapacity o 30 %.....	77
4.27	Pohled na odezvu na vybíjecí impuls při poklesu kapacity o 30 %	77

4.28	Pohled na velikost vnitřního odporu pro vybíjecí impuls při poklesu kapacity o 30 %	78
4.29	Srovnání simulované baterie s naměřeným průběhem na neznámé Li-Ion baterii.....	79

SEZNAM TABULEK

1.1	Výhody a nevýhody Li-Ion článků	18
3.1	Přehled metod identifikace parametrů.....	46

ÚVOD

V dnešním světě význam baterií a galvanických článků čím dál více roste a můžeme je vidět všude okolo nás, od baterií v automobilu přes baterie v mobilních telefonech až po baterie ve vozítku Mars Exploration Rover. Jejich historie však sahá do značné historie. První náznaky předpotopních baterií lze datovat do Parthské říše. Toto zařízení bylo schopno produkovat 1,1 až 2 V a obsahovalo téměř totožné části jako dnešní galvanické články. Avšak za prvního vynálezce baterie lze považovat Alessandro Volta, který položil svými experimenty základ baterií, tak jako je dnes známe.

Samotné Li-ion akumulátory přišly na trh v 70. letech minulého století, avšak experimenty s lithiem lze datovat do roku 1912, kdy G.N.Lewis začal experimentovat s využitím lithia v bateriích. Za posledních 30 let však lithium – iontové akumulátory udělaly obrovský krok vpřed, a to především díky jejich skvělým vlastnostem, které předčily ostatní typy baterií. Mluvíme zde především o jejich poměru váhy na výkon a jejich měrné hustotě energie. Díky jejich velkému využití v dnešním světě rostou i nároky na jejich vývoj, což je přímo spojeno s tlakem na vývojové náklady. To je i hlavní motivací této diplomové práce, která má za cíl vytvořit takový model Li-ion akumulátoru, který by byl dostatečně přesný pro jeho využití v možných praktických aplikacích.

První část práce se zabývá literární rešerší samotných galvanických článků, jejich dělením na primární, sekundární, rezervní a palivové, jejich funkcí, výhodami a rozdíly. Na tuto část navazuje už samotné představení Li-ion článků, především jejich elektrochemický princip, jejich vlastnosti a v neposlední řadě jejich struktura a složení.

Další část práce se věnuje především matematickému modelování Li-ion článků. Jsou zde představeny různé matematické modely od nejjednodušších až po ty složitější a jsou zde taktéž zhodnoceny jejich silné a slabé stránky včetně jejich celkové použitelnosti. Součástí této části je též popis problematiky identifikace parametrů pro samotnou tvorbu modelu a jsou zde představeny jednotlivé varianty identifikace parametrů, včetně jejich možné implementace do modelů. Mimo jiné jsou tyto varianty i zhodnoceny z pohledu použitelnosti v reálné aplikaci.

Poslední kapitola ukazuje realizaci samotného vybraného matematického modelu Li-ion článku v prostředí programu Matlab. Jsou zde představeny jednotlivé části systému společně s výchozími rovnicemi, ze kterých je tento model tvořen. Taktéž jsou zde popsány jednotlivé teoretické předpoklady a vlivy, které ovlivňují celý model. Tento model je následně srovnán s naměřenými daty při různých podmínkách a jsou zhodnoceny jeho silné a slabé stránky.

Výsledkem je tedy model, který je použitelný v praktických aplikacích pro predikci výkonu, kapacity, životnosti a dalších parametrů Li-ion článku a který je možné použít na další simulace v programu Matlab či pro simulace chování baterie za různých podmínek.

1. PRINCIP FUNKCE LI-ION ČLÁNKU

1.1 Baterie a galvanické články

Galvanický článek je zařízení, které převádí chemickou energii obsaženou v použitém materiálu na energii elektrickou pomocí elektrochemické reakce. Tato reakce se skládá ze dvou chemických jevů, oxidace a redukce, které probíhají ve stejný okamžik. Na základě toho, zda používáme primární či sekundární článek, můžeme u druhé zmíněného typu mluvit taktéž o dobíjení galvanického článku, přičemž celá tato elektrochemická reakce probíhá obráceně a měníme elektrickou energii na chemickou. [1]

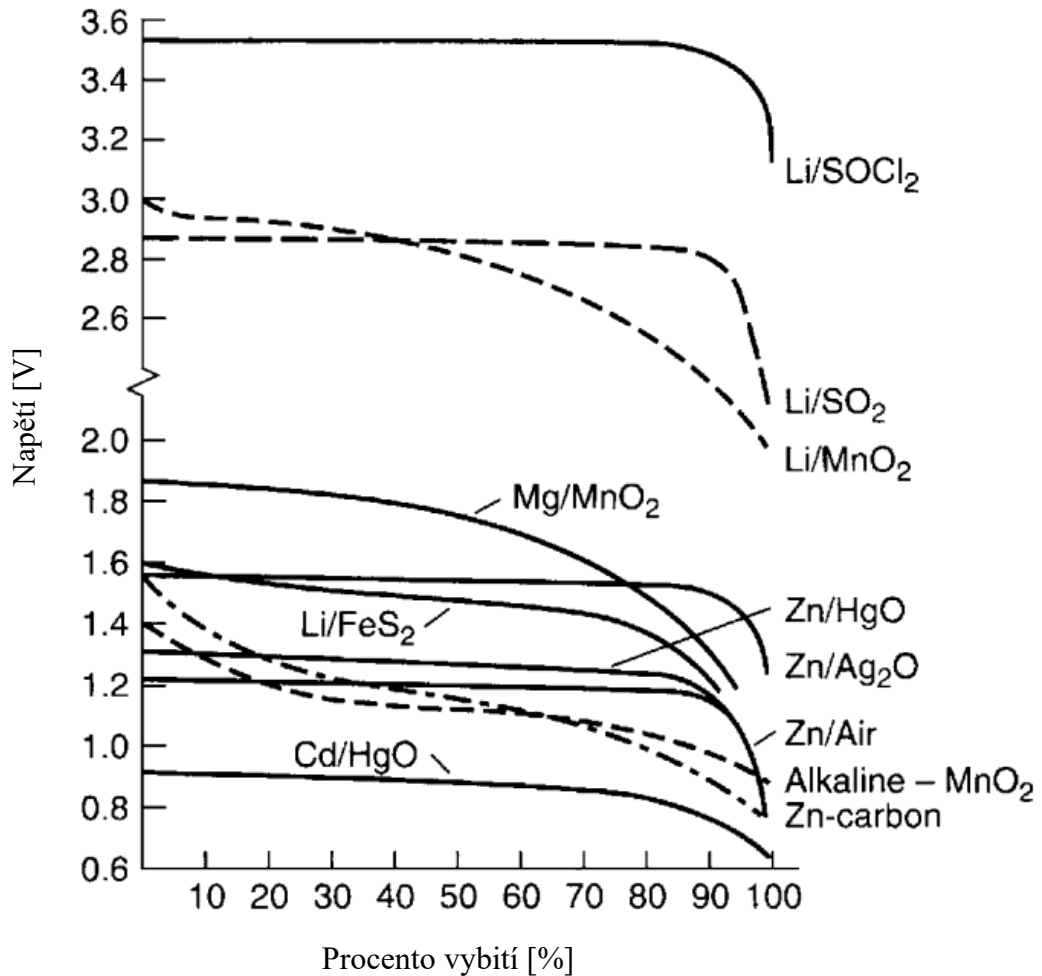
Pokud bychom se zaměřili na rozdíl ve významu mezi baterií a článkem tak můžeme říct, že baterie se skládá z jednotlivých článků, ve kterých probíhá samostatná elektrochemická reakce, a z možných doplňkových zařízení, např. pojistky, monitory, ovládací obvody atd. Větší množství článků zapojených sériově či paralelně následně tvoří samostatnou baterii. Články se zapojují do větších skupin z důvodu dosažení požadovaného výkonu. Toto zapojování do skupin se řídí Kirchhoffovým proudovým a napěťovým zákonem, tzn. že pro dosažení lepší napěťové hladiny baterie je vhodné zapojit články do série, jelikož jejich napětí se sečtou, avšak jejich proud zůstane totožný jako při použití jednoho článku. Stejná úvaha platí pro paralelní zapojení, kde napěťová hladina několika článků zůstane stejná jako při použití jednoho článku, avšak hodnota proudu, který baterie poskytne, bude součtem všech proudů, které prochází samotnými články. Posledním označením pro baterie může být termín akumulátor. Tento termín se využívá pro označení baterií, které jsou tvořeny sekundárními články a lze je díky tomu dobíjet. Jelikož podstata termínu článek a baterie je velmi blízká, ne-li totožná, budou oba tyto termíny v práci použity pro popsání samotných článků. [1] [2]

Základní možné členění článků je dělení na:

- primární články
- sekundární články
- rezervní články
- palivové články

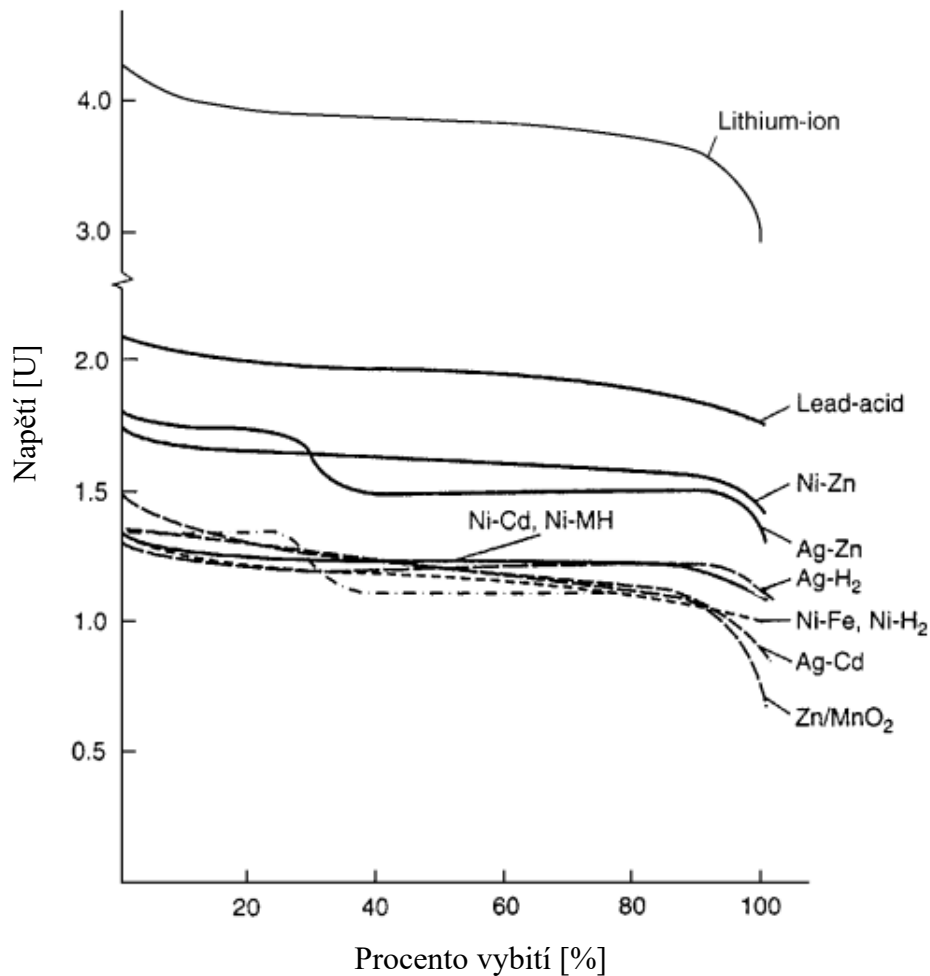
Primární články jsou nejjednoduššími články, které nejsou dělány pro možnost nabíjení a po jejich vybití jsou nepoužitelné. Jejich elektrolyt se většinou nenachází volně kapalně, ale je vázaný v kladné elektrodě. Díky tomu bývaly dříve primární články označovány jako suché články. Jejich výhody lze najít v jejich ceně, váze, vysoké hustotě energie, dlouhé životnosti či jednoduchém použití. Jako klasického zástupce primárních článků lze považovat alkalické baterie, které jsou známé též jako „tužkové“ baterie. Elektrody těchto článků jsou většinou tvořeny zinkem a oxidem manganičitým a jako

elektrolyt je zde použit hydroxid sodný nebo hydroxid draselný. Mezi další možnosti materiálu elektrody se řadí hořčík a oxid mangančitý, zinek a oxid stříbrný atd. [1] [3]



Obrázek 1.1 Vybíjecí křivka primárních článků pro různé materiály elektrod [1]

Pokud se podíváme na sekundární články, tak jako největší odlišnost vůči primárním článkům lze považovat jejich schopnost dobíjení elektrické energie. Lze tedy říct, že jsou schopné obrácené elektrochemické reakce. Často jsou označovány jako akumulátory, jelikož akumulují elektrickou energii a lze je využít jako uložení energie. Jejich použití lze vidět všude okolo nás, od baterie v telefonu přes baterie elektromobilů až po záložní zdroje energie. Jejich výstupní charakteristika napětí závisí na procentu nabití baterie, ale průměrně se pohybuje v rozmezí 1,2 až 3,7 V, v závislosti na použitém materiálu elektrod. Jako rekordman zde vystupují sekundární Li – ion články, které dosahují výstupního napětí až 3,7 V. Pokud je srovnáme s primárními články, tak je možné konstatovat, že dosahují lepšího výstupního napětí, tak jako lze vidět ve výstupních charakteristikách, viz obrázek 1.1 a obrázek 1.2. [1]



Obrázek 1.2 Vybíjecí křivka sekundárních článků pro různé materiály elektrod [1]

Mezi další výhody sekundárních článků lze řadit vysokou hustotu energie, plochou křivku vybíjení či jejich dobrý výkon při nízkých teplotách. Elektrody sekundárních článků mohou být tvořeny značnou škálou kombinací, avšak mezi nejklasičtější se řadí olovněné akumulátory, tzv. „*lead-acid*“, jejichž elektrody jsou na bázi olova a elektrolyt je tvořen kyselinou sírovou. Za dalšího zástupce lze považovat sekundární články s elektrodami tvořenými niklem a kadmíem, popřípadě niklem a železem, niklem a zinkem atd. Všechny tyto kombinace se řadí mezi sekundární články a mají své využití v různých aplikacích. Jedním z nejdůležitějších sekundárních článků je však lithium iontový článek, kterému se věnuje celá tato práce. [1] [4]

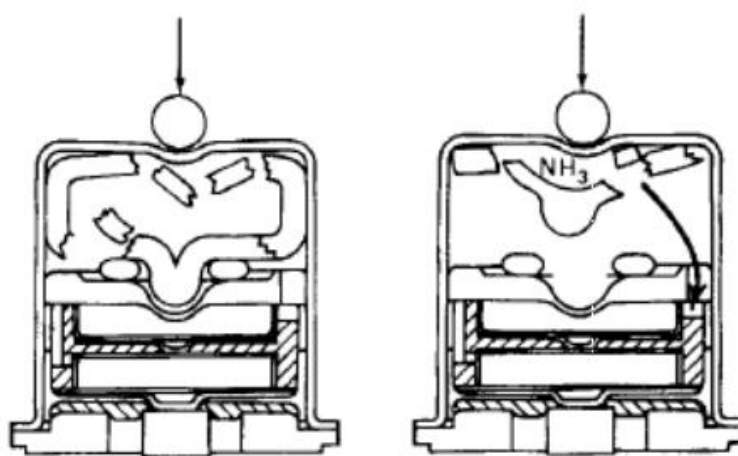
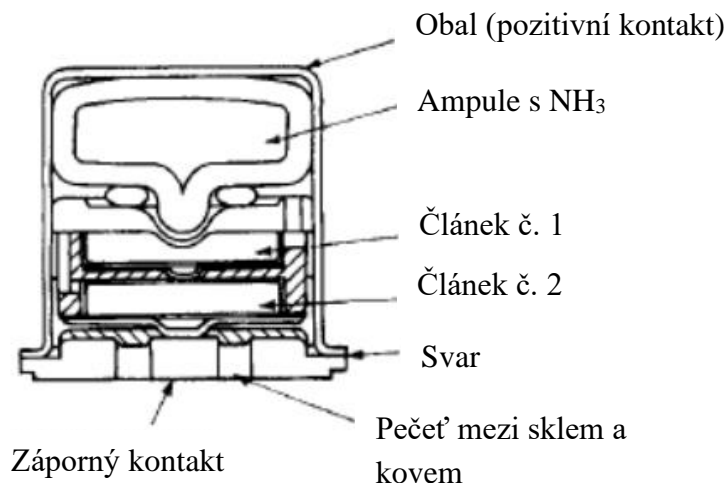
Předposlední zástupce rozdělení galvanických článků je takzvaný rezervní článek. Tento článek se využívá jako záložní zdroj energie s extrémní dobou skladování. Klíčem k dlouhé době skladování je oddělení jednoho z komponentů ze samotného článku. Nejčastějším komponentem, který bývá oddělen je elektrolyt, který bývá uskladněn v odděleném rezervoáru. Díky tomuto oddělení může článek být skladován po více jak 20 let, a i po té době bude po aktivování schopen provozu. Nevýhodou tohoto řešení je však značný pokles kapacity článku, a to až o 50 %, jelikož přidáním rezervoáru

a aktivačního zařízení se zmenší hustota energie, kterou samotný článek má. Hlavní využití rezervních článků se nachází v armádních aplikacích, jako například v raketách, torpédech a dalších zbraňových systémech. Jako zástupce je zde možné uvést vodou aktivované rezervní články, které používají hořčík jako materiál pro výrobu anody a chlorid stříbrný jako katodu. Tento zástupce jako elektrolyt využívá slanou vodu a jeho využití leží v torpédech ponorek. Mezi další možné typy aktivace článků je možné uvést aktivaci pomocí elektrolytu, tepla či plynu. Princip aktivace článku je možné vidět na obrázku 1.3. [1]

Posledním zástupcem jsou palivové články. Palivové články fungují na principu elektrochemické reakce, stejně jako ostatní typy článků, avšak kromě elektrické energie produkují teplo. Na rozdíl od ostatních typů článků se nevybíjejí ani nenabíjejí, ale pracují do té doby, dokud je dodáváno palivo do článku. Elektrody jsou v tomto případě využívány pro dodávání jednotlivých složek paliva do článku a nepodléhají díky tomu opotřebování, jako v případě elektrod primárních a sekundárních článků. V případě palivových článků se na straně anody dostává do článku plynné či kapalně palivo, například vodík, který reaguje se vzduchem nebo kyslíkem, který se dostává do článku skrze katodu. Dohromady vytváří následně chemickou reakci, která má za důsledek pohyb elektronů a vznik elektřiny s vedlejším produktem tepla. Technologii palivových článků můžeme rozdělit do dvou kategorií.

- Přímé palivové články
- Nepřímé palivové články

Přímé palivové články jsou charakterizovány tím, že samotná chemická reakce mezi palivem, například vodíkem či metanolem, probíhá přímo v samotném článku. Na druhou stranu v případě nepřímých palivových článků se nejprve palivo obohacuje za vysoké teploty katalytickou reakcí, tak aby jeho výstupem bylo palivo s velkým množstvím vodíku, které potom reaguje přímo v palivovém článku. Jejich využití můžeme najít v pohonech pro raketoplány pro lety do vesmíru, ale taktéž jako možná alternativa pro primární a sekundární články v konzumní elektronice. [1] [6]



Obrázek 1.3 Princip aktivace amonné rezervní baterie [1]

Na obrázku 1.3 je možné vidět, jakým principem probíhá aktivace amonné rezervní baterie, kde vlivem vyvinutí externí síly, například pomocí nějakého kontaktu, dochází k rozbití obalu, ve kterém se nachází elektrolyt, který poté vnikne mezi katodu a anodu, kde začne probíhat elektrochemická reakce a článek začne dodávat elektrickou energii.

Jako příklad je možné uvést studii, ve které byl článek vytvořen z katody, která byla složena z papíru, tzn. z celulózy a uhlíkových nanotrubiček a z anody, která byla tvořena kouskem plechu z hliníku. Za normální situace takto složený článek neprodukoval žádnou elektrickou energii, avšak po vstříknutí roztoku KOH mezi tyto dvě elektrody článek začal produkovat elektrickou energii s velikostí napětí 1,3 V. [26]

1.2 Charakteristika Li-Ion článku

1.2.1 Historie Li-ion článků

Samotný Li-ion článek můžeme najít jako primární a taktéž jako sekundární článek, avšak tato kapitola a taktéž celá práce se zabývá sekundárními lithiium – iontovým články. Jak už bylo představeno v úvodu, význam Li-ion článků ve světě čím dál více roste a tím rostou i nároky na jejich vývoj a kvalitu. Historie sekundárních Li-ion článků však sahá do 19. století, kdy bylo lithiium objeveno. Přesněji se jednalo o rok 1817, kdy Arfwedson a Berzelius objevili lithiium při zkoumání směsi horniny. Trvalo však další 4 roky, než bylo lithiium izolováno pomocí chemické elektrolýzy a dalších téměř 100 let, než se G. N. Lewis začal zabývat jeho chemickými vlastnostmi. V roce 1958 Harris přišel při jeho experimentech s rozpouštěním lithia v esterech na velmi důležitou vlastnost lithia. Přišel na to, že okolo lithia se začne vytvářet pasivační vrstva, která brání přímé reakci mezi lithiem a roztokem, avšak tato vrstva umožňuje průchod iontů. Tato vlastnost ještě zvýšila zájem o lithiium a jeho možný potenciál na výrobu anod pro baterie. [7]

Okolo roku 1960 se na trhu objevily a byly dostupné první primární lithiové baterie, avšak jejich sekundární protějšek byl stále ve vývinu. Hlavním vývojovým problémem zde nebyla anoda, ale pro vývoj sekundárních článků byla spíše problematická katoda, jelikož anoda byla primárně tvořena lithiem, to znamená, že u ní nebyl problém lithiové ionty přijímat či odevzdávat elektrolytu. Avšak v případě katody, která byla v počátku tvořena hlavně sulfidy kovů, se jednalo o hledání takové látky, která by byla schopna opakovaného cyklu nabíjení a vybíjení a zároveň měla dobré vlastnosti pro samotnou elektrochemickou reakci.[7] [8]

První komerčně produkovanou sekundární lithiium-iontovou baterií se stala baterie představená firmou Sony v roce 1991. V té době se jednalo o převratnou technologii, jelikož jako první přišli s anodou, která se skládala ze směsi grafitu a lithia s polyolefinem. Od té doby lithiium-iontové články udělaly však znovu velký krok kupředu, a to především díky jejich velké poptávce na trhu a skvělým vlastnostem, kterým se bude věnovat následující odstavce. [9]

1.2.2 Vlastnosti Li-ion článků

Samotné Li-ion články nabývají popularity především díky svým velmi dobrým elektrickým a chemickým vlastnostem. Ať už jsou to vlastnosti, které jsou zajímavé především z pohledu zákazníka, jako například dobrý poměr mezi velikostí a váhou, či vlastnosti více elektrického původu, například vysoká hustota energie, která dosahuje až hodnot 240 Wh/kg, či nízké samovybíjení, v některých případech pouhé 2 % za měsíc.

Jako další pozitivní vlastnost lze uvést vysokou životnost, která dosahuje klidně 1000 nabíjecích cyklů. V neposlední řadě je nutné uvést také velký rozsah teplot, ve kterých může sekundární Li-ion článek pracovat, vybíjení je možné v rozmezí -40 °C až +65 °C.

Toto je jen drobný výčet z velkého množství pozitivních vlastností, které udělaly z Li-ion baterií jedny z nejžádanějších baterií na světě. [1]

Tabulka 1.1 Výhody a nevýhody Li-Ion článků

Výhody	Nevýhody
Velmi dobrý poměr velikost a váhy na výkon	Vysoká cena
Velký rozsah pracovních teplot	Nutnost ochranného obvodu
Vysoká hustota energie	Degradace při velmi vysokých teplotách
Bezúdržbový provoz	
Dlouhá životnost	
Malé procento samovybíjení	
Možnost rychlého nabíjení	
Vysoká kapacita	
Vyšší jmenovité napětí	

Z těchto vlastností, jejichž výčet je možné vidět v tabulce 1.1, lze také vidět, že pomocí Li-ion článků můžeme dosáhnout velmi malé a lehké baterie s velkou energií a velkou kapacitou. Ale Li-ion články, tak jako každá technologie, nemá pouze pozitivní, ale i negativní vlastnosti. Jako jednu z hlavních nevýhod je možné označit nutnost ochranného obvodu. Tato skutečnost vzniká z důvodu, že při nabití na vyšší energii, než jaká je baterie schopna zvládnout, roste pravděpodobnost, že jejich obal může prasknout a elektrolyt může vytéct, či v horším případě celý článek může vybuchnout. Podobný problém může nastat při vybití na velmi nízké napětí, často okolo 2 V, kdy článek už není schopen obnovení jeho předchozího stavu pomocí nabíjení. Jako další nevýhodu Li-ion článku lze považovat rychlou ztrátu kapacity při práci za velmi vysoké teploty, klasicky více než 65 °C. [1]

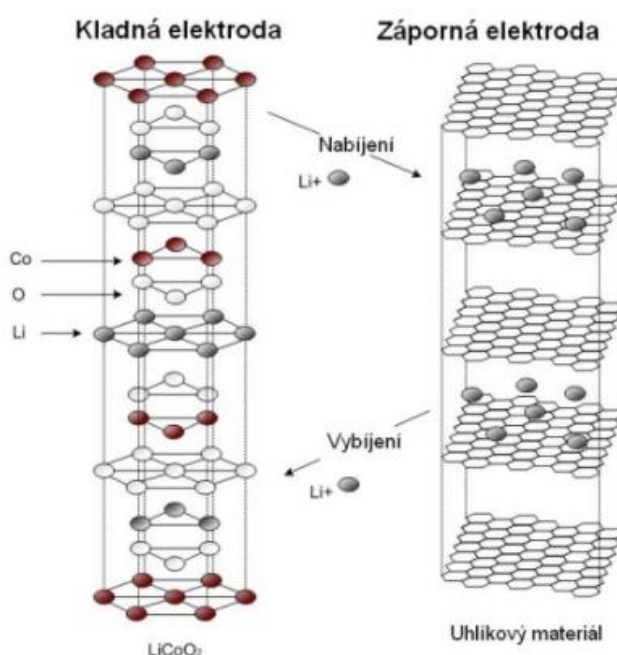
1.3 Princip funkce Li-Ion článků

Princip Li-ion článku můžeme v jednoduchosti popsat jako pohyb iontů lithia (Li^+) mezi anodou a katodou tam a zpět. Odtud taky anglické označení „*rocking chair batteries*“, „*swing*“, „*shuttlecock*“, všechny tyto názvy odkazují na pohyb iontů tam a zpět.

Pokud se však podíváme blíže na princip Li-ion článků tak zjistíme, že Li-ion články nefungují jako klasické články na principu redoxních reakcí, ale jedná se o typ tzv. „*insertion-electrode*“. Zde je hlavním použitým principem takzvané interkalování neboli vniknutí do krystalové mřížky elektrody bez toho, aby iont reagoval s materiálem elektrody. Díky tomu je lithium buď absorbováno z elektrolytu do materiálu elektrod

(interkalování) nebo je vyloučeno z materiálu elektrod do elektrolytu (deinterkalování). [2] [10]

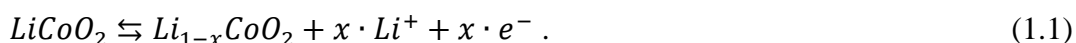
Tady tento princip však vytváří určité požadavky na elektrody, díky čemuž byl a je vývoj elektrod obtížnější. Jednak musí mít elektrody otevřenou krystalickou strukturu, aby ionty lithia mohly volně vstupovat a vystupovat z materiálu bez toho, aby s ním chemicky reagovaly. Druhá hlavní podmínka vychází z opačné strany elektrod, z obvodu. Elektrody musí být schopny akceptovat elektrony z obvodu či dodávat elektrony do obvodu, aby vždy vyrovnaly náboj v elektrodách. Díky tomu, že zde dochází k principu interkalování, tak se samotná krystalická mřížka elektrod nemění a má to za důsledek delší životnost elektrod a stabilnější výkon baterie. [2] [10]



Obrázek 1.4 Princip funkce Li-Ion článku [10]

Tento princip interkalování je možné vidět na obrázku 1.4, kde ionty lithia vstupují a vystupují z materiálu elektrod a skrze elektrolyt přenášejí náboj. Použitým materiálem pro elektrody je zde pro kladnou elektrodu LiCoO_2 a pro zápornou elektrodu uhlíkový materiál (grafit), jako například téměř jakákoliv kombinace uhlíku a lithia Li_yC . Pokud bychom se zaměřili na chemické popsání samotného procesu, tak bychom mohli sestavit rovnice, které můžeme vidět níže.

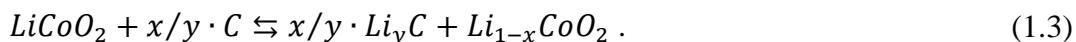
Pro kladnou elektrodu je princip interkalování možné popsat rovnicí



Obdobný proces, ale pro zápornou elektrodu, je možné popsat jako



Pokud tedy obě dvě rovnice zkombinujeme, tak u tohoto zástupce rovnice pro popis procesu interkalování by vypadala jako



V případě těchto rovnic (1.1), (1.2) a (1.3) směr vlevo znamená vybíjení a směr vpravo znamená nabíjení. Koeficienty x a y mají závislost jak na struktuře materiálu, tak na jejich molárních tepelných kapacitách. Pro ilustraci můžeme uvést, že například hodnota x nabývá průměrně hodnot okolo 0,5 a hodnota koeficientu y nabývá hodnot okolo 0,16. Jak koeficient x , tak koeficient y jsou bezrozměrná čísla a jsou unikátní pro různé materiály. [1]

Pokud se zaměříme na samotný elektrolyt, ve kterém probíhají tyto reakce, tak je možné rozdělit používané elektrolyty na dvě kategorie, a to kapalně elektrolyty a gelové elektrolyty. Kapalně elektrolyty se většinou skládají z lithiové soli, rozpuštěné v jednom či více organických rozpouštědlech. Druhou variantou jsou gelové elektrolyty. Tyto elektrolyty se skládají z lithiové soli a rozpouštědla, které jsou namíchány společně s polymerem. Toto řešení je v dnešní době více využívané, jelikož kromě dalších benefitů napomáhá gelový elektrolyt také k celkové bezpečnosti článku, protože větší hustota elektrolytu snižuje riziko vytečení elektrolytu, které bylo v případě kapalně elektrolytu značně vyšší. Nejpoužívanějším elektrolytem je v dnešní době směs ze soli $LiPF_6$ a rozpouštědla na bázi uhličitánů. [1] [2]

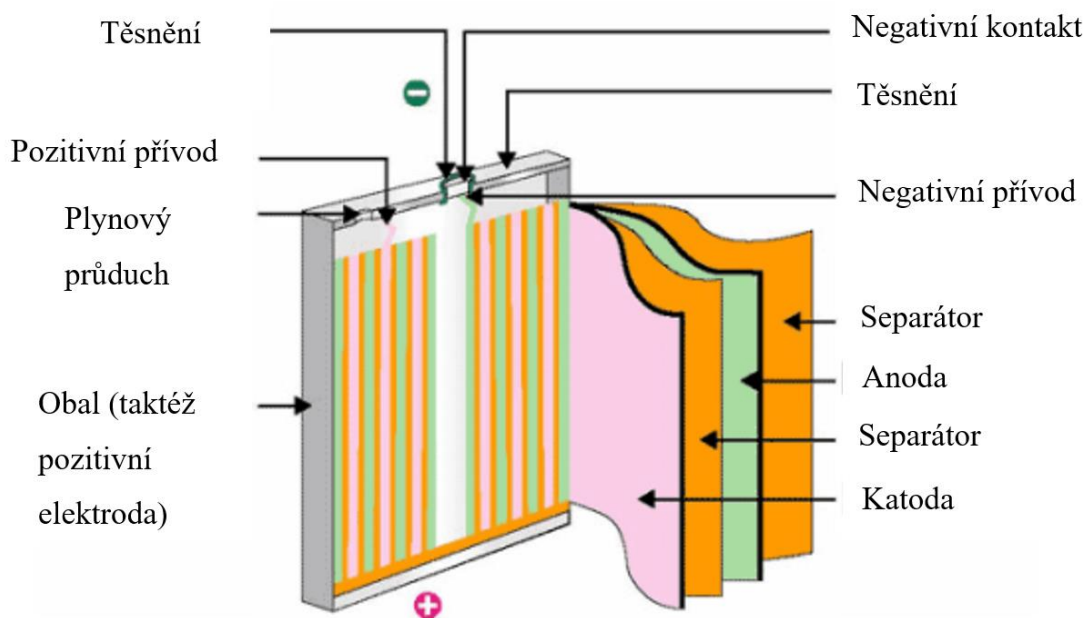
Tak jako jsou různé varianty elektrolytu, tak jsou různé varianty materiálu elektrod. Základ samotné záporné elektrody tvoří téměř vždy grafit (forma uhlíku) v různých formách. Elektroda je tedy v zásadě tvořena velkým množstvím grafitových vrstev, které drží pohromadě pomocí van der Waalsových sil. I díky tomu se může lithium interkalovat mezi tyto vrstvy. Díky tomu, že se lithium interkaluje mezi tyto vrstvy můžeme hovořit o různých stupních lithiace, tak jako lze vidět v rovnici (1.4) níže. Hodnota x zde nabývá hodnoty 0 až 1 a udává, kolik lithia se nachází v elektrodě z makroskopického pohledu [2]



Hodnota koeficientu x se taktéž mění v závislosti na probíhajícím cyklu. V případě nabíjení je stupeň lithiace vysoký a hodnota koeficientu x se blíží 1 a v případě vybíjení je naopak stupeň lithiace nízký a hodnota koeficientu x se blíží 0. Kromě záporné elektrody na bázi grafitu se taktéž experimentuje s využitím jiných materiálů, jako například $Li_4Ti_5O_{12}$. Tento materiál umožňuje rychlejší nabíjení a značný nárůst možných cyklů článků, avšak jeho stinnou stránkou je nižší jmenovité napětí oproti grafitovým elektrodám, a to pouze okolo 1,4 V. [11]

V případě kladné elektrody je značně větší výběr možných materiálů. Nejvyužívanějším materiálem je Li_xCoO_2 neboli kobalt lithný. Je to sloučenina, využívána jako materiál katod už od konce minulého století. Tato sloučenina má z pohledu vhodnosti materiálu podobnou strukturu jako grafit. Je možné mluvit o množství vrstev na sobě, které následně umožňují interkalování lithiem. Z tohoto důvodu jsou tyto katody často označovány jako „*layered cathode*“. Zajímavostí u tohoto materiálu je, že množství lithia, obsaženého v elektrodě se nikdy nesmí blížit či dosáhnout nule, jelikož lithium plní také funkci pilířů, které drží prostor, aby se tam mohly nové ionty lithia vlézt. V případě, že by množství dosáhlo nuly, tyto prostory by zanikly. Různé další varianty se taktéž objevují, jelikož kobalt je značně drahý prvek, a proto se až tak nehodí do konzumní elektroniky. Další často využívanou variantou je $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$. Tato látka má značné výhody oproti předchozí variantě. Jednou z nich je možná variace množství lithia obsaženého v elektrodě. Hodnota koeficientu x se může pohybovat od 0 až po 2, avšak mezní stavy nejsou žádané, jelikož opotřebování katody se značně zvýší z důvodu rozpouštění v elektrolytu. Taktéž dalším z důvodů, proč je tento materiál výhodný, je jeho cena, která je v porovnání s dříve uvažovaným kobaltem nižší a také jeho vnitřní odpor, který je nižší než v případě kobaltu. [2] [12]

Poslední položkou, kterou je nutné zmínit je separátor. Separátor je membrána, která umožňuje lithiovým iontům průchod skrz, avšak taktéž zabraňuje částicím z elektrod, aby prošly skrz, jelikož by došlo ke zkratování obvodu. Materiálem na výrobu separátoru jsou polyethyleny, polypropyleny a jejich různé kombinace. Celkový obrázek, jak je článek složen dohromady, můžete vidět na obrázku 1.5. [1] [2]



Obrázek 1.5 Struktura sekundárního Li-Ion článku [13]

2. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ LI-ION ČLÁNKŮ

Modelování a obecně simulování řešení jakéhokoliv technického problému je mnohdy první a nejlepší cestou, jak ověřit funkčnost a praktičnost navrhovaného řešení. Není to sice nejvěrohodnější řešení, jelikož nedokáže mnohdy odhalit praktické chyby, které by byly odhaleny až pomocí prototypu, avšak tvorba prototypů a jejich testování by bylo v dnešní době značně finančně i časově náročné. Z tohoto důvodu můžeme považovat simulování pomocí různých softwarových nástrojů jako ideální cestu, jak začít.

I samotné simulování je však možné založit na několika různých přístupech. Můžeme je rozdělit na 4 základní přístupy:

1. *Empirické modelování*

Empirické modelování je jedním z nezákladnějších přístupů, kde výstup článku je založen na popsání článku matematickou funkcí, která určuje výstup. Mezi tyto modely se řadí například Shepherdův model, Nerstův model či Unnewehr univerzální model.

2. *Elektrochemické modelování*

Další přístup může být založen na elektrochemickém modelu, jako je například pseudo 2D model či model jedné částice. Tento přístup k modelování se hodí pro popsání vnitřních jevů ve článku.

3. *Strojové učení*

Třetím možným přístupem je modelování, které je založené na vstupních datech. To znamená, že na základě naměřených dat se pomocí vhodného naprogramovaného algoritmu (strojové učení) model „naučí“ predikovat výstupní charakteristiku. Mezi tyto modely se řadí jak jednovrstvé, tak vícevrstvé neuronové sítě, SVM (Support Vector Machine) či ELM (Extreme Learning Machine). Každý z těchto modelů má své výhody a nevýhody ohledně rychlosti konvergování k výsledku či přesnosti.

4. *Modelování založené na základě náhradních obvodů*

Poslední a v tomto případě i nejdůležitějším přístupem pro modelování je modelování založené na ekvivalentním elektrickém obvodu. Tyto modely jsou složeny z různé kombinace odporů, kondenzátorů a zdrojů, simulující různé stavy článku. Tak jako v předchozích případech i tyto modely lze dělit do různých skupin, kde každý model má své výhody a nevýhody. Tady tento typ modelování je i předmětem této práce, která v další části provede rešerši různých modelů. [14]

V literatuře je možné však narazit i na jiné dělení modelování, které je částečně podobné tomuto, avšak v základu dělení se liší. Toto dělení je založeno spíše na principu toho, z čeho model vzniknul a jak ho bylo dosaženo.

Pokud se tedy podíváme na toto jiné dělení tak samotné modely baterií můžeme rozdělit na 3 hlavní skupiny:

1. *Matematické modely*

Tyto modely jsou většinou popsány několika rovnicemi, které se snaží reprodukovat chování baterie, a to bez toho, aby tyto rovnice byly založeny na reálných fyzikálních základech a teoriích. Tyto modely mají většinou základ postaven na buď analytickém nebo stochastickém přístupu a zahrnují tyto modely:

i. Elektrické modely

Tyto modely se snaží popsat baterii pomocí elektrických rovnic a jako jedna z nejzákladnějších se zde používá rovnice Peukertova zákona

$$C = I^b \cdot t, \quad (2.1)$$

kteřá popisuje predikci kapacity baterie. V této rovnici C představuje hledanou kapacitu baterie, I značí velikost proudu, b Peukertovu konstantu a t je čas v hodinách. Jelikož Peukertova konstanta je to jediné, co se může měnit pro každou baterii, tak je jasné, že ta konstanta bude mít různé hodnoty. V případě ideální baterie je hodnota Peukertovy konstanty 1 a v případě reálných baterií nabývá hodnot 1,2-1,7. Další z modelů, který se řadí do těchto elektrických modelů, je kinetický model, který baterii nahrazuje pomyslnými spojenými nádobami, které představují celkový stav nabití baterie a pomocí rovnic, zahrnující koeficient tření a další koeficienty je možné určit z těchto modelů, jak bude klesat stav nabití baterie. Jako dalšího a v tomto přehledu posledního zástupce elektrických modelů můžeme označit modely založené na Markově řetězci. Markovův řetězec nám říká, že je možné predikovat stav v dalším kroku, např. v čase $t+1$, bez toho, abychom znali předešlý stav. [27]

ii. Tepelné modely

Na rozdíl od elektrických modelů se tepelné modely spíše zaměřují na teplo, které je generováno v baterii. S jednou ze základních rovnic, které se používají na popis generovaného tepla, přišel Bernardi, který baterii popsal rovnicí

$$\frac{dq}{dt} = I \cdot \left(V - V_0 - T \cdot \frac{\partial V}{\partial T} \right). \quad (2.2)$$

iii. „Aging“ modely

Tyto modely se na rozdíl od přechozích dvou nezaměřují až tak na aktuální vlastnosti baterie, ale spíše na dlouhodobé vlastnosti, které zmíněná baterie má. Tedy tyto modely se používají především na popis stárnutí baterie a speciálně klesání kapacity vlivem stárnutí. Stárnutí baterie můžeme rozdělit na dvě hlavní kategorie stárnutí a to tzv. kalendářní stárnutí a stárnutí z důvodu cyklů baterie.

Základní rovnicí popisující stárnutí baterie je v tomto případě Arrheniusova rovnice, která popisuje vliv teploty na stárnutí baterie a matematicky je popsána jako

$$t = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (2.3)$$

V této rovnici je t čas, E je aktivační energie baterie, R je plyná konstanta a T je teplota. Někteří autoři uvádějí pro popis kalendářních ztrát také Eyringův zákon, jako alternativu k Arrheniusově rovnici. Je nutné však zmínit, že kalendářní ztráty jsou velmi individuální pro každou baterii a nelze je tedy přesně popsat matematickou rovnicí, a to i z důvodu, že jedním z důležitých parametrů, rozhodujícím o kalendářních ztrátách je napětí, na které je baterie skladována.

Častou variantou popisu stárnutí z důvodu cyklování baterie je elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS). Nejčastější variantou však zůstává v případě cyklačního stárnutí vytvoření modelu na základě empiricky zjištěných vztahů. [27]

2. Fyzikální modely

Fyzikální modely se liší v principu popsání modelu baterie od matematických, jelikož se snaží o co nejvěrohodnější popis modelu baterie pomocí popsání fyzikálních jevů a procesů, které se v baterii vyskytují. Toto modelování je značně komplikovanější, a to jak v popisu, tak i v samotné praktické realizaci, jelikož jsou nejčastěji založeny na nelineárních rovnicích popisujících komplexně celý děj v baterii. I zde můžeme rozdělit několik přístupů, jako například:

i. Elektrické modely

Základ těchto modelů byl položen Johnem Newmanem, který položil základ teorie porézních elektrod. Na této teorii stojí valná většina dnešních fyzikálně založených elektrických modelů. Tyto modely se snaží reprodukovat nejdůležitější elektrochemické procesy, které můžeme najít v baterii, jako například difúzní napětí, iontovou distribuci, distribuci elektrického potenciálu a další. Tyto modely jsou značně složité zejména pro simulace v reálném čase, a proto se často odborné práce zabývají spíše možnostmi zjednodušení tohoto přístupu, ale za cenu zachování všech informací. [27]

ii. Tepelné modely

Tepelné fyzikální modely jsou jednodušší na implementaci a popsání než elektrické fyzikální modely. Jejich základ leží v popsání baterie pomocí rozložení parametrů v různém množství dimenzí. Tyto modely tedy můžeme v různých vědeckých publikacích najít rozdílné především v počtu dimenzí, ve kterém popisují baterii. Jednoduchý popis pomocí rovnice by vypadal jako

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{dq_s}{dt} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (2.4)$$

Koeficienty vystupující v této rovnici jsou ρ jako hustota baterie, c je specifické teplo baterie a $\lambda_{x,y,z}$ je tepelná vodivost v jednotlivých směrech. Tyto směry odpovídají zmíněným dimenzím výše.[27]

iii. „Aging“ modely

Fyzikální modely, které se snaží o popsání stárnutí baterie mají základy založeny na chemických procesech v baterii. Počátek těchto modelů byl položen implementací rovnice, popisující reakci oxidačního rozpouštědla v baterii. Častým prvkem, na který se tyto modely zaměřují je elektrolyt, jehož popisem pomocí chemických rovnic je možné sledovat vývoj celkové výkonosti baterie v průběhu narůstajících cyklů. Zde je nutné poznamenat, že pro každý jednotlivý materiál elektrolytu je nutný individuální přístup a nejde sjednotit tyto modely pod jednu rovnici nebo pod jeden popis.

Druhý možný přístup v rámci tohoto typu modelů jsou tzv. modely jednotlivých částic¹. Mezi jejich pozitiva patří bezesporu jejich značná přesnost pro malé vybíjecí proudy. Avšak v ostatních případech přesnost nemusí být až tak dobrá, a to z důvodu zanedbání dynamických změn v elektrodách a v elektrolytu. Tento přístup se liší od ostatních v tom, že kombinuje kompletní elektrochemický model s modelem náhradního elektrického obvodu. Tento přístup předpokládá, že elektrody jsou tvořeny stejnými částicemi a díky tomu je rozložení elektrického proudu v elektrodách stejné. Díky tomuto předpokladu se v rámci daného modelu nahrazuje každá z elektrod jednou částicí. Z uvedeného předpokladu následně plyne i celý název přístupu k tomuto modelování. [27][28]

3. Obvodové modely

Poslední kategorií, která se v tomto dělení vyskytuje jsou obvodové modely. Tyto modely jsou často nejjednodušší na implementaci a jsou proto jedny z nejvyužívanějších. Spadají zde hlavně dvě kategorie, a to elektrické modely a tepelné modely. Jednou z hlavních výhod obvodových modelů je jejich jednoduché simulování pomocí vhodného programu, jakým je například program Matlab.

i. Tepelné modely

Tak jako v přechodících dvou kategoriích i zde se tepelné modely snaží popsat baterii z pohledu generování tepla a oteplování jednotlivých komponentů. Avšak výhodou obvodových tepelných modelů je, že můžeme nahradit baterii náhradním elektrickým obvodem. Toto nahrazení můžeme provést z důvodu analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami. Můžeme tedy sestavit náhradní obvod baterie s tepelnými veličinami a použít na jeho analýzu známé zákony pro řešení elektrických obvodů. Na tomto obvodu můžeme následně sledovat hledané teploty. [27]

¹ Z anglického „single particle model“.

ii. Elektrické modely

Poslední kategorií, která zde bude v tomto seznamu zmíněna, jsou elektrické modely. Těmto modelům se důkladně věnuje následující kapitola, proto budou pouze velmi lehce představeny. Tyto modely jsou častým řešením simulování baterií, a to díky jejich dobrému poměru mezi složitostí, přesností a věrohodností vůči reálné baterii.

Skládají se z kombinací odporů a kondenzátorů, kde každý z těchto prvků nahrazuje reálný děj ve zkoumané baterii. V odborné literatuře je možné najít velké množství různých modelů od nejjednodušších až po ty složitější. Jejich obecný přehled a dělení je ukázáno v následující kapitole. [27]

2.1 Modelování založené na základě náhradních obvodů

Tak jako bylo řečeno výše, tento typ modelování je založen na analogii mezi elektrochemickým chováním baterie a elektrickým obvodem. Díky této analogii můžeme předvídat, jak se bude baterie chovat při různém zatížení, různém vybíjecím či nabíjecím proudu, různé teplotě atd.

Každý model, který budeme v této kapitole uvažovat, se skládá z několika různých komponentů. Základem bude vždy zdroj napětí, který simuluje napětí, které bychom naměřili na baterii, kdyby byla v klidném stavu a odpočatá. Avšak tento prvek by sám o sobě nestačil, jelikož jeho chyba, která by vznikla z důvodu neuvažování různých faktorů, by byla obrovská. Mezi faktory, které by ovlivňovaly tuto chybu patří například stav nabití, který se označuje SOC², zátěž či okolní teplota, ve které článek pracuje. Tento zdroj se proto označuje jako OCV³ a označuje průběh napětí v čase $u(t)$ za situace, že by nebyl žádný úbytek napětí na vnitřním odporu, kontaktech atd. Znamená to tedy, že by se chyba mezi OCV a reálným výstupem blížila nule pouze pokud by proud baterie $i_{\text{bat}} = 0$ a $t \rightarrow \infty$. Ve všech ostatních případech se chyba bude vyskytovat, a to díky neustálým přechodovým dějům v baterii. [2] [15]

Tak jako bylo zmíněno výše, to, co značně ovlivňuje výkon baterie, či výstupní napětí $u(t)$ je SOC. SOC neboli stav nabití je udáván jako poměr mezi aktuální kapacitou baterie a její jmenovitou kapacitou. SOC můžeme udávat v několika základních veličinách, a to buď jako velikost zbývající kapacity v A·h, nebo jako procenta udávající zbylou kapacitu v relativní hodnotě nebo také bezrozměrně hodnotami 0 až 1, kde 1 značí plné nabití a 0 úplné vybití. Je nutné si však uvědomit, že i v případě, kdy je stav nabití (SOC) baterie označen jako 0, 0 % nebo 0 A·h, tak to není většinou pravda, jelikož každý Li-ion článek může být vybíjen pouze do určité míry, aby nedošlo k poškození. Proto se vybíjí pouze do určité hodnoty kapacity, která však pro jednodušší simulace je označována jako 0 A·h. Jak už bylo ukázáno, SOC je jedním ze základních parametrů popisující chování baterie

² Z anglického překladu „state-of-charge“.

³ Z anglického překladu „open circuit voltage“.

a díky tomu ho musíme správně matematicky popsat. Způsobů určení SOC je několik, namátkově OCV metoda, impedanční metoda, metoda strojových učení atd. Metoda, která je využívána zde je však Coulombova počítací metoda, která je založena na integraci vybíjecího proudu a na znalosti původního stavu nabití. Matematická rovnice, popisující změnu stavu nabití pomocí Coulombovy počítací metody je

$$z(t) = z(t_0) - \int_{t_0}^t \eta(\tau) \cdot i_{\text{bat}}(\tau) d\tau, \quad (2.5)$$

kde

$$z = f(\text{SOC}). \quad (2.6)$$

Tato rovnice udává, jak se změní SOC v časovém intervalu od t_0 do času t pro libovolný proud $i_{\text{bat}}(t)$. Řecké písmeno η zde zastupuje účinnost, tzv. „Coulomb efficiency“, která udává, s jakou účinností se mění energie v baterii neboli kolik energie poskytne baterie při vybíjení vůči tomu kolik jsme jí museli dodat při nabíjení⁴. Tato rovnice platí jak pro nabíjecí, tak pro vybíjecí cyklus, jelikož v případě nabíjecího cyklu můžeme mluvit o záporném proudu a díky tomu je celý integrál záporný. [2] [15] [16]

Další z prvků, který je nezbytné popsat pro následné modelování, je vnitřní odpor samotné baterie R_i . Tento odpor je zodpovědný za počáteční úbytek napětí v okamžiku připojení zátěže a začátku protékání proudu obvodem. Jelikož zde uvažujeme vnitřní odpor, tak zde musíme uvažovat i tepelné ztráty, které vznikají na daném odporu. Tyto ztráty neboli Joulovo teplo jsou úměrné protékajícímu proudu a můžeme je popsat rovnicí

$$p_{R_i}(t) = i_{\text{bat}}^2(t) \cdot R_i. \quad (2.7)$$

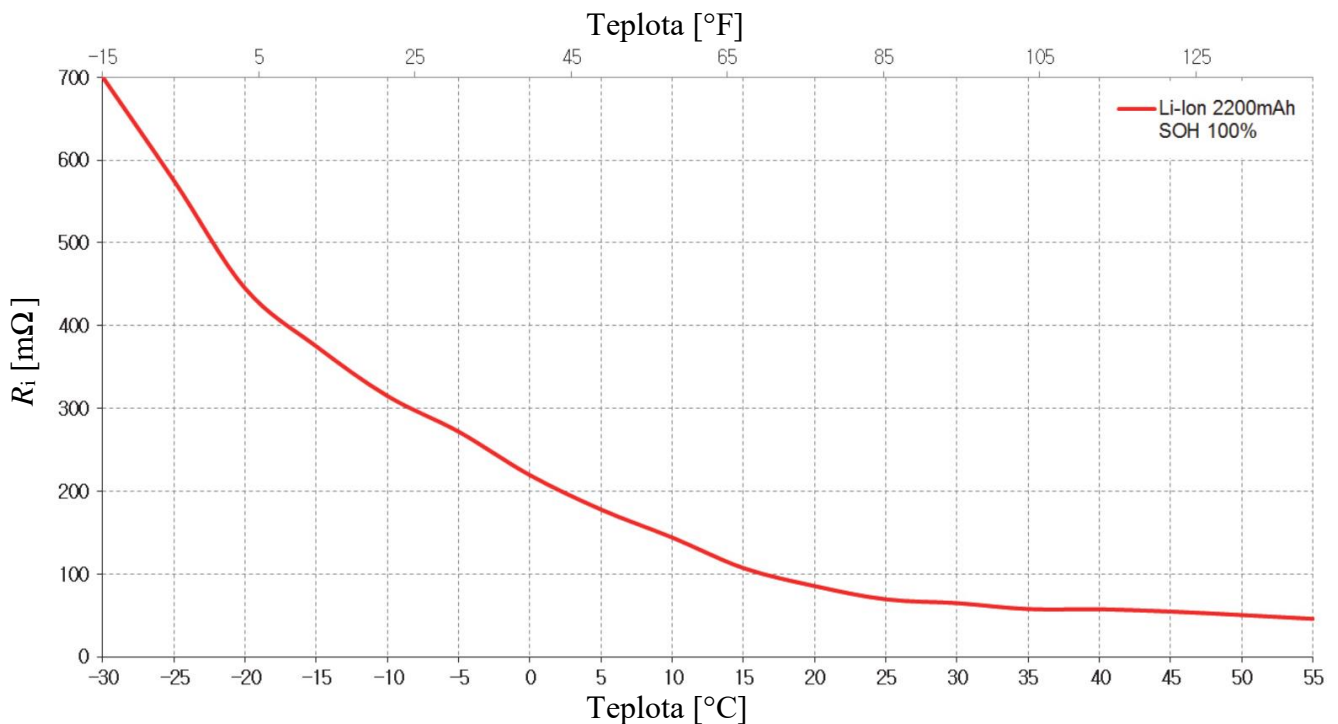
Díky této rovnici lze vidět, že účinnost η nemůže nikdy dosáhnout hodnoty 100 %, jelikož na vnitřních odporech ve článku bude vždy nějaká ztráta energie, která se přemění na teplo a zahřívá celou baterii. Tak jako v předchozím případě i zde je R_i funkcí SOC a není konstantní. [2]

Tak jak bylo uvedeno na začátku této kapitoly, jedním z nejvýznamnějších parametrů, který ovlivňuje chování baterie je teplota. V předchozím odstavci bylo demonstrováno, že účinnost baterie nikdy nemůže dosáhnout 100 % a i z toho důvodu dochází k oteplování baterie. Kromě tohoto oteplování je nutné taktéž uvažovat okolní teplotu, která má značný vliv na celkovou funkci a průběhy výkonu baterie v čase. Pokud se zaměříme na teplo generované v baterii, tak můžeme říct, že se skládá ze dvou složek tepla, a to z tepla vratného a z tepla nevratného. Společně s okolní teplotou dochází ke značnému ohřívání baterie a tím i k možné změně parametrů vlivem teploty. Tady tímto fenoménem se zabývá značné množství odborných prací a častým závěrem je, že pro

⁴ V případě Li-ion článků se pohybujeme okolo 99 %, avšak tato účinnost klesá za extrémních podmínek, jako je velmi nízká či velmi vysoká teplota nebo vysoký proud zátěže.

zaručení správné funkce baterie je důležité implementovat vhodný chladicí systém, který bude udržovat teplotu baterie na hodnotě, která zaručí její správnou funkci. [15][32]

Jelikož sledování průběhu teploty v rámci vybíjení baterie je složitější a není ani obsahem této práce, budeme se věnovat nyní spíše vlivu okolních teplot na chování baterie. V rámci popisu chování v rámci různých teplot můžeme identifikovat tři různé stavy. Jedním z nich by bylo nabíjení a vybíjení pro teploty na spodní hranici doporučeného rozsahu, jakou by byla například teplota $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Druhým stavem by byla teplota v okolí standartních pokojových teplot, jako například $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posledním stavem by byla teplota na horní hranici doporučeného rozsahu, tedy třeba $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud bychom se podívali na jednotlivé prvky, které se v náhradním modelu vyskytují, tak můžeme konstatovat, že všechny jednotlivé velikosti parametrů náhradního obvodu, jako jsou odpory, kapacity a zdroje, jsou závislé na okolní teplotě. Tady toto tvrzení můžeme podložit mnoha měřeními, které jsou dohledatelné v odborné literatuře, jako například v článku od autora Hossain Ahmed a kolektivu [33]. Stěžejním vlivem v tvorbě tepla v baterii je vnitřní odpor, a proto i zde se zaměříme především na jeho velikost. [34]



Obrázek 2.1 Závislost vnitřního odporu R_i na okolní teplotě [34]

Na obrázku 2.1 můžeme vidět, jak se mění vnitřní odpor v závislosti na okolní teplotě baterie. Pro upřesnění musíme říct, že tato velikost odporu neodpovídá v žádném případě velikosti odporu používaném v dalších kapitolách z této práce a tento graf je zde vložen pouze pro znázornění celkové závislosti. Avšak velmi rychle z tohoto grafu můžeme určit, že vnitřní odpor baterie roste s klesající teplotou. Tato změna značně snižuje výkon baterie a z toho důvodu je nutné pro zachování stejného výkonu po celou dobu zvýšit

proud baterie a tím se sníží celková možná doba použití. I vlivem této skutečnosti se výrobci, kteří používají baterie například do elektrických aut, snaží o udržení baterie v okolí použitelných teplot, především teploty vyšších než 0 °C. Jednou z variant, jak docílit udržení vyšší teploty je každou jednotlivou baterii napájet střídavým proudem o vysokých frekvencích, čímž dojde k zahřátí samotné baterie na vyšší hodnotu. Jinou z variant je udržování okolní teploty pomocí různých systémů jako použití ventilace samotného auta k ohřevu nebo i možnému zchlazení baterií. [34]

Druhým poznatkem je, že při rostoucí okolní teplotě vnitřní odpor lehce klesá. Toto zjištění je pro nás dobré, jelikož znamená, že dochází k menším tepelným ztrátám v baterii a také je v baterii generováno menší teplo. Avšak pokud zkombinujeme vysokou okolní teplotu a k tomu ohřívání baterie procházejícím proudem, byť menší než při jiných teplotách, tak velmi rychle dosáhne baterie značně kritických teplot. Při takto vysokých teplotách může rychle dojít k poškození či dokonce zničení baterie. Z toho důvodu je nutné zajistit, aby se baterie nepřehřívala. Pokud uvažujeme stejný příklad elektrických aut jako v minulém odstavci, tak v tomto případě se jako jedna z variant chlazení baterií přidává tekutý nebo plynný chladič, který vlivem proudění vzduchu odvádí teplo z baterie a dovoluje jí se zchladit. Díky těmto důvodům je nutné brát v potaz nejen teplo co vytváří baterie, ale taktéž okolní teplotu, která značně mění velikosti jednotlivých parametrů. [34]

Dalším z důležitých prvků, které se značně projevují při chování baterie, je stárání baterie neboli cyklační ztráty. Vlivem rostoucího počtu vybíjení a nabíjení dochází v baterii k poklesu kapacity a k nárůstu vnitřního odporu. Tady tento fenomén vychází ze vzniku pasivní vrstvy na rozhraní mezi elektrolytem a anodou, tzv. SEI⁵, což je způsobeno rozkladem elektrolytu a usazováním vrstev lithiových sloučenin. Tyto vrstvy se začínají tvořit při prvních cyklech baterie a pomalu se usazují jedna na druhou, čímž roste odpor elektrody a klesá použitelná kapacita baterie. Jelikož zde byl v přechodném odstavci popsán vliv teploty na jednotlivé prvky baterie, tak můžeme i zde říct, že s rostoucí teplotou se celkově urychluje proces usazování a rychleji dochází k degradaci baterie. Obecně se tento pokles kapacity řeší pro parametr zdraví baterie neboli SoH⁶, který je popsán rovnicí

$$SoH = \frac{C}{C_{in}}. \quad (2.8)$$

Tato rovnice udává poměr mezi aktuální naměřenou kapacitou a původní kapacitou, kterou baterie měla. Obecně se baterie považuje za použitelnou, pokud její SoH je větší než 0,7. Jinou interpretací by bylo, že pokles kapacity nesmí být větší než 30 % od počáteční hodnoty. Obecně se velikost kapacity určuje pomocí rovnice

$$C = \frac{1}{3600} \cdot \int_{t_0}^t i_{batt}(t) dt. \quad (2.9)$$

⁵ Vychází z anglického „solid electrolyte interface“.

⁶ Vychází z anglického „state of health“.

Vstupem do této rovnice je čas, po který vybíjíme baterii, a proud, kterým tuto baterii vybíjíme. Takto určíme kapacitu, která je nezbytná pro určení SoH. Mimo klesající kapacitu roste s narůstajícím počtem cyklů i velikost vnitřního odporu. Velikost vnitřního odporu je taktéž závislá na velikosti tzv. „cut-off“ napětí neboli pokud budeme dlouhodobě baterii provozovat na napětí, jehož maximální hodnota je vyšší než jmenovitá hodnota napětí baterie, tak urychlíme celkový proces stárnutí a nárůst velikosti vnitřního odporu bude vyšší než pro jmenovitou hodnotu napětí. [35][36][37]

Jako jeden z posledních prvků, které jsou důležité pro správné simulování Li-ion článků, a především jejich přechodných prvků, je vhodná kombinace paralelního zapojení odporů a kondenzátorů. Tyto kombinace nahrazují přechodné chování baterie po jejím připojení k zátěži a po odpojení od zátěže. Tyto parametry nejvíce určují výslednou přesnost modelu, jelikož hodnota impedance celé paralelní kombinace se značně mění v závislosti na čase. Často se implementují dvě paralelní kombinace odporu a kondenzátoru, každá pro popsání jiných dějů. První kombinace se využívá na popsání krátkodobých přechodových dějů v baterii a druhá kombinace se věnuje dlouhodobým přechodným dějům. Toto jsou pouze základní prvky, které se využívají pro modelování, avšak v následující části jsou popsány modely detailněji a jsou zde přidány taktéž další prvky, používající se pro simulaci různých dějů v baterii. [2] [15]

2.2 Matematické modely používané pro simulování

V této části se budeme věnovat možným matematickým modelům a jejich relativní funkčnosti a použitelnosti pro simulaci Li-ion článků.

Pokud bychom začali od úplně nejjednoduššího ekvivalentního obvodu, tak bychom mohli za počáteční bod považovat obvod obsahující pouze konstantní zdroj napětí. Avšak jak je možné vidět na obrázku 1.2, vybíjecí charakteristika Li-ion článků není konstantní, a proto je nutné tento model změnit. Změnu by bylo možné začít samotnou změnou zdroje konstantního napětí za zdroj, jehož výstupní charakteristika by byla závislá na SOC, jednalo by se o zdroj OCV, viz výše. Tento přístup a tento náhradní obvod je však stále značně nedostatečný a nelze ho úplně považovat za matematický model, jelikož jeho chyba by byla značná a ani jeho použitelnost by nebyla ideální. Avšak pro pouze informativní účely, popřípadě aplikace, kde není vyžadována žádná přesnost, by i tento model mohl mít své využití. [2]

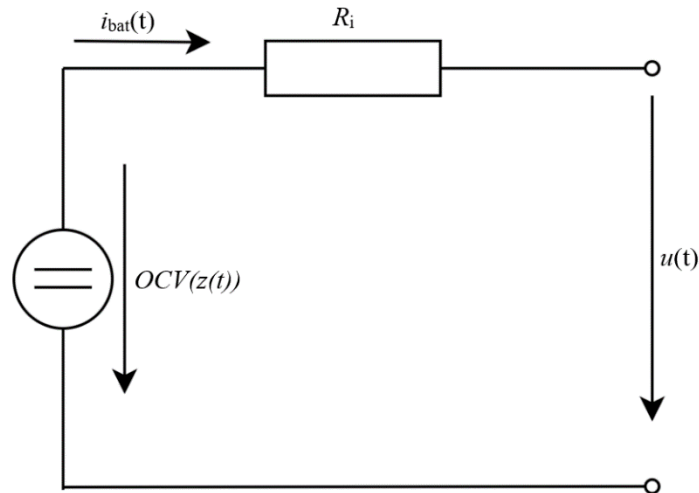
Pro alespoň trochu lepší použitelnost je nutné uvažovat alespoň vnitřní odpor baterie, který nám zpřesní výsledný model. Jelikož se jedná o přidání odporu reprezentující vnitřní odpor baterie R_i , nazývá se tento model IR⁷ model. Tento model už je přesnější než model obsahující pouze zdroj, ať už zdroj konstantní, či zdroj závislý na SOC. Hlavním rozdílem je přidání sériově zapojeného odporu, na kterém vznikne okamžitý rozdíl mezi výstupním napětím $u(t)$ a OCV. Tento odpor, tak jako všechny parametry, je

⁷ Název vychází z anglického označení pro vnitřní odpor „*internal resistance*“.

závislý mimo jiné na SOC a díky tomu i úbytek na něm není konstantní. Pro jeden definovaný SOC bychom tedy mohli napsat rovnici pro napětí, že

$$u(t) = OCV(z(t)) - R_i \cdot i_{bat}(t). \quad (2.10)$$

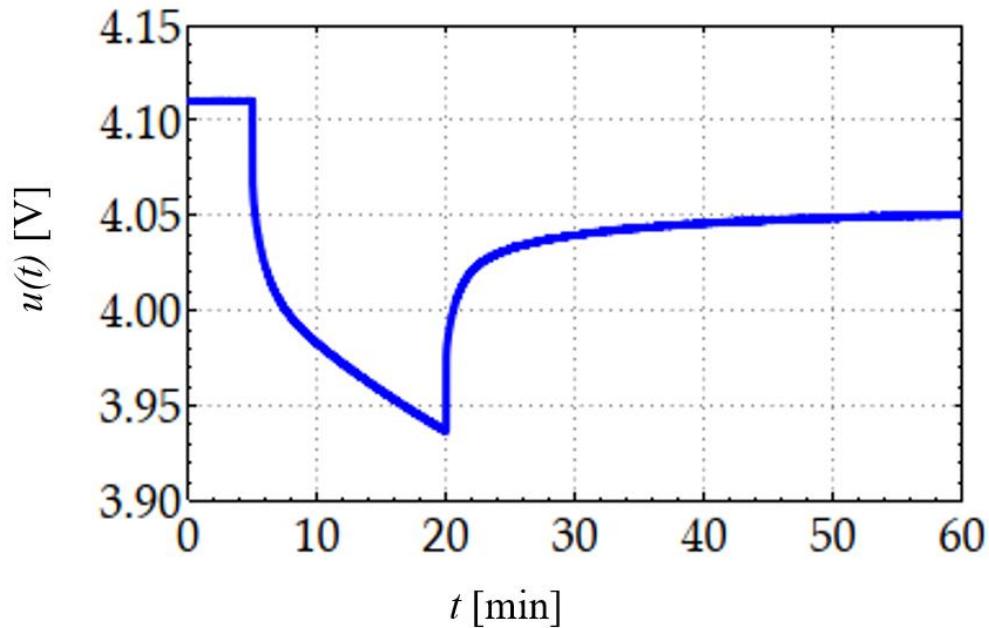
Tato rovnice doplňuje již zavedenou rovnici popisující změnu SOC (2.5). Dohromady tyto rovnice popisují chování, a to jak při vybíjení, tak při nabíjení prvního dynamického modelu Li-ion článku, viz obrázek 2.2. [2]



Obrázek 2.2 Základní matematický model Li-Ion článku

Tento model je značně nepřesný, a i jeho reprezentace značně neodpovídá tomu, jak funguje a jak je reprezentován sekundární Li-ion článek. V praktickém modelování by docházelo při pulsním vybíjení k okamžitému poklesu napětí, které by však nemělo žádnou časovou konstantu. To znamená, že v případě odpojení od zátěže by napětí okamžitě vyskočilo zpět na hodnotu OCV. Toto chování samozřejmě neodpovídá chování baterie, a proto je nutné přidat další prvky, které tady tento jev popíší. Jedná se především o paralelní kombinace odporů a kondenzátorů, které zde zastoupí časové ustálení baterie po připojení k zátěži, popřípadě po odepnutí ze zátěže.

Tento proces se v samotné baterii označuje jako difúze napětí. Toto označení vychází z difúze lithia a jeho chování se v Li-ion baterii projevuje při každé změně proudu úbytkem napětí s různou časovou konstantou. Přidáním a popsáním tohoto jevu se značně zvýší přesnost celkového modelu a taktéž jeho celková použitelnost. Avšak i tato difúzní napětí jsou ve většině případů vázána a závislá na SOC. [2]



Obrázek 2.3 Odezva na vybíjecí impuls [2]

Na obrázku 2.3 je možné vidět, jak prakticky vypadá odezva na jeden vybíjecí impuls. Je zde vidět jednak úbytek na vnitřním odporu R_i , projevující se okamžitým poklesem po začátku průchodu proudem, tak úbytek na paralelní kombinaci odporu a kondenzátoru, který se projevuje postupně díky své časové konstantě. Taktéž je možné vidět, že v případě odpojení zátěže a zániku průchozího proudu i_{bat} zaniká okamžitě úbytek na vnitřním odporu R_i a následně postupně zaniká i úbytek na paralelní kombinaci s časovou konstantou. Nutno podotknout, že časová konstanta při počátku vybíjecího impulsu a při konci vybíjecího impulsu se liší. Na základě tohoto poznatku je možné znovu rozšířit a upravit rovnice z IR modelu, jelikož přidáním paralelní kombinace odporu R_1 a kondenzátoru C_1 do obvodu, viz obrázek 2.4, můžeme napsat rovnici

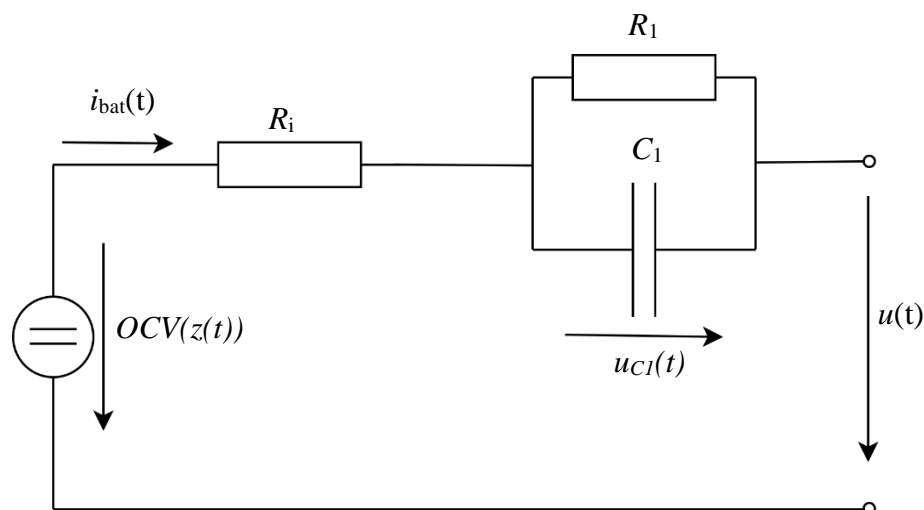
$$u(t) = OCV(z(t)) - u_{C_1}(t) - R_i \cdot i_{bat}(t). \quad (2.11)$$

Jediný prvek této rovnice, který není jednoduše popsán v baterii je napětí u_{C_1} , avšak toto napětí je možné vyjádřit pomocí Kirchhoffových zákonů jako

$$u_{C_1}(t) = R_1 \cdot i_{R_1}(t) \quad (2.12)$$

anebo je to možné popsat jako napětí na kondenzátoru

$$u_{C_1}(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_{C_1}(t) dt. \quad (2.13)$$

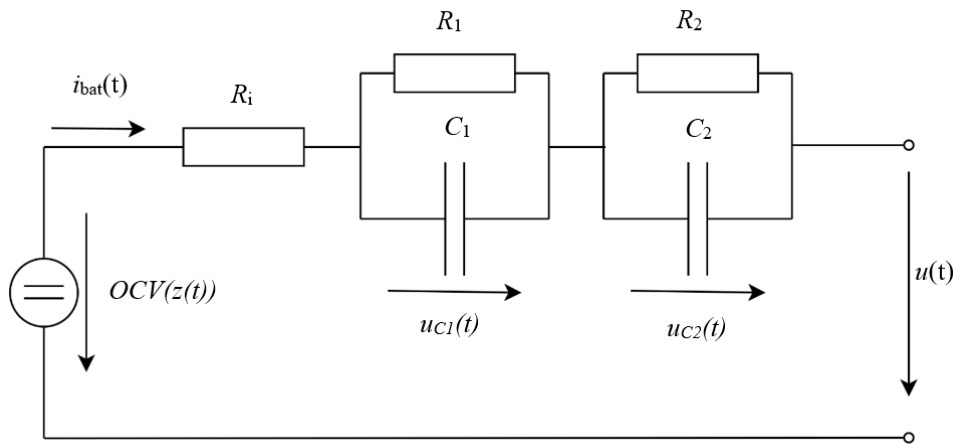


Obrázek 2.4 Theveninův model

Tento model je v literatuře označován jako Theveninův model a pro velké množství aplikací a zejména těch, kde není vyžadováno simulování různých nestandardních situací, je tento model dostatečnou variantou. V mnohých případech a při vhodném odladění modelu je tento model zároveň jeden z nejpřesnějších modelů. Je to taktéž základní model, který lze následně zpřesňovat přidáváním různých odporů závislých na SOC nebo upravovat pomocí přidávání dalších paralelních kombinací, které následně popisují a dále upravují další děje v baterii. [2] [17]

Tato práce se bude primárně zabývat Theveninovým modelem a jeho úpravami, avšak je nezbytné zmínit i další ekvivalentní matematické modely, které se v různých aplikacích využívají pro simulaci Li-ion baterií. Jako jeden z dalších používaných modelů můžeme zmínit takzvaný Vylepšený Theveninův model⁸, který se od klasického liší především přidáním druhé paralelní kombinace odporu R_2 a kondenzátoru C_2 . Tento model vychází především z rozlišení popisu časového ustálení po připnutí k zátěži, popřípadě odepnutí od zátěže, kde první paralelní kombinace popisuje především polarizační děje s krátkou časovou konstantou a druhá paralelní kombinace popisuje spíše polarizační děje s dlouhou časovou konstantou. [18]

⁸ Z anglického „Advanced Thevenin model“.



Obrázek 2.5 Vylepšený Theveninův model

Celkově jsou oba modely značně podobné, lze říct, že skoro až totožné, avšak Vylepšený Theveninův model je pokročilejší variantou, která může být taktéž i přesnější, avšak u tohoto modelu je následně obtížnější správně identifikovat parametry než u jednoduššího Theveninova modelu. Z toho důvodu tento model není až tak přesný, avšak hodí se v případě, kdy chceme odlišovat krátkodobou a dlouhodobou konstantu a následně ji například využívat pro další účely. Matematický popis této varianty Theveninova modelu se nijak zvlášť neliší od předchozích modelů a můžeme ho tedy popsat rovnicí

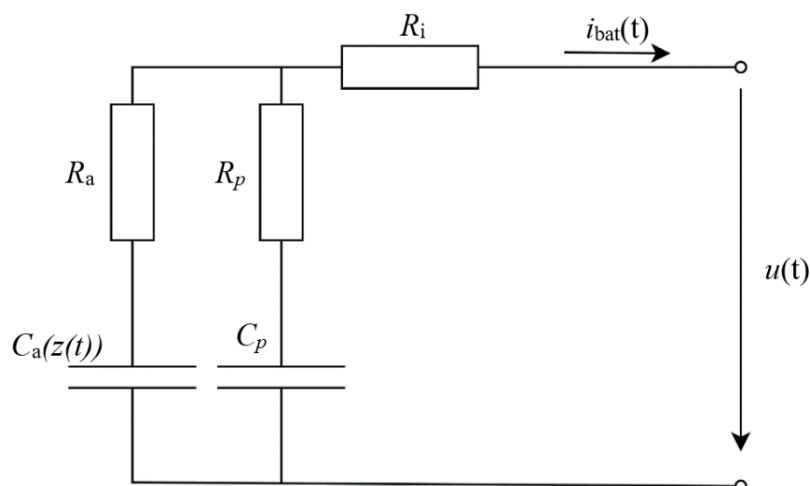
$$u(t) = OCV(z(t)) - R_i \cdot i_{bat}(t) - u_{C_1}(t) - u_{C_2}(t). \quad (2.14)$$

Tak jako v přechodím případě i zde je tato rovnice jednoduchou aplikací napěťového Kirchoffova zákona, a tedy i zde je možné použít obyčejnou napěťovou rovnici pro kondenzátor

$$u_{C_1}(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_{C_1}(t) dt. \quad (2.15)$$

Obě zmíněné varianty, jak obyčejný, tak Vylepšený Theveninův model, jsou závislé na SOC. Tato závislost je v obvodu zaznačena funkcí $z(t)$. Primárně je závislé hlavně OCV na SOC, avšak pokud bychom se podívali na různá naměřená data, tak často se hodnoty ekvivalentních prvků jako odpory a kondenzátory mění se SOC. V modelech na obrázku 2.4 a obrázku 2.5 jsou tyto hodnoty označeny bez závislosti na SOC, jelikož pro zjednodušení se často tato závislost pro jeden či více prvků zanedbává a uvažuje se konstantní. Toto zjednodušení však není vhodné, jak bude ukázáno v navazující části této práce, a závislost na SOC proto bude uvažována pro všechny prvky náhradního zapojení.

Další z modelů, který se využívá pro reprezentaci Li-ion baterie, je RC model, který využívá, tak jako v předchozích případech, kombinace odporů a kondenzátorů. Avšak v tomto případě se nejedná o paralelní kombinaci odporu a kondenzátoru, ale jedná se o sériově zapojený odpor s kondenzátorem. Celá tato sériová kombinace je následně zdvojnásobena a paralelně zapojena, tak jak je možné vidět na obrázku 2.6. [19]



Obrázek 2.6 RC model

Na první pohled je zde jasně vidět, že na rozdíl od předchozích modelů tento model neobsahuje klasický zdroj napětí. Místo něj je zde uvažován kondenzátor C_a , který tuto funkci zastupuje, je taktéž závislý na SOC, a je nezbytné ho tedy v obvodu zaznačit. Mimo to je kondenzátor C_a doplněn do série o odpor R_a , který v sobě zahrnuje polarizační děje a taktéž je celý tento sériový RC článek zapojen paralelně s kondenzátorem C_p a odporem R_p . Tato druhá sériová kombinace je taktéž připojena pro popis polarizačních dějů při průchodu proudem baterií. Posledním pasivním prvkem v obvodu je odpor R_i , který znázorňuje odpor vlastní baterie a je základním kamenem všech náhradních zapojení. [19]

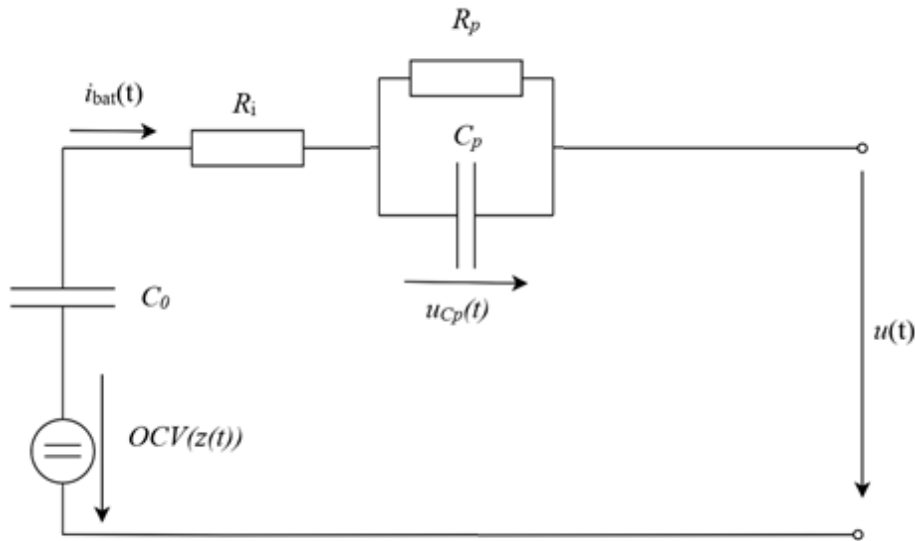
Tento model má jednu hlavní nevýhodu a tou je značná chyba oproti reálnému průběhu ve stavech, kdy je SOC blízký plné hodnotě nabití a ve stavech, kdy se SOC blíží nule. Z tohoto důvodu se udává praktická použitelnost tohoto modelu pouze v rozmezí 20 % - 80 % SOC. [19]

Jako jeden z posledních používaných zástupců můžeme označit PNGV model. Tento model je postaven na stejných základech jako ostatní modely, ale tento model je účelově vytvořen pro pohony v automobilech a v automatizovaných robotech. Z toho vychází i jeho název PNGV⁹, což v překladu znamená „*partnerství pro vozidla nové generace*“. Základy tohoto modelu byly položeny v roce 2001, kdy bylo výše zmíněné partnerství podepsáno. [20] [21]

Samotný model má tak jako Theveninův model jednodušší a složitější variantu. Nejprve se podíváme na jednodušší variantu, ze které následně vychází zmíněná druhá varianta. Model se skládá z jedné paralelní kombinace odporu R_p a kondenzátoru C_p . Tato paralelní kombinace je zodpovědná za reprezentaci polarizačních jevů v baterii. Dalším z prvků, které obsahuje tento matematický model, je R_i , které má stejnou funkci jako v předchozích modelech, a to reprezentaci vnitřního odporu baterie. Posledním prvkem mimo zdroj je kondenzátor C_0 , který znázorňuje změnu elektromotorického napětí při

⁹ Z angličtiny „*partnership for new generation of vehicle*“.

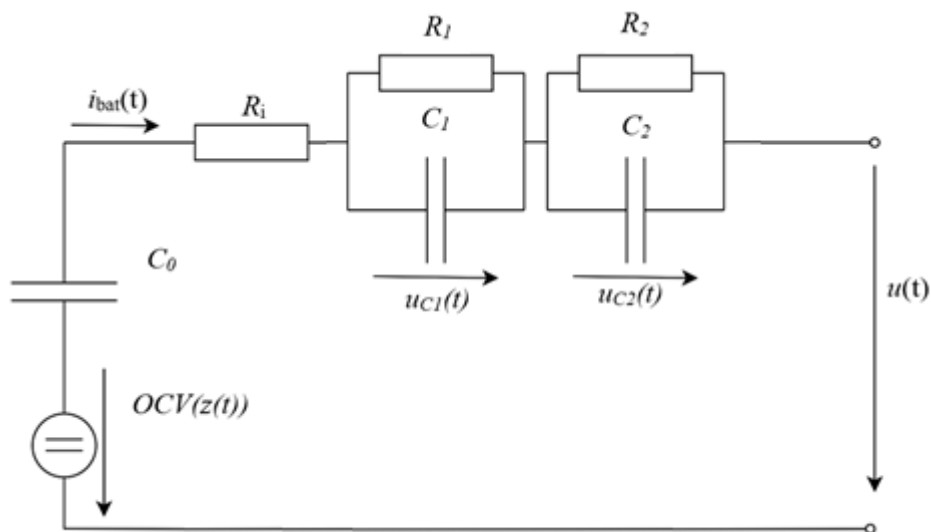
změně elektrochemické energie na elektrickou v baterii. Takto poskládaný PNGV obvod můžeme následně vidět níže na obrázku 2.7. [21]



Obrázek 2.7 PNGV model

Z modelu je možné vidět, že jednou ze změn vůči ostatním typům, jako Theveninův model či RC model, je zahrnutí napětí na kondenzátoru C_0 do $OCV(z(t))$. Toto vychází z podstaty vlastnosti kondenzátoru C_0 , viz výše. Tento základní model dosahuje solidní přesnosti a jeho využití je tedy v automatizovaných robotech značné. Oproti RC modelu nemá problém s vysokou či naopak nízkou hodnotou SOC a jeho použití by se nabízelo i v náročnějších aplikacích. Tento model je taktéž možné rozšířit o druhou paralelní kombinaci, která umožní, tak jako u Vylepšeného Theveninova modelu, teoreticky zvýšit jeho přesnost, avšak vždy je to kompromis mezi přesností a výpočetní náročností. Tento model se označuje jako Vylepšený PNGV model¹⁰. Dvě paralelní kombinace v tomto případě rozlišují krátkou a dlouhou časovou konstantu. Samotný model se už téměř nemění a je možné ho vidět na obrázku 2.8.[21]

¹⁰ Název vychází z anglického označení „*advanced PNGV model*“.

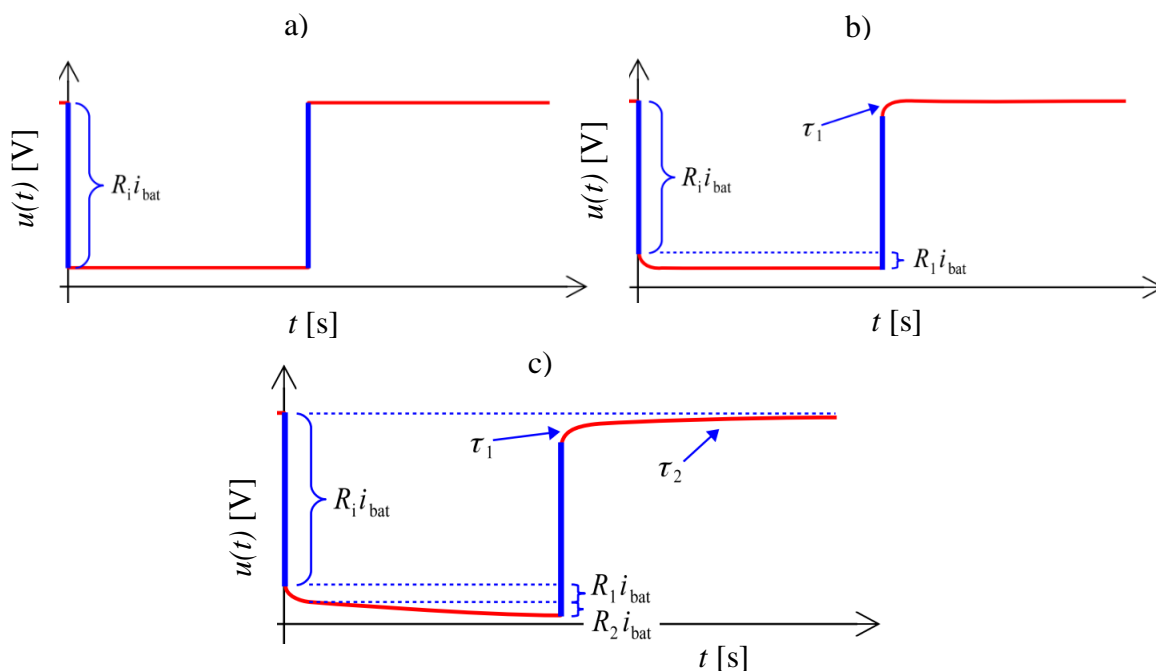


Obrázek 2.8 Vylepšený PNGV model

Tady tyto zmíněné modely se řadí mezi nejpoužívanější matematické modely pro popis Li-ion baterie, které se v praxi používají. V literatuře je možné najít i další modely, avšak valná většina z nich jsou odvozeny z modelů, které byly zmíněny v této části. Je možné taktéž najít další modely, které nejsou založené na představených, jako je například impedanční model, Randleův obvod či tzv. samo léčící model¹¹. [22]

Pokud bychom se podívali na výstupní charakteristiky těchto modelů, respektive jejich odezvu na vybíjecí impuls, tak bychom viděli, že téměř všechny tyto modely jsou schopné dosáhnout odezvy velmi blízké reálným hodnotám. Pro srovnání a znázornění vlivů přidávání paralelních RC kombinací jsou zde uvedeny na obrázku 2.9 tři grafy, které ukazují, jak se liší odezva na vybíjecí impuls pro IR model, jehož náhradní schéma obsahuje pouze odpor znázorňující vnitřní odpor vůči Theveninově modelu a vůči Vylepšenému Theveninově modelu, které oba obsahují paralelní RC větve. Na první pohled je zřejmé, že přidáním paralelní kombinace RC se více zrealní odezva na vybíjecí impuls, avšak je možné také vidět, že v případě Vylepšeného Theveninova modelu už rozdíl není tak velký. Z toho důvodu je nutné vždy zvážit balanc mezi složitostí a náročností implementace těchto modelů a jejich přesností. Díky tomu můžeme vyvodit závěr, že pro dostatečně přesnou modelaci baterie není nutné přidávat velké množství paralelních kombinací RC a obecně není nutné modelování zakládat na velmi složitých náhradních modelech. Jako dobrá varianta se tedy jeví Theveninův model, který dosahuje velmi dobrého poměru mezi přesností a složitostí.

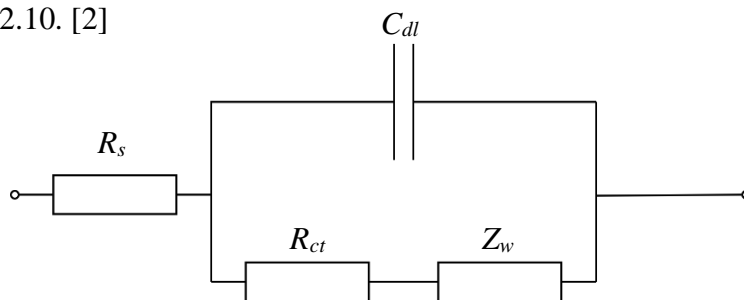
¹¹ Z angličtiny „self-healing characteristic-based model“.



Obrázek 2.9 Srovnání odezvy na vybíjecí impuls [15]
 a) IR model
 b) Theveninův model
 c) Vylepšený Theveninův model

Tyto zmíněné modely jsou ale pouze základní modely, které se zabývají popisem Li-ion baterie a následnou simulací za konstantních podmínek. Tyto modely je vždy možné rozšířit o další vlivy, jako je například upadání kapacity vlivem stárnutí, tzv. „aging“, změny chování a vybíjecích charakteristik vlivem změny teploty, vliv hystérie napětí atd. [2]

Jedním ze základních úprav, které se často provádějí při úpravách matematických modelů je přidání tzv. Warburg impedance. Jedním z obvodů, který využívá hojně v simulacích Warburg impedance je Randlův obvod. Tento obvod včetně Warburg impedance se snaží o více chemický přístup, než jen předchozí modely a můžeme ho vidět na obrázku 2.10. [2]



Obrázek 2.10 Randlův obvod

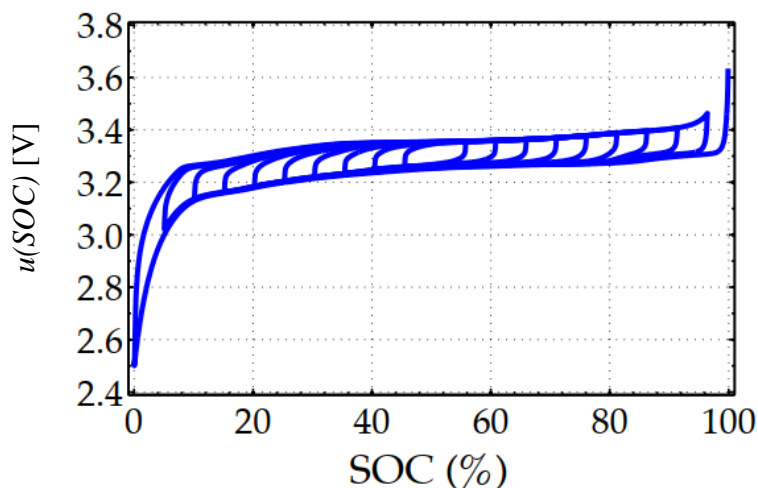
Na tomto obvodu můžeme vidět zmíněnou Warburg impedanci, která je označena Z_w , společně s dalšími prvky, jako je odpor R_s znázorňující odpor elektrolytu, odpor R_{ct} reprezentující odpor na přechodu mezi elektrodou a elektrolytem a v neposlední řadě kondenzátor C_{dl} zastupující nahromaděný náboj v elektrolytu blízko povrchu elektrod. [2]

Warburg impedance se snaží co nejdříve zastoupit rozložení lithiových iontů v elektrodě, jelikož u různého rozložení vychází různá impedance elektrod. Tato impedance je závislá na frekvenci a je možné ji popsat rovnicí

$$Z_w = \frac{A_w}{\sqrt{j\omega}} \quad (2.16)$$

V této rovnici A_w je Warburg koeficient a ω je úhlová rychlost v radiánech za sekundu. Pokud bychom chtěli navrhnout ekvivalentní alternativu k Warburg impedanci, tak by se jednalo o nekonečné množství sériově zapojených paralelních kombinací odporu a kondenzátoru. Ve velkém množství případů se zanedbává kondenzátor C_{dl} a následně se Warburg impedance nahradí určitým počtem sériově zapojených paralelních kombinací odporu a kondenzátoru. V tomto případě se celý obvod změní a vznikne v zásadě upravený Theveninův model obohacený o R_{ct} . Z toho důvodu se často využívá Theveninův model obohacený o různé zpřesňující prvky, jako je například právě odpor R_{ct} . [2]

Další z dějů, které se vyskytují v baterii a je možné je následně nějakým způsobem znázornit v ekvivalentním obvodu je hystereze napětí. Tento jev je klasickým jevem při odepnutí baterie, stejně jako při připojení baterie k zátěži. V praxi se hystereze napětí projevuje jevem, při kterém se po odpojení baterie od zátěže při vybíjení ustálí výstupní napětí na hodnotě nižší, než je OCV. Stejný jev se vyskytuje i při opačném procesu, pouze naopak. To znamená, že při nabíjení, pokud se baterie odpojí od zátěže, výstupní napětí se ustálí na vyšší hodnotě, než je OCV. [2]



Obrázek 2.11 Hystereze napětí Li-ion baterie

Z obrázku je možné vidět, že hystereze napětí není závislá na čase, ale je závislá na změně SOC. Toto je rozdílné oproti difúzním napětím, které jsou závislé na čase a po daném čase by bylo difúzní napětí nulové. Tady tato vlastnost se dá pozorovat u všech

Li-ion baterií a tvoří značnou část chyby mezi modely a praktickým měřením na baterii. Hystereze napětí je však značně složitá na modelování, a i z toho důvodu se moc často v modelech nevyskytuje a pokud ano, tak pouze ve zjednodušené formě. [2] [23]

3. IDENTIFIKACE PARAMETRŮ LI-ION BATERIE

V přechodí kapitole 2 byly představeny různé varianty modelů a možné přístupy modelování. Jelikož každý ze zmíněných modelů je opřen o jiné rovnice a taktéž o jiný teoretický základ, tak i parametry nezbytné pro tvorbu takového modelu se liší pro každý ze zmíněných modelů.

Základním bodem na kterém stojí celá identifikace parametrů je rozhodnutí, jakou cestou půjde autor při modelování. Dělení na různé typy identifikace parametrů je totiž především o nalezení správné rovnováhy mezi složitostí a přesností. Nejedná se pouze o složitost samotné identifikace parametrů, ale taktéž o složitost při samotné tvorbě modelu nebo složitost pro výpočetní software. Na druhou stranu je nutné vzít v potaz, že identifikace parametrů je nezbytnou součástí tvorby modelu pro predikci chování baterie a posuzování jejího výkonu, živostnosti či celkové vhodnosti pro použití.

Identifikaci parametrů můžeme rozdělit na tři základní kategorie:

1. *Online identifikace parametrů*
2. *Offline identifikace parametrů*
3. *Identifikace parametrů pomocí analytických metod*

Každá z těchto kategorií se liší v postupu identifikace a zároveň se liší pro jednotlivé přístupy k modelování. Proto zde budou tyto tři kategorie představeny souhrnně pro všechny různé přístupy. Pokud bychom se podívali na tyto kategorie souhrnně, tak první dvě kategorie bychom mohli shrnout jako identifikaci parametrů na základě dříve naměřených dat a poslední kategorie je odlišná především v principu, jakým se přistupuje k identifikaci parametrů. Tato kategorie je více zaměřená na fyzikální princip baterie a jeho popsání. [27]

3.1 Metody identifikace parametrů

3.1.1 Online identifikace parametrů

Jak už bylo zmíněno výše, online identifikace parametrů je založena na analýze dříve naměřených dat a využívá se nejčastěji pro modelování na základě náhradních obvodů. Důvodem, proč je označována jako online metoda je, že tato metoda využívá aktuální data, která jsou výstupem modelu v reálném čase. Samotná analýza probíhá často pomocí zpětnovazební korekce, kdy hodnota, která vystupuje z modelu, ať už jsou to hodnoty odporů, kapacit či OCV, je korigována podle toho, jaká hodnota je očekávána na výstupu. Toto srovnání probíhá mezi naměřeným průběhem a spočítanou hodnotou z modelu. Jako argument pro důležitost použití zpětnovazební korekce je možné ukázat vliv chyby určení SOC, kdy v případě, že je nepřesně určen počáteční SOC, například vlivem šumu na měřicím zařízení, tak může být celková simulace nepřesná.

Jedním ze základních metod zpětnovazební korekce je Kálmánův filtr. Tento filtr byl navržen v roce 1960 Rudolphem Kálmánem a stal se jednou z nejvyužívanějších metod filtrování lineárních systémů, viz [40]. Tento algoritmus je také označován jako LQE¹² neboli lineární kvadratický odhad a je založen na odhadu následujícího stavu ze znalosti předchozího stavu společně se spočtenou hodnotou z modelu. Celý Kálmánův filtr je založen na popsaném modelu pomocí stavových rovnic. Jeho popis můžeme založit na dvou základních rovnicích

$$\dot{x} = Ax + Bu + \eta_x \text{ a} \quad (3.1)$$

$$y = Cx + Du + \eta_y. \quad (3.2)$$

Parametry η_x a η_y jsou prvky Gaussovského bílého šumu, který ovlivňuje výstup z modelu, respektive z filtru, a matice A, B, C a D jsou samotné matice popsaného modelu. Zde by se jednalo o Li-Ion baterii, respektive jednotlivé parametry jako jsou odpory, kapacity atd. Samostatný odhad je následně proveden pomocí algoritmu tak, aby suma odchylek umocněná na druhou měla co nejmenší hodnotu. Jelikož Kálmánův filtr je určen pouze pro lineární systémy, je nutné provést linearizaci pro případy jako je Li-Ion baterie. Návrhem Kálmánova filtru včetně ukázek kódu z programu Matlab se dopodrobna zabývá například Plett s kolektivem, viz [23]. Druhou variantou je použití rozšířeného Kálmánového filtru, který je možné použít i pro nelineární systémy a je tedy preferovanou variantou, jelikož Li-Ion baterie se nechová lineárně a bylo by tedy nutné každý ze vstupu linearizovat. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma variantami je, že rozšířený Kálmánův filtr rovnou linearizuje vstupní veličinu. V případě baterie a jejího modelování by linearizovanou veličinou byl proud, kterým je baterie vybíjena, popřípadě nabíjena. Samotný Kálmán filtr je možné uvažovat i se všemi už zmíněnými variacemi jako je teplota, stárnutí atd. Mimo tyto dvě varianty Kálmánova filtru existují i další varianty jako je například adaptivní rozšířený Kálmánův filtr, sigma Kálmánův filtr a další. Každá z těchto variant se liší především v aplikaci neboli podmínkách, za kterých je tento typ filtru nejúčinnější a také přesností, přesněji maximální hodnotou chyby. Obecně dosahuje Kálmánův filtr a jeho variace přesnosti okolo 2 %. Srovnáním jednotlivých variant Kálmánova filtru se do detailu zabývá Zhang s kolektivem, viz [50]. [41][42][50]

Další z variant online identifikace parametrů je využití adaptivního řízení. Touto variantou se zabývá například Chaoui a kolektiv, viz [43]. Princip této metody je velmi podobný Kálmánovu filtru a je založen na zpětnovazební korekci. I zde se využívá metody odhadu pomocí algoritmu sumy odchylek nejmenších čtverců. Jedním z hlavních rozdílů je užití Lyapunovy přímé metody pro určení stability této metody. [43] [44]

Jako další z často používaných možností je využití Luenbergerova pozorovatele. Tuto variantu můžeme najít například v práci od Tanim a kolektivu, viz [45], kteří navrhli

¹² Z anglického „*linear quadratic estimation*“.

postup určování SOC pro model jedné částice¹³ za využití Luenbergerova pozorovatele. Princip pozorovatele je zpětnovazební kompenzace poruch, jako například šum, působící na systém. Jako pozorovatele můžeme označit i Kálmánův filtr popsáný výše. I tento typ pozorovatele je založen na popsání modelu pomocí stavových rovnic a korekce těchto stavů. Je nutné si uvědomit, že v případě použití jakéhokoliv pozorovatele, tak dochází ke zpoždění mezi vstupem a výstupem právě z důvodu korekce. [45]

Poslední variantou, která bude zmíněna v rámci pozorovatelů, je použití tzv. „*smooth variable structure filter*“, zkráceně SVSF. Tato strategie je tak jako předchozí taktéž ve formě predikování a následné korekce výstupu systému. Její základ položil a formuloval Habibi v roce 2007, viz [46]. Jeho výhodou je možnost použití jak pro lineární, tak pro nelineární systémy a jeho princip je založen na nucené konvergenci k optimálnímu výsledku pomocí nastavených hranic okolo reálné trajektorie. I tento systém musí být tak jako předchozí popsán pomocí stavových rovnic. V odborné literatuře je taktéž možné najít různé kombinace zmíněných přístupů, jako je například kombinace rozšířeného Kálmánova filtru a SVSF, čímž se dosahuje ještě lepších výsledků než v případě použití jednotlivých filtrů. [47][48][48]

Samostatnou kapitolou je zde online identifikace parametrů pomocí učících se algoritmů (strojového učení). Mezi tyto algoritmy se řadí například neuronové sítě, obsahující alespoň tři vrstvy (vstupní, skrytá a výstupní vrstva). V těchto vrstvách se následně přiřazují (algoritmus se „*naučí*“) výstupní stavy. Neuronové sítě jsou tedy tak jako všechny zmíněné filtry závislé na naměřených datech, které vstupují do tvorby modelu. Identifikaci parametrů založenou na neuronových sítích se zabývá například Yang s kolektivem, viz [51]. Další z variant strojového učení, které se používají na identifikaci parametrů je tzv. SVM¹⁴, který je založen na principu rozšíření modelu do více dimenzí a výstupní hodnota je tedy několikrát zhodnocena a upravena. Mimo tyto dva zmíněné typy existuje i značné množství dalších, které jsou však všechny založeny na podobném principu, a to naučení se predikce hodnoty na základě dodaných vstupních dat. Jako zástupce můžeme dále zmínit Fuzzy logiku, genetické algoritmy či extrémní strojové učení. Všechny tyto modely dosahují obecně lepší přesnosti než zpětnovazební filtry a jsou tedy lepší pro použití tam, kde je velká vstupní variace proměnných. Pro ilustraci chyba těchto modelů dosahuje v průměru hodnot okolo 0,5 %. Srovnáním a obsáhlou rešerší se zabývá například Zhang a kolektiv, viz [50], či Hannan a kolektiv, viz [52].

Každá ze zmíněných variant má různé limitace, ať už to je výpočetní náročnost či celková přesnost, avšak každá z těchto variant vždy slouží k celkovému zpřesnění predikovaného stavu a zvýšení celkové použitelnosti a hlavně variability modelu. Hlavním důvodem pro použití veškerých filtrů a estimatorů je, že každé měření pro určení

¹³ Z anglického „*single partical model*“.

¹⁴ SVM = Support Vector Machine

parametrů baterie má určitou chybu, která je dána například měřicími přístroji, a tyto chyby se akumulují a snižují přesnost modelu.

Nejčastějším parametrem, který se určuje v případě online identifikace parametrů je stav nabití neboli SOC. Tady tento typ online identifikace parametrů je specifický tím, že na rozdíl od různých korektorů či jiných estimátorů není vůbec založen na naměřených datech, a tedy jeho určování změny v čase nepodléhá korekcím a je hodnotou, která bývá nejčastěji dopočítávána. Nejčastější metodou online určování SOC je určování pomocí Coulombovy počítací metody, která je založena na integrování proudu. Tato metoda však není bezchybná a jednou z hlavních překážek je určení původního stavu nabití baterie. I z toho důvodu se online identifikace SOC pomocí Coulombovy metody neustále vyvíjí a jednou z možných úprav a vylepšení je přidání PI regulátoru do výpočtu SOC, čímž by se dosáhlo snížení možné chyby z důvodu neznámého počátečního SOC a zvýšila by se celková přesnost a použitelnost této metody. [29][27]

3.1.2 Offline identifikace parametrů

Na rozdíl od online identifikace parametrů je offline identifikace parametrů založena čistě na analýze předem naměřených dat a nejsou zde aplikována data z modelu v reálném čase. Tak jako předchozí metoda i tato metoda identifikace parametrů se nejvíce používá v případě modelování na základě náhradních obvodů. Tato metoda se používá pro identifikaci parametrů, které můžeme určit předem z analýzy vstupních dat a nejsou nadále závislé na různých proměnných v rámci vybíjení či nabíjení baterie. Hlavní složitostí a překážkou pro kvalitní offline identifikaci parametrů je především množství měření, které je nutno provést, jelikož do jednou naměřených dat už nadále nevstupuje žádná závislost vůči veličinám jako je okolní teplota nebo stáří měřené baterie. Z toho důvodu je nutné měřit velké množství baterií pro každou teplotu pro kterou chceme identifikovat parametry a zároveň po různé stáří baterie. Díky tomu je v případě důkladného měření vstupních dat tato metoda jak časově náročná, tak výpočetně náročná v následné analýze všech naměřených dat.

Klasickým zástupcem offline identifikace parametrů je v rámci modelování na základě náhradních obvodů vnitřní odpor nebo velikosti paralelních kombinací odporů a kondenzátorů. Tyto parametry je možné určit několika způsoby, které se liší na základě použité testovací metody pro naměření dat. Jednou z variant testování a získávání dat je vybíjení a nabíjení konstantním proudem. Tato varianta má své výhody, například možnost určení možné hystereze napětí v baterii, i nevýhody. Jednou z hlavních nevýhod je nemožnost určení velikostí odporů a kondenzátorů v náhradním obvodu. Pro určení velikostí odporů a kondenzátorů je tedy nutné použít jinou metodu, a to metodu vybíjení a nabíjení pomocí pulsního průběhu proudu. Z takto naměřených dat je možné určit hodnoty jednotlivých parametrů obvodu tak, jak je popsáno v navazující kapitole 3.2.

Poslední zde zmíněnou variantou offline identifikace parametrů je EIS neboli elektrochemická impedanční spektroskopie¹⁵. Tato metoda je založena na zkoumání frekvenční odezvy baterie. I tato metoda má své problémy, především náročnost na provedení testování. Zároveň u této metody není možné sledovat její závislost na vybíjecím, či nabíjecím proudu. Na druhou stranu její výsledky a celková přesnost dosahuje velmi dobrých výsledků.

Nejčastější variantou při identifikaci parametrů je zvolení kombinovaného přístupu, tak jako to bude provedeno i v případě této práce, kde SOC je určován pomocí online metody a zbylé parametry jsou pro tvorbu modelu vytvořeny s předem naměřených dat, tedy pomocí offline metody. [27][30]

3.1.3 Identifikace parametrů pomocí analytických metod

Poslední kategorií identifikace parametrů je identifikace pomocí analytických metod. Tato metoda je založena především na fyzikálních modelech, které byly popsány v kapitole 2. Je značně odlišná od přechozích dvou metod, jelikož není založena na reálném zařízení, ale je založena na teoretických předpokladech. Není možné tedy takto modelovanou baterii srovnat s reálným vzorkem, jelikož vychází pouze z teorie. Tato metoda taktéž neuvažuje reálné chování baterie a využívá se tedy spíše v rámci vývoje nových baterií, kde není možné otestovat a změřit průběhy.

V literatuře je možné najít studie, které se zabývají mimo jiné i srovnáním reálného průběhu napětí baterie s baterií namodelovanou na základě identifikovaných parametrů pomocí této metody. Tato studie ukazuje, že parametry určené pomocí této metody lze použít, avšak je nutné počítat s chybou, která vychází ze srovnávání „ideální“ baterie s reálnou. Celkový přehled zde zmíněných metod je možné najít na další straně v tabulce 3.1. [27][31]

¹⁵ Z anglického „*electrochemical impedance spectroscopy*“.

Tabulka 3.1 Přehled metod identifikace parametrů

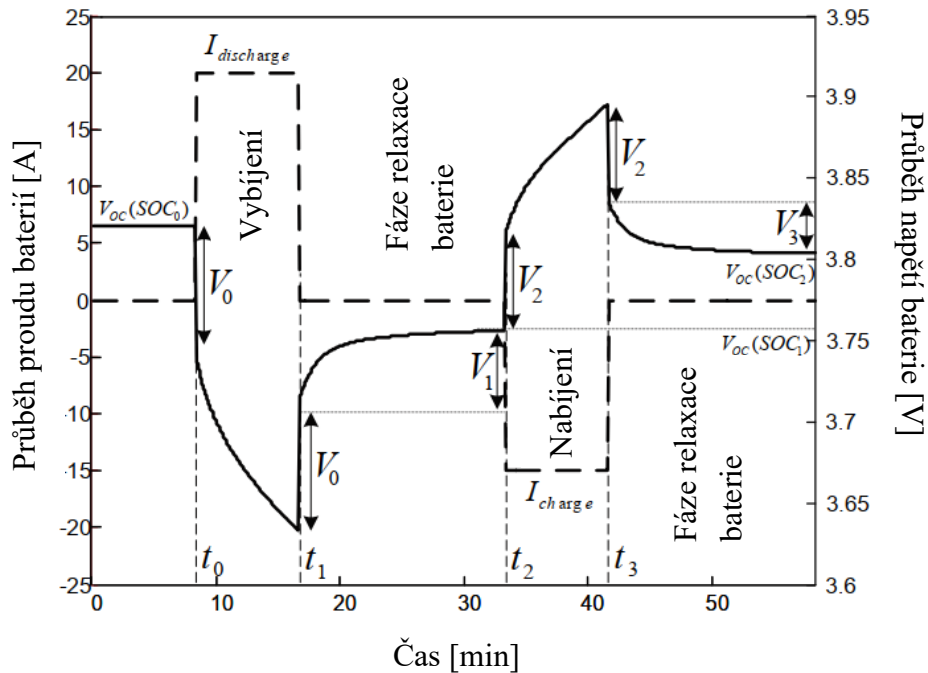
	Metoda	Výhody	Nevýhody
Online	Coulombova počítací metoda (SOC)	Jednoduchost, nenáročnost na implementaci	Problém určení počáteční hodnoty SOC
	Pozorovatelé (Kálmánův filter, Luenbergerův pozorovatel, ...)	Vysoká přesnost	Náročnost na implementaci, vyskytující se zpoždění
	Metoda nejmenších čtverců	Dobrá přesnost	Méně náročné na implementaci, dost závislé na počátečním odhadu systému
	Učící se algoritmy	Velmi dobrá přesnost a odezva na variace vstupních dat	Velmi náročné na implementaci a tvorbu
Offline	Konstantním proudem	Standartní metoda	Nemožnost určení přechodných parametrů, statický model
	Pulsním proudem	Dobré určení přechodných parametrů	Větší náročnost na implementaci, statický model
	EIS	Možnosti zjištění frekvenční odezvy	Není možné určit přechodné parametry modelu
Analytická	-	Není nutné žádné modelování	Nízká přesnost, složitost na tvorbu

3.2 Teoretický popis identifikace parametrů pro Li-Ion baterii

V této části se bude tato práce věnovat určení parametrů pro možnou simulaci baterie pomocí náhradního obvodu. Na základě vybraného náhradního zapojení je nutné vybrat správné určení parametrů a správně pochopit na základě čeho a posléze z čeho se tyto parametry určují.

Pro tvorbu modelu byl vybrán jednodušší Theveninův model s jednou paralelní kombinací odporu R_1 a C_1 , který by však i tak měl být dostatečný pro tvorbu přesného a použitelného modelu. Pro kvalitní model je nezbytná správná a hlavně přesná identifikace parametrů baterie. Nejprve se podíváme na teoretickou stránku a teoretické určení parametrů.

Samotné určení parametrů se provádí nejčastěji pomocí naměřených průběhů proudu a napětí. Nezbytné je však, aby naměřené průběhy byly pulsního charakteru, jelikož parametry se identifikují při tzv. „odpočinkové“ fázi baterie. Na obrázku 3.1 můžeme vidět příklad vybíjecího a nabíjecího impulsu, ze kterého je možné určit jednotlivé hodnoty parametrů baterie.



Obrázek 3.1 Vybíjecí a nabíjecí impuls pro identifikaci parametrů

Samotné parametry se liší jak pro vybíjecí, tak pro nabíjecí impuls. Ale samotná metodika a princip určení parametrů se neliší. Z toho důvodu se tato práce bude věnovat primárně určení parametrů u vybíjecího impulsu.

Pokud se podíváme na jednotlivé časové intervaly, tak můžeme konstatovat, že v případě, kdy čas t zařadíme do příslušného časového intervalu, tak na tomto základě můžeme stanovit parametry následovně:

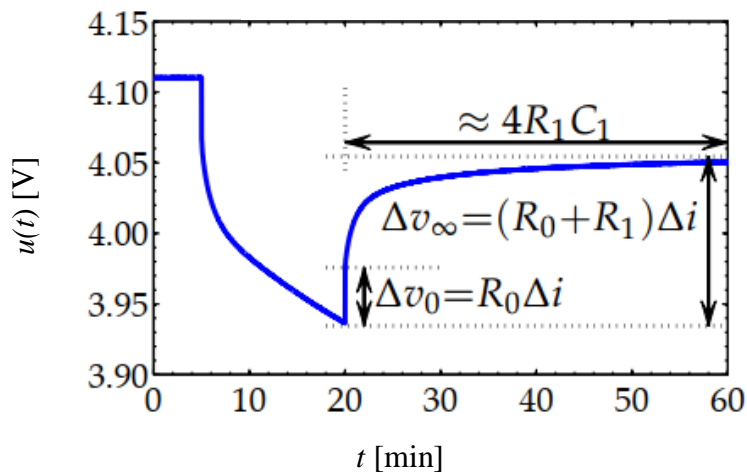
- $t \in < 0; t_0 >$
 - V tomto případě nedochází k žádnému elektrickému jevu v baterii. Baterie je v klidovém stádiu a není připojena na zátěž. To znamená, že můžeme říct, že proud baterií $i_{batt} = 0$ A. Stejně tak se nemění hodnota SOC a na svorkách je napětí OCV (SOC₀).
- $t \in < t_0; t_1 >$

- Tento časový interval je charakterizován jako vybíjení baterie. Baterie je připojena k zátěži a nastává pokles SOC. Proud zde dosahuje kladných hodnot a na svorkách, potažmo na zátěži, je možné naměřit napětí, které je rovno OCV minus úbytky napětí na vnitřním odporu a na paralelní kombinaci. Prvotní úbytek, na obrázku 3.1, označen jako V_0 , odpovídá úbytku na vnitřním odporu, který se projevuje okamžitě. A následný pomalý pokles je způsoben paralelní kombinací odporu a kondenzátoru. V případě, že uvažujeme více paralelních kombinací, tak je to pokles na všech těchto kombinacích.
- $t \in < t_1; t_2)$
 - Z pohledu určení parametrů baterie je tento časový interval, společně s ekvivalentním intervalem po nabíjecím cyklu nejdůležitější. Tento interval je charakterizován odpočinkovou fází po odpojení zátěže. Proud v této části je roven nule, $i_{\text{batt}} = 0 \text{ A}$, a baterie se vrací do stavu před počátkem vybíjení. Na obrázku 3.1 je možné vidět, že v okamžiku odepnutí zátěže zmizí úbytek na vnitřním odporu a následný exponenciální růst je charakterizován časovou konstantou. Celý tento proces je možné matematicky popsat a tyto rovnice jsou následně vstupním bodem pro identifikaci parametrů při vybíjení baterie.
- $t \in < t_2; t_3)$
 - Tento časový interval je principiálně totožný s vybíjecím cyklem, který je popsán při časovém intervalu $t \in < t_0; t_1)$. Jediným rozdílem je zde proud, který je záporný. Znovu zde je možné vidět změnu napětí vlivem vnitřního odporu a následný exponenciální růst, při kterém roste i SOC.
- $t \in < t_3; \infty)$
 - Poslední interval odpovídá stavu odpočinku po nabíjení baterie. Tento interval je taktéž důležitý pro identifikaci parametrů, jelikož parametry pro vybíjecí a nabíjecí křivky se často liší a snižují potom celkovou přesnost modelu. [24]

3.3 Matematické popsání identifikace parametrů

Pro samotnou identifikaci parametrů nás nejvíce zajímá odpočinková část napěťových křivek, a to jak u vybíjecí napěťové křivky, tak u nabíjecí napěťové křivky. Důležité je poznamenat, že tato identifikace parametrů se řadí pod offline identifikaci parametrů, jelikož je založena na naměřených datech, ze kterých se tvoří výsledný model.

Nejprve se budeme zabývat matematickým popsáním identifikace parametrů pro klasický Theveninův model s jednou paralelní RC kombinací u vybíjecího impulsu. Na obrázku 3.2 můžeme vidět teoretický průběh vybíjecího impulsu.



Obrázek 3.2 Průběh vybíjecího impulsu

Popsání této odezvy na vybíjecí impuls můžeme rozdělit na dvě části. První částí je prvotní změna napětí vlivem zaniknutí proudu neboli změna na vnitřním odporu baterie, kterou můžeme matematicky popsat jako

$$R_0 = \frac{\Delta v_0}{I}. \quad (3.3)$$

Následuje druhá část, kterou musíme popsat. Celá tato druhá část má svou vlastní časovou konstantu, jelikož se jedná o RC článek, a tuto časovou konstantu využijeme i při samostatném matematickém popisu. Tuto druhou část můžeme popsat jako exponenciální změnu, která má počátek v předchozí hodnotě napětí OCV. Celý tento průběh můžeme tedy popsat jako

$$u(t) = OCV(SOC_1) - u_{RC}(t_1) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}, \quad (3.4)$$

$$\tau_{RC} = R_1 \cdot C_1, \quad (3.5)$$

$$A = OCV(SOC_1), \quad (3.6)$$

$$B = u_{RC}(t_1), \quad (3.7)$$

$$\alpha = \frac{1}{\tau_{RC}}. \quad (3.8)$$

Pro jednodušší identifikaci parametrů jsou zde zavedeny tři substituce, které jsou popsány na rovnicích (3.6),(3.7) a (3.8). Za využití těchto substitucí můžeme pomocí vhodného softwaru, například *cftool* v programu Matlab, proložit „odpočívací“ část křivky funkcí, jejíž rovnice bude po zkombinování všech předchozích rovnic

$$f(t) = A - B \cdot e^{-\alpha \cdot t}. \quad (3.9)$$

Z proložené funkce, respektive z jejích parametrů, je už jednoduchou matematickou operací možné určit samostatné prvky a jejich hodnoty. Hodnota odporu R_0 byla určena už výše, takže chybí už pouze hodnota odporu R_1 a kondenzátoru C_1 , jež je možné určit z rovnic

$$R_1 = \frac{u_{RC}(t_1)}{(1 - e^{-\frac{t_{dis}}{\tau_{RC}}}) \cdot I_{discharge}} \text{ a} \quad (3.10)$$

$$C_1 = \frac{\tau_{RC}}{R_1}. \quad (3.11)$$

Ve výše uvedených rovnicích se kromě už známých parametrů a koeficientů vyskytuje taktéž vybíjecí proud $I_{discharge}$, který v případě nabíjecího cyklu bude nahrazen I_{charge} a také t_{dis} , který charakterizuje délku vybíjecího pulsu. Celý tento proces identifikace parametrů je brán pro vybíjecí cyklus, avšak stejně jej lze použít i pro určení parametrů pro nabíjecí cyklus. [24]

I v případě, že bychom uvažovali složitější Theveninův model s dvěma paralelními větvemi, tak by se samotné určování parametrů až tak nelišilo od přechodného postupu. Všechny kroky by se pouze duplikovaly, jelikož by se rovnice popisující průběh odpočinkové fáze vybíjecího, popřípadě nabíjecího cyklu, rozšířila o další exponenciálně popsané napětí, které by charakterizovalo druhou paralelní kombinaci odporu a kondenzátoru. Teoreticky by tento postup šel rozšiřovat do nekonečna, avšak je otázkou, zda by to zvyšovalo přesnost celého modelu.

3.4 Možnosti prokládání identifikovaných parametrů křivkou

Tak jak již bylo nastíněno v předchozích kapitolách 3., 3.2 a 3.3, identifikace parametrů je základním a velmi důležitým krokem pro vytvoření věrohodného modelu. Jelikož však značná část identifikace parametrů spočívá v proložení naměřených dat křivkou, je nutné se zaměřit i na samotné proložení. Prokládání dat křivkou je možné pomocí velkého množství softwarů, namátkou je možné zmínit Python, Excel, Matlab či další.

Základem proložení dat je vhodné zvolení funkce, jakou budeme data prokládat. Zaměříme se na prokládání OCV křivky baterie v závislosti na SOC. Tak jako v případě volby náhradního modelu baterie, i zde se jedná o kompromis mezi přesností a náročností na výpočetní výkon a implementaci. Touto problematikou se zabývají některé odborné studie, jako například studie od Zhang a kolektivu [38].

Možnosti proložení dat křivkou:

1. *Proložení exponenciálou*

Jako první variantu můžeme zmínit proložení exponenciální křivkou o předpisu

$$U_{oc} = a_1 e^{b_1 S} + a_2 e^{b_2 S} + cS^2. \quad (3.12)$$

Toto proložení je závislé na několika koeficientech, které jsou výstupem proložení. Vstupními daty jsou zde U_{oc} a S , které zde zastupuje SOC. Tady toto proložení dosahuje obecně dobrých hodnot, avšak pro nízké stavy SOC se až tak nehodí, jelikož chyba v tomto rozmezí značně roste.[38]

2. *Proložení polynomem*

Druhou variantou, kterou jde prokládat zmíněný průběh, je proložení polynomem n -tého stupně. Především u proložení polynomem vyvstává otázka, která byla položena na začátku této kapitoly, a to kde leží ideální kompromis mezi složitostí a náročností na implementaci a její přesností. Pokud bychom se zaměřili čistě na přesnost, proložení polynomem vyšších řádů bude lepší, jelikož umožňuje přesnější reprezentaci reálného chování. Na druhou stranu je nutné se podívat i na to, zda nebude dostačující polynom například 6. stupně, jehož chyba by dosahovala přijatelných hodnot. Obecný předpis tohoto proložení je

$$U_{oc} = a_1 S^n + a_2 S^{n-1} + \dots + a_n S + a_{n+1}. \quad (3.13)$$

Celkově ukázal vývoj chyby při tomto proložení právě Zhang a kolektiv [38]. Samotné doporučení, které proložení je nejlepší, se nedá jednoduše říct, jelikož to závisí na potřebách autora. Avšak můžeme říct, že s přibývajícím řádem polynomu chyba klesá čím dál pomaleji. [38]

3. *Proložení součtem sinusových funkcí*

Další z variant je proložení pomocí součtu sinusových funkcí. Tak jako proložení exponenciálou i toto proložení má problémy co se týče nízkých stavů nabití (SOC), kdy chyba často dosahuje značně vysokých hodnot. Stejně tak v případě SOC blízkých nule, kdy tady tato varianta proložení není ideální. Obecný předpis této varianty je

$$U_{oc} = \sum_{i=1}^n a_n \sin(b_n S + c_n). \quad (3.14)$$

I zde je možné vidět, že počet jednotlivých funkcí, které sčítáme, může jít do libovolných hodnot, ale platí zde stejný kompromis jako v předchozím případě, kdy od určitého hodnoty n chyba neklesá o takové rozdíly, aby se vyplatilo použití tohoto proložení.[38]

4. *Proložení Gaussovou křivkou*

Poslední variantou, která bude zmíněna v rámci tohoto přehledu, je proložení pomocí Gaussovy křivky. Toto proložení můžeme popsat pomocí obecného předpisu

$$U_{oc} = \sum_{i=1}^n a_n e^{\left(\frac{s-b_n}{c_n}\right)^2}. \quad (3.15)$$

I zde můžeme vidět, že se jedná o součet libovolného počtu Gaussových křivek. Tady toto proložení dosahuje velmi dobrých výsledků a obecně můžeme říct, že z těchto čtyřech různých variant proložení je tato varianta nejpřesnější a dosahuje nejmenších hodnot chyby.[38]

4. REALIZACE MODELU V PROGRAMU MATLAB

Tato část práce se zabývá samotnou realizací náhradního matematického modelu. Matematický model, který byl vybrán pro realizaci, je Theveninův model s jednou paralelní kombinací odporu a kondenzátoru. V této práci je uvažován model pouze s touto paralelní kombinací a s vnitřním odporem, avšak tyto prvky modelu mají možnost změny několika různých podmínek, čímž je možné dosáhnout simulací za různých okolních podmínek a různých dalších situací.

Pro tvorbu samotného modelu byl využit program Matlab, speciálně Matlab a jeho programová nástavba Simulink, umožňující tvorbu matematických obvodů v uživatelsky příjemném grafickém prostředí.

Realizaci modelu můžeme rozdělit do dvou částí, a to identifikace parametrů ve skriptu programu Matlab a na matematický model v Simulinku.

4.1 Prakticky provedená identifikace parametrů v MATLAB

Identifikací parametrů se zabývala předchozí kapitola, proto zde jen stručně můžeme říct, že data pro identifikaci parametrů byla naměřena v rámci bakalářské práce a jsou použita i v její tvorbě. Simulovaná baterie je Li-ion baterie typu 18650 od firmy Panasonic, která má kapacitu 3500 mAh. V rámci měření dat byla baterie vybíjena pulsním proudem s amplitudou 1,5 A a délkou periody 1260 vteřin. Střída pulsu byla konstantní a měla hodnotu 0,04761.

Identifikace parametrů tohoto modelu by se dala zařadit jako kombinovaná offline a online metoda, viz kapitola 3. Jako online metodu bychom zde zařadili určení SOC a pod offline metodu by spadaly všechny ostatní parametry. Celá identifikace parametrů byla následně provedena stejnou metodou jako bylo popsáno v kapitole 3.2. Průběh napětí byl rozkouskovaný na jednotlivé cykly, které byly následně podrobeny výpočtu parametrů. Tuto část kódu je možné vidět na další stránce. Výsledné koeficienty byly následně proloženy odpovídající křivkou, která nejlépe odpovídala průběhu hodnot. Jednalo se především o polynomy vyšších řádů, řády se odvíjely od aktuální přesnosti, která byla posuzována na základě RMSE (relativní střední kvadratická chyba). Koeficienty z proložené křivky se použily v realizaci modelu v Simulinku, ve kterém je provedena celá simulace. Druhé části, samotné tvorbě modelu se věnuje vlastní kapitola v práci dále.

Pokud se zaměříme, jak byl celkový průběh napětí rozkouskovaný, tak můžeme určit ze znalosti průběhu vybíjecího, popřípadě nabíjecího proudu čas, kdy se změní proud z 0 A na velikost amplitudy a zpětně také čas, ve kterém se změní proud z amplitudy zpět na 0 A. Každá z těchto změn nám odděluje jednotlivé cykly mezi sebou. Jeden takový cyklus je poté buď vybíjení nebo nabíjení. V tomto okamžiku má proud velikost amplitudy a „odpočinková“ fáze, kdy je proud 0 A. Zde nás zajímá odpočinková fáze, ze které

identifikujeme parametry baterie, a to pomocí rovnic, které byly představeny v kapitole 3.3.

Úryvek z kódu, který se zabývá identifikací parametrů je možné vidět na této straně. Tento kód především dělí průběh napětí na jednotlivé cykly pomocí rozdílu mezi hodnotou proudu aktuální a hodnotou při předchozím měření. Pokud je rozdíl větší než definovaná hodnota, tak se zapíše do paměti jako začátek, popř. konec cyklu. Z těchto kousků průběhů tedy dojde k identifikaci parametrů.

```
i = 1;
coefficient = zeros(1000,3);
I = abs(I);
for I_fit = 50:1:length(I)

    i_fit_diff = I(I_fit)-I(I_fit-1);

    if i_fit_diff < -1.3
        u_1 = I_fit;

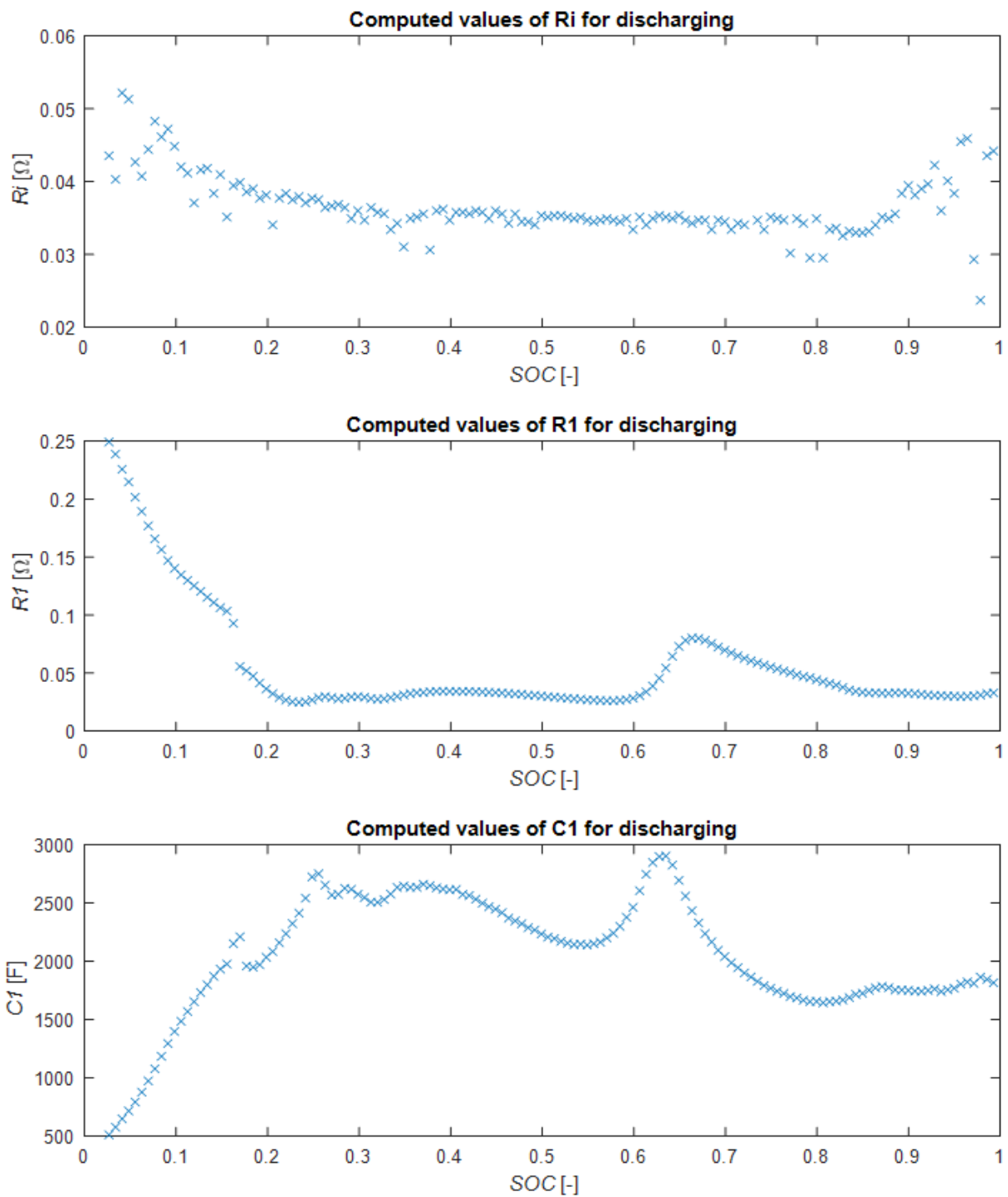
    elseif i_fit_diff > 1.3
        u_2 = I_fit-1;
        u_fit = u(u_1:u_2);
        t_fit = 0.1:0.1:(length(u_fit)/10);
        t_fit = t_fit.';
        try fit = createFit_short(t_fit,u_fit);
            coefficient(i,1:3) = coeffvalues(fit);

            SOC_fit(i) = 1-((trapz(t(1:I_fit),I(1:I_fit)))/3600)/3.5;
            Ri_fit(i) = (u(u_1)-u(u_1-1))/I_dis;

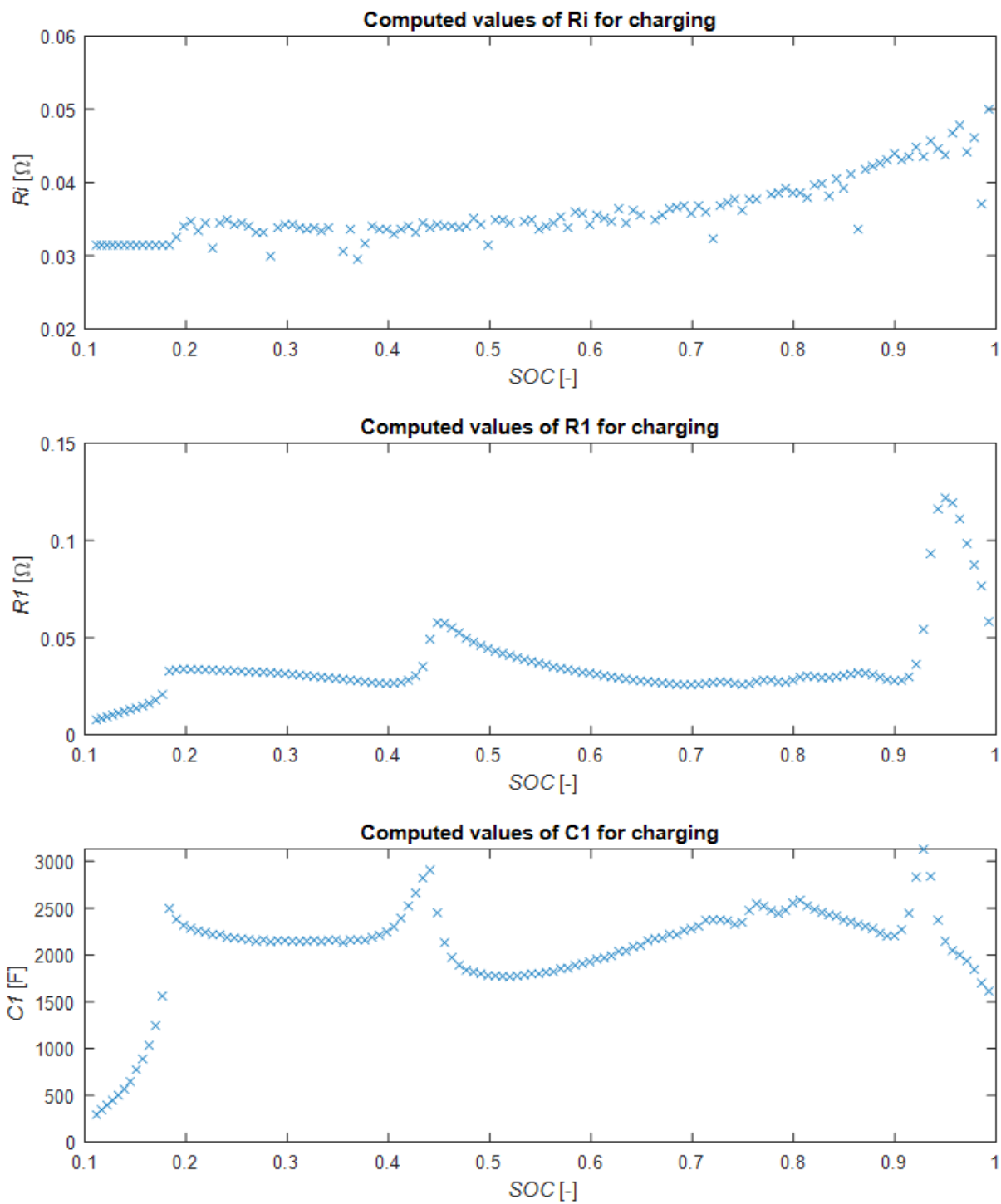
            OCV_SOC(i) = coefficient(i,1);
            V_RC(i) = abs(coefficient(i,2));
            tau(i) = 1/(coefficient(i,3));

            R1_fit(i) = abs(V_RC(i)/((1-exp(-60/tau(i)))*I_dis));
            C1_fit(i) = abs(tau(i)/R1_fit(i));
            V_batt(i) = OCV_SOC(i)-V_RC(i)*exp(-((1200)/10)/tau(i))-
Ri_fit(i)*I_dis;
            i = i+1;
        catch
            continue;
        end
    else
        continue
    end
end
end
```

Na následujících dvou obrázcích, 4.1 a 4.2, můžeme vidět výsledek skriptu a identifikované parametry baterie. Před tvorbou samotného modelu je následně nutné se zaměřit na otázku co chceme, aby model uměl. Jelikož tato práce se zaměřuje na prakticky použitelný model, tak hlavním úkolem tohoto modelu bude určit parametry náhradního zapojení a predikovat výkon baterie na základě naměřeného napětí a proudu baterie, kterou chceme simulovat.



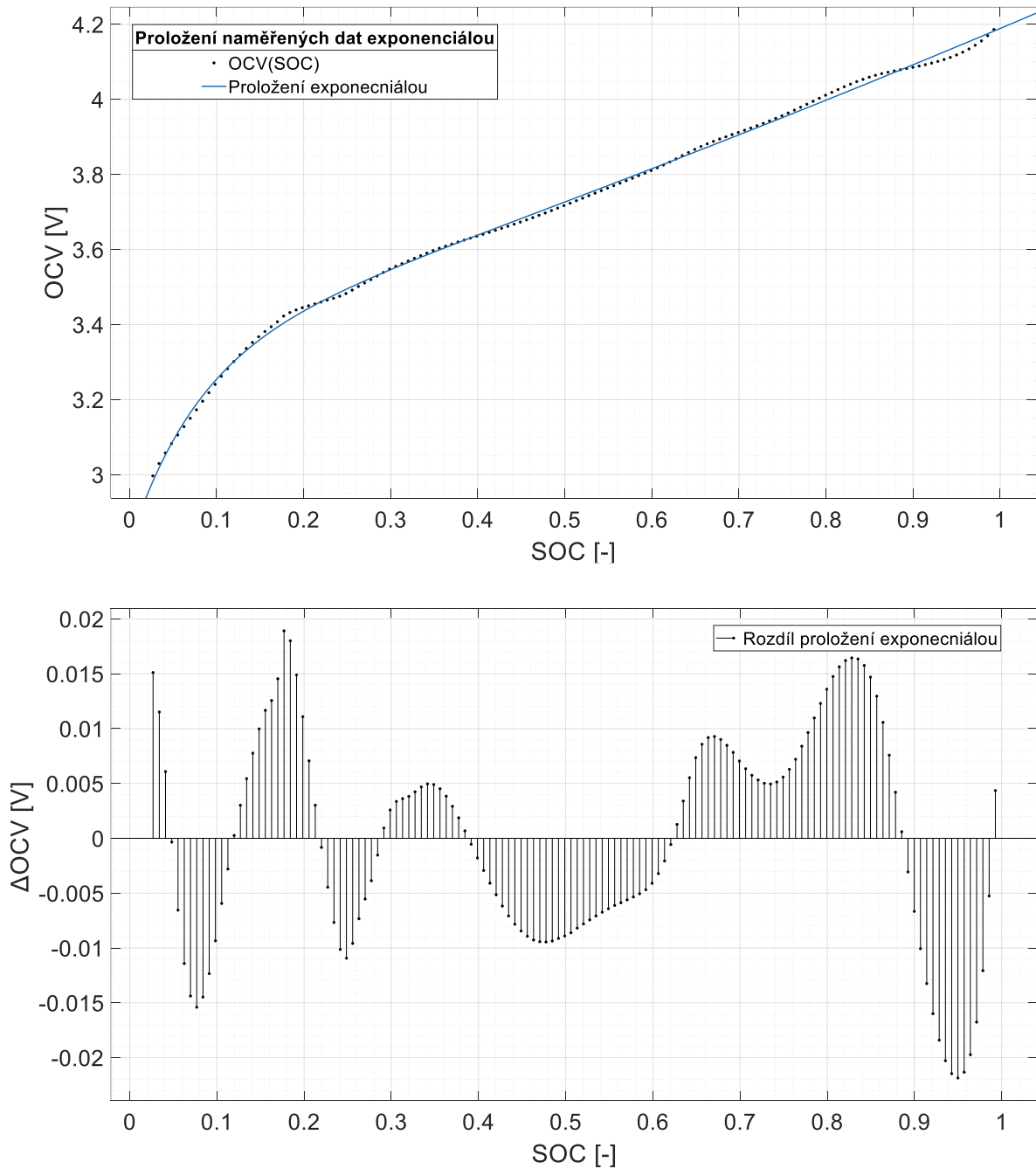
Obrázek 4.1 Identifikované parametry při vybíjení



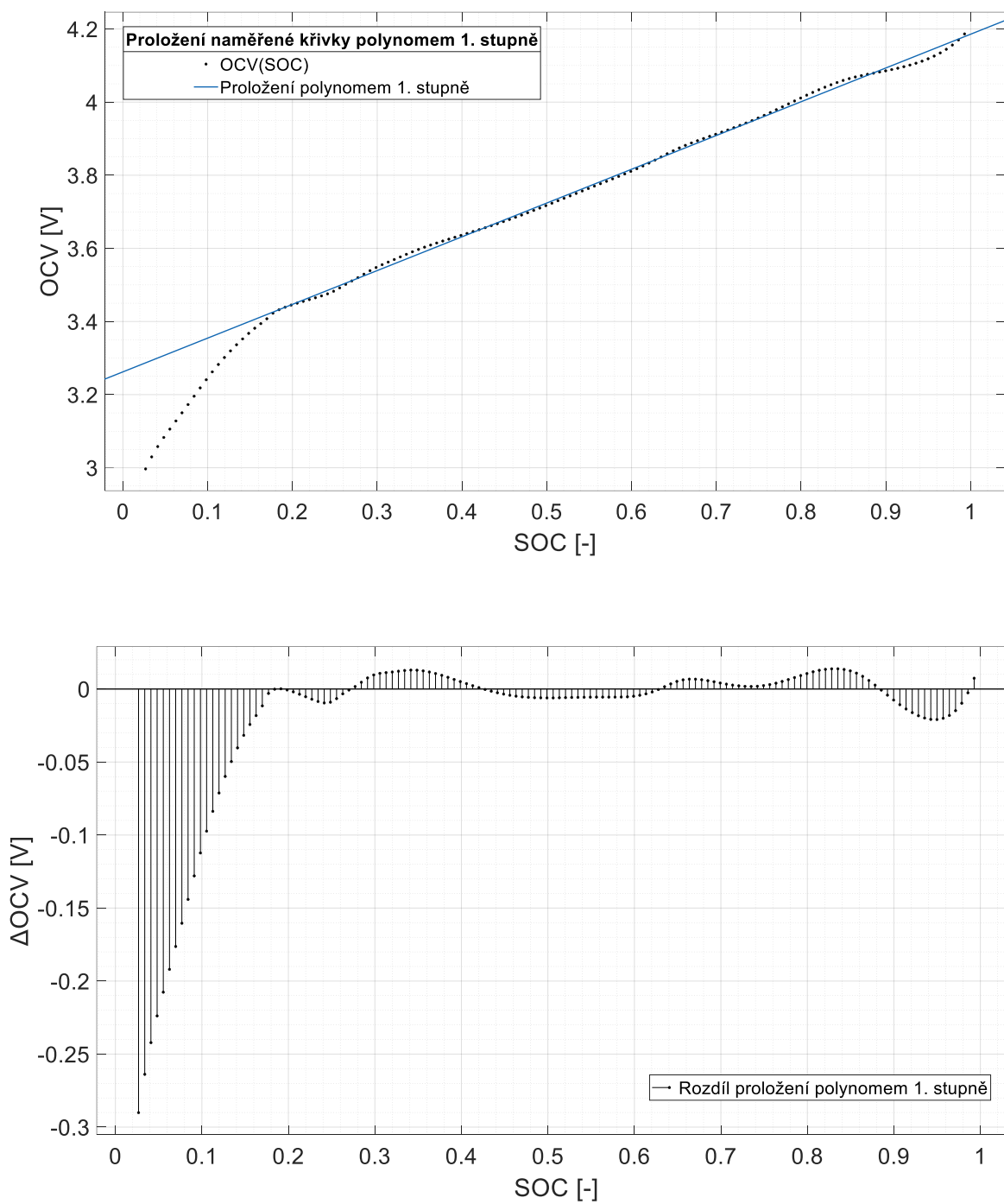
Obrázek 4.2 Identifikované parametry při nabíjení

4.1.1 Ukázka možných proložení a jejich vlivů

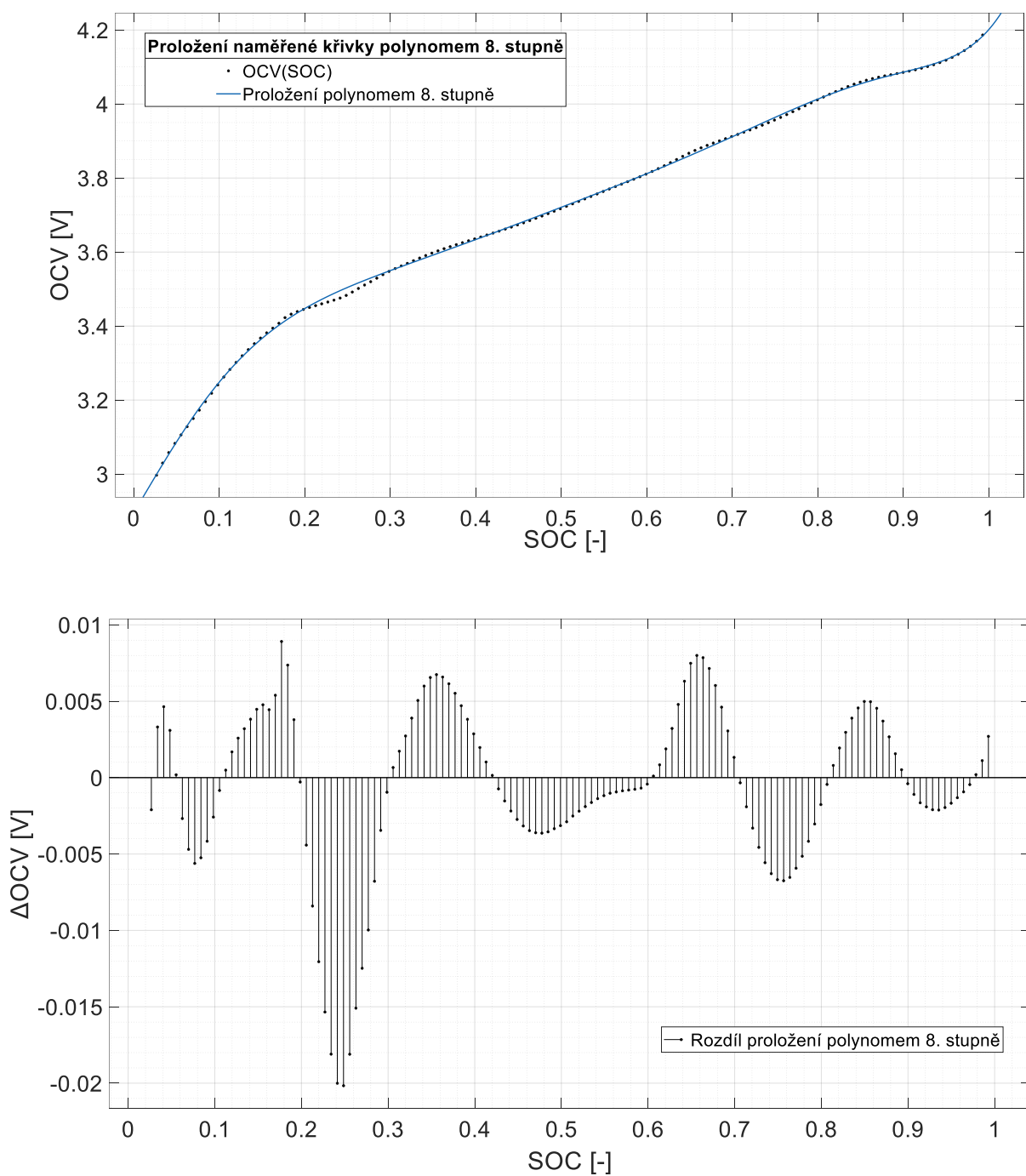
Každý z identifikovaných parametrů, viz obrázky 4.1 a 4.2, je nutné proložit křivkou. Různými variantami prokládání pomocí křivky se zabývá kapitola 3.4 a zde je možné vidět, jak prakticky vypadá samotné proložení, a především rozdíly mezi jednotlivými variantami proložení, a to včetně křivky ukazující rozdíly mezi reálnou hodnotou a proložením.



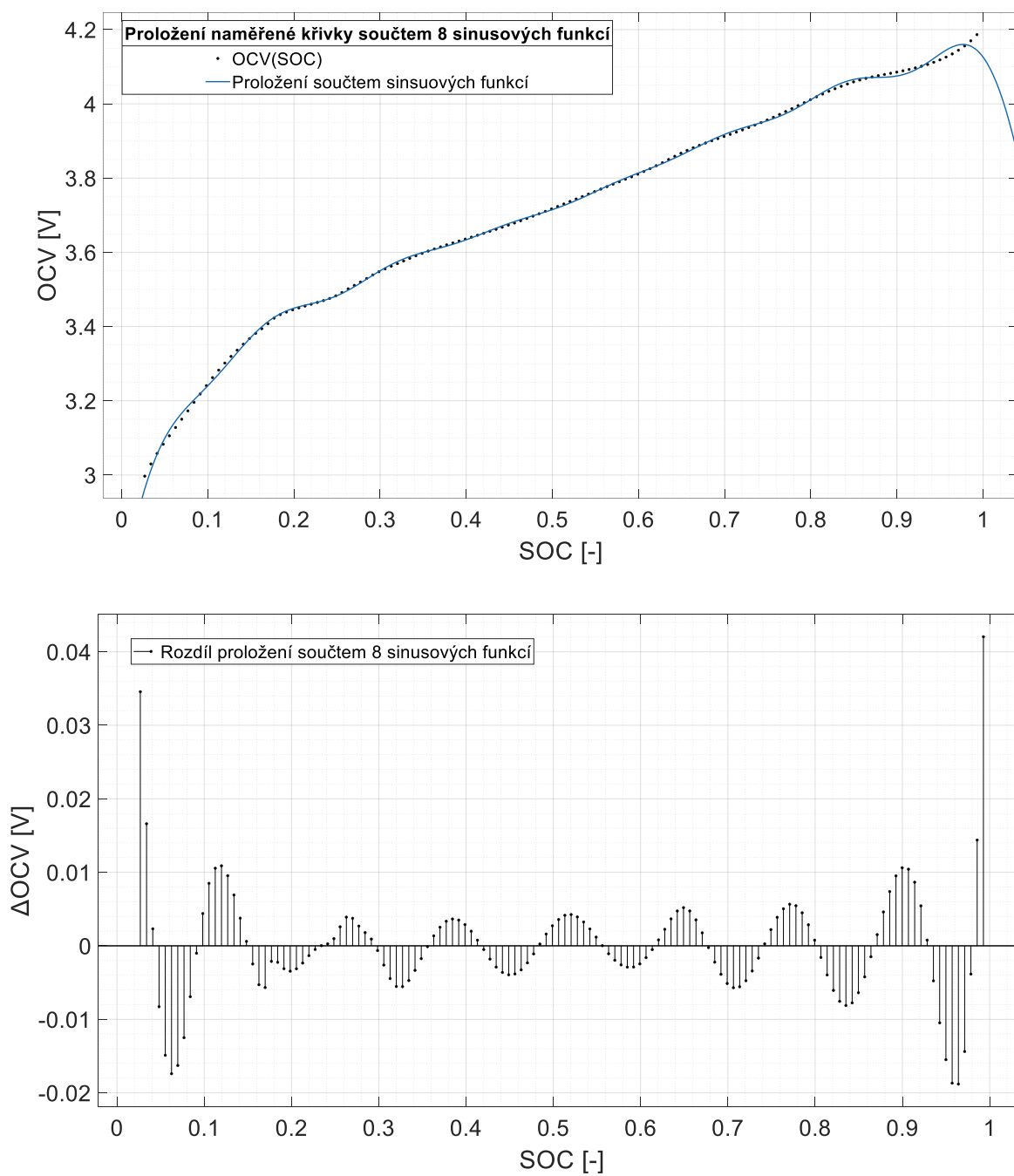
Obrázek 4.3 Proložení naměřeného OCV exponenciálou



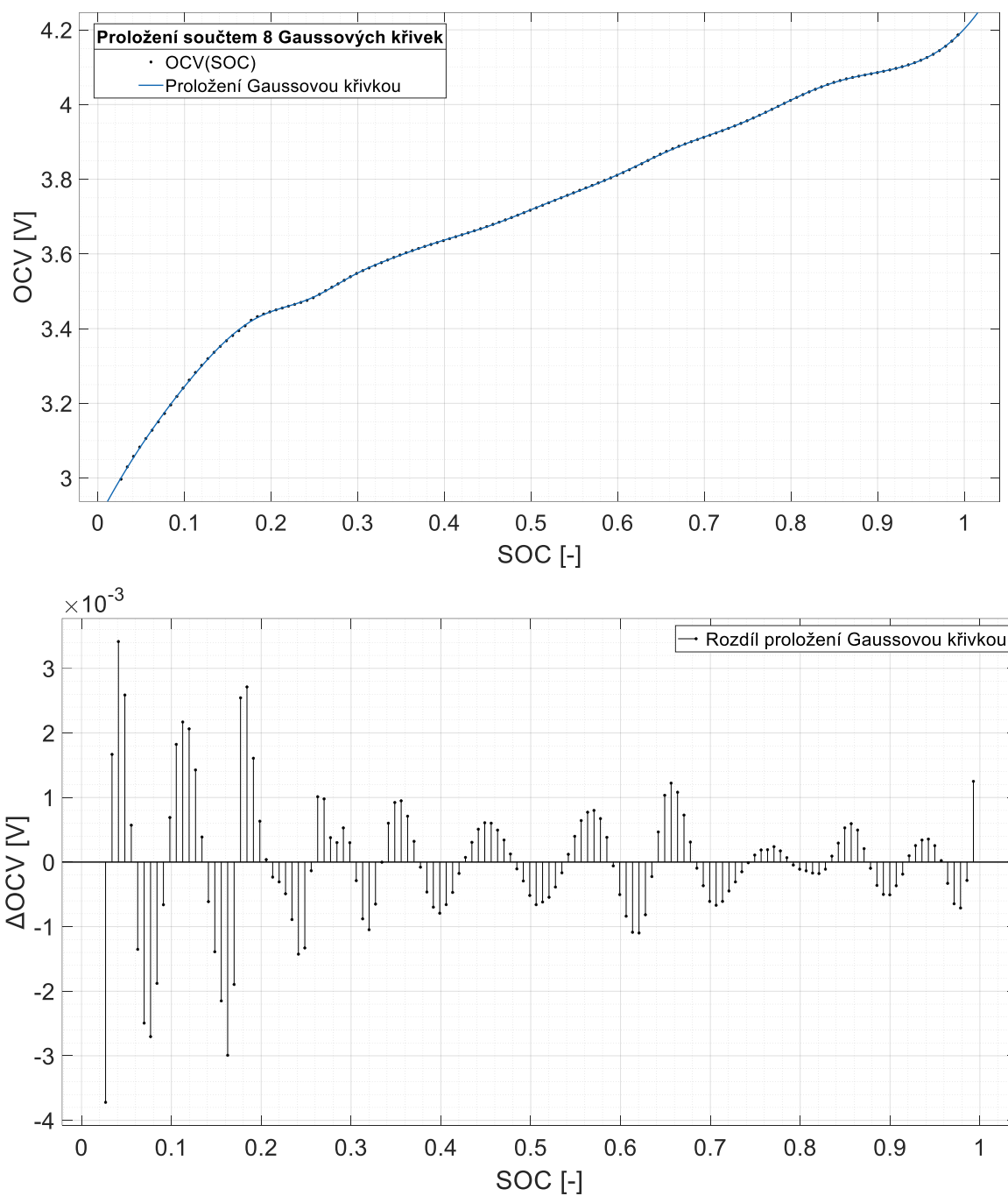
Obrázek 4.4 Proložení naměřeného OCV polynomem 1. stupně



Obrázek 4.5 Proložení naměřeného OCV polynomem 8. stupně



Obrázek 4.6 Proložení naměřeného OCV součtem 8 sinusových funkcí



Obrázek 4.7 Proložení naměřeného OCV součtem 8 Gaussových křivek

Na těchto obrázcích 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 a 4.7 jsou ukázány možné varianty proložení naměřené závislosti OCV na SOC různými křivkami. Pokud zhodnotíme jednotlivé varianty, tak obrázek 4.3 ukazuje možnost proložení exponenciálou a z grafu je možné okamžitě vidět, že proložení exponenciálou nedosahuje moc dobrých výsledků, a to především v oblasti vysokého nabití, SOC 70 % - 100 %. Mimo to jde vidět, že odchylka se neustále pohybuje nahoru a dolů, a to na relativně vysoké hodnoty odchylky. Z toho

můžeme usoudit, že proložení exponenciálou dost linearizuje průběh OCV v závislosti na SOC. Toto by se projevilo ve výsledném modelu především jako rozdíl mezi ustálenou hodnotou po vybíjecím impulsu.

Další proložení je proložení polynomem na obrázku 4.4 a 4.5. První ze zmíněných obrázků ukazuje proložení polynomem 1. stupně neboli přímkou. Zde je na první pohled viditelné, že proložení je velmi nepřesné v oblastech nízkého SOC, a tudíž i model by byl v těchto oblastech velmi nepřesný. Na druhou stranu však toto proložení dosahuje velmi dobré přesnosti v rozmezí SOC 20 %-80 %, kde se absolutní chyba pohybuje v rozmezí ± 20 mV. Pro zvýšení přesnosti v oblasti nízkého SOC se používají právě polynomy vyšších řádů, jako například polynom 8. stupně, který je možné vidět na obrázku 4.5 a který dosahuje výrazně lepší přesnosti, než polynom 1. stupně. I z tohoto důvodu zvýšené přesnosti byl polynom 8. stupně vybrán jako vhodné proložení pro tvorbu modelu, jelikož toto proložení nabízí dobrý poměr mezi přesností a náročností na implementaci. Avšak i kvůli částečnému linearizování v rozmezí 20 %-80 % SOC dochází k potlačení jemných změn ve výstupní charakteristice modelu a tato vlastnost je viditelná na obrázku 4.20, kde můžeme vidět, že simulovaný průběh není perfektně totožný s měřeným a projevuje se tato linearizace.

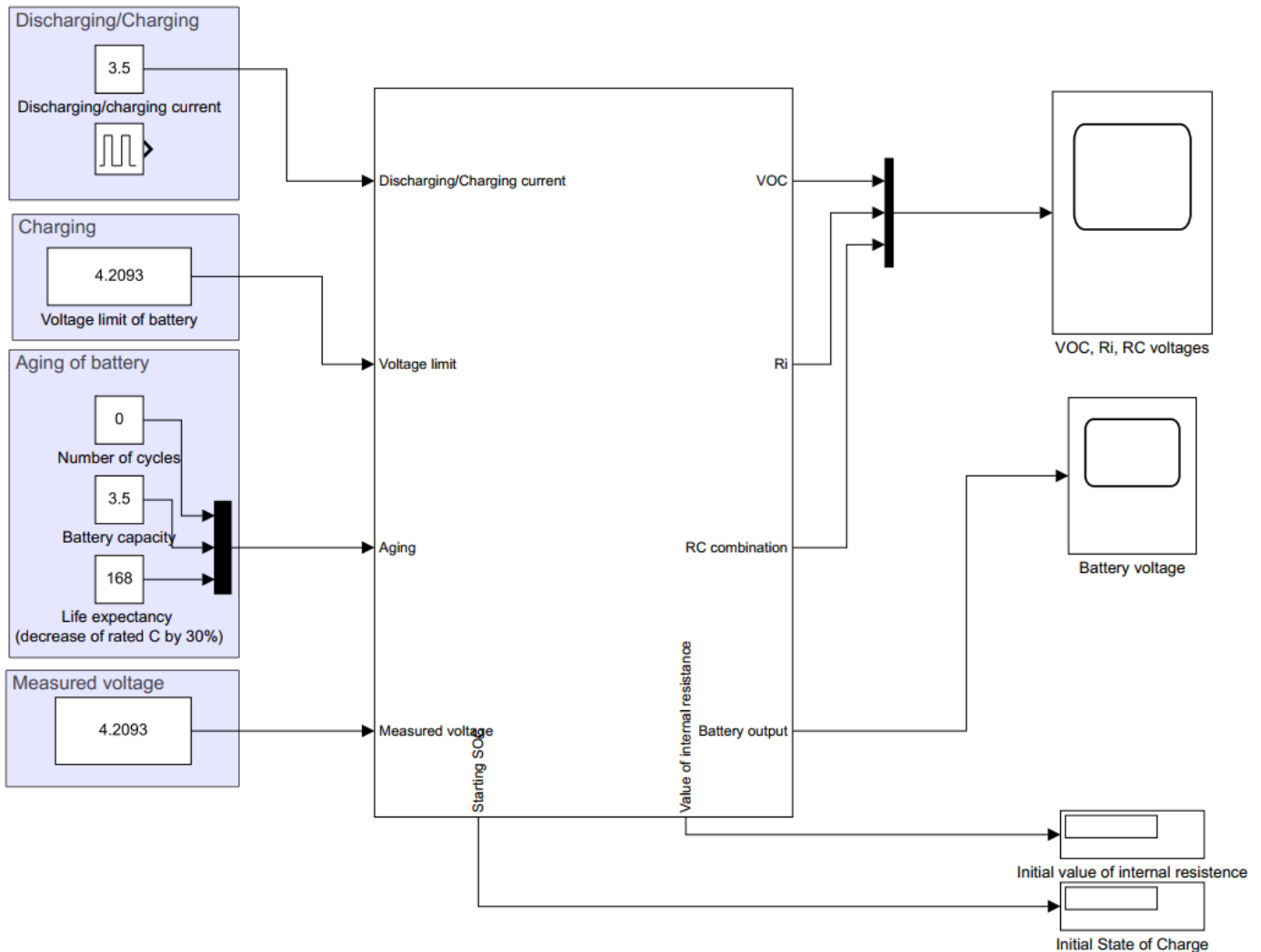
Jako další varianta je zde ukázáno proložení pomocí součtu sinusových funkcí. Zde je ukázán rovnou příklad, kde toto proložení dosahuje dobrých výsledků a to součet 8 sinusových funkcí. Na první pohled je patrná vlastnost tohoto proložení, a to opakující se průběhy odchylek. Tato vlastnost vychází z toho, že sčítáme sinusové průběhy, které mají vlastní periodu, a tudíž se opakují. Pokud bychom sledovali průběh SOC ve větším měřítku například od 0 % do 1000 % tak bychom viděli, že opravdu toto proložení kmitá, a tudíž je nutné zvážit jeho použití z důvodu nereálného proložení mimo původní rozsah. Pokud bychom se zaměřili na přesnost tohoto proložení, tak je možné vidět, že proložení nedosahuje dobré přesnosti v oblastech nízkého a také vysokého SOC a je tedy použitelné pouze pro oblast v rozmezí 20 % až 80 % SOC.

Jako poslední proložení je zde ukázáno proložení součtem 8 Gaussových křivek. Toto proložení dosahovalo zdaleka nejlepších výsledků, kdy jeho maximální odchylka byla menší než 4 mV. Toto proložení má však nevýhodu v jeho obtížnější implementaci do Simulinku, tudíž zde nebylo využito.

Co zde však nebylo zmíněno je varianta rozkouskování naměřených průběhů na části, které jdou následně jednoduše proložit. Zde by se nabízelo rozdělit naměřený průběh na část pro nízký SOC, dále na část, kde je průběh závislosti OCV na SOC téměř lineární a na část vysoké hodnoty SOC. Tato varianta by se dala použít pro ještě větší zpřesnění prokládání parametrů, avšak zde použita nebyla, jelikož polynom 8. stupně dosahoval dostatečné přesnosti. Obdobným způsobem proběhlo i proložení ostatních určených parametrů, viz obrázky 4.1 a 4.2.

4.2 Model v Simulink

Pokud se podíváme na hlavní část práce, tak tou je bezpochyby model v Simulinku. Ten vychází z náhradního matematického modelu, který je založen na Theveninově matematickém modelu s jednou paralelní RC kombinací a je jeho reprezentací. V této části se podíváme na jednotlivé části modelu a tvorbu těchto částí včetně rovnic, na kterých jsou jednotlivé prvky založeny.



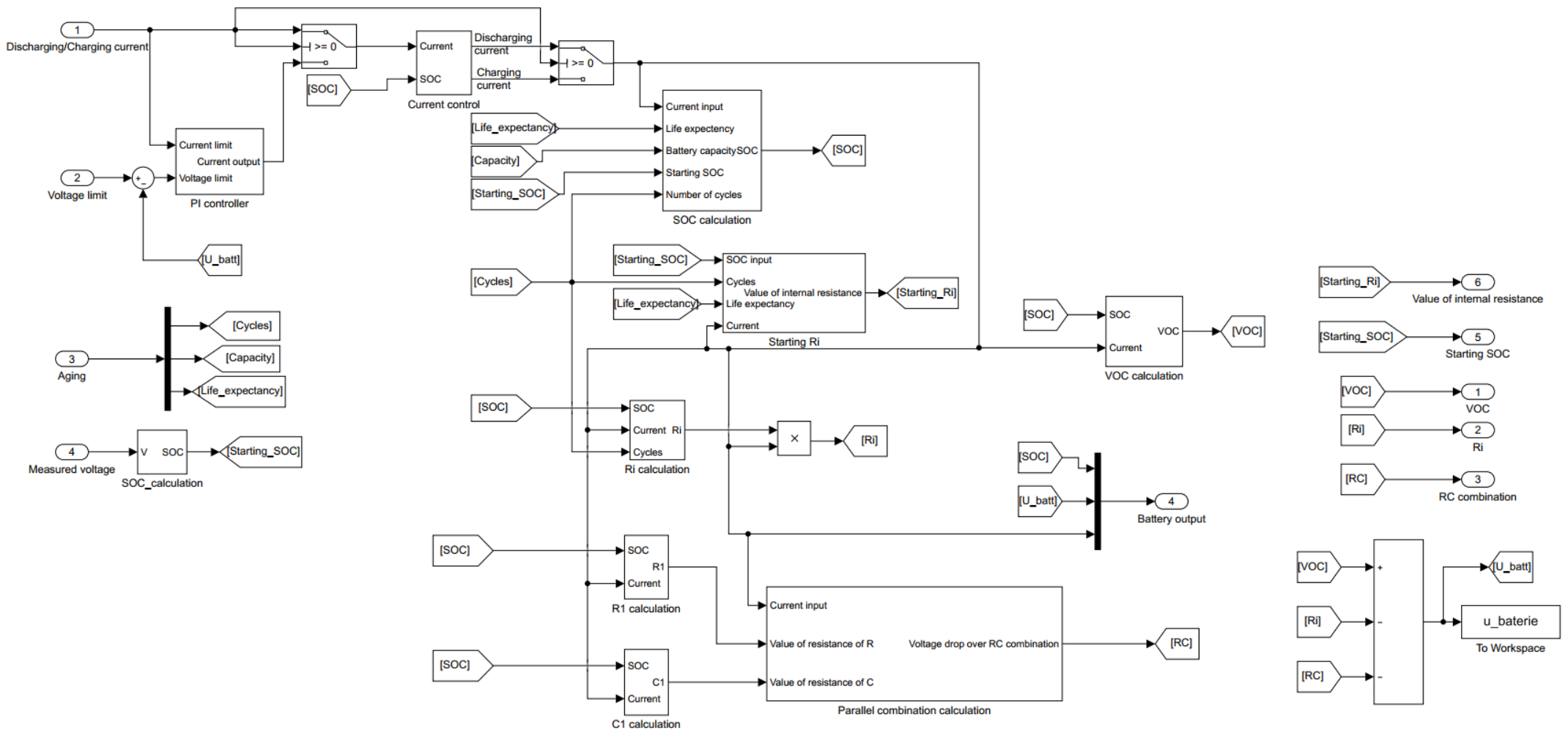
Obrázek 4.8 Náhled na celkový model v Simulink

Na obrázku 4.8 je možné vidět celkovou schránku modelu. Před jakýmkoliv popisem je nutné říct, co tedy tento model umí a na co je zaměřen. Model se zaměřuje na simulaci baterie Li-Ion 18650 na základě naměřených charakteristik. Vstupem do modelu je uživatelem naměřený proud a napětí. Na základě těchto dvou hodnot je identifikován aktuální SOC společně s aktuální hodnotou vnitřního odporu a je následně simulován očekávaný průběh napětí, proudu a SOC v závislosti na čase. Možnou další úpravou je

přidání stárnutí baterie, kde na základě proběhlého počtu cyklů a očekávané hodnoty cyklů, na kterou je baterie navržena, jsou výstupní charakteristiky upraveny.

Pokud se podíváme do hlavního subsystému, tak je možné vidět, že model je rozdělen na několik částí, subsystémů, jako jsou výpočty velikostí jednotlivých prvků náhradního obvodu, výpočet stavu nabití, výpočet napětí naprázdno, PI regulátor a další. Toto schéma je možné vidět na obrázku 4.9 na další straně.

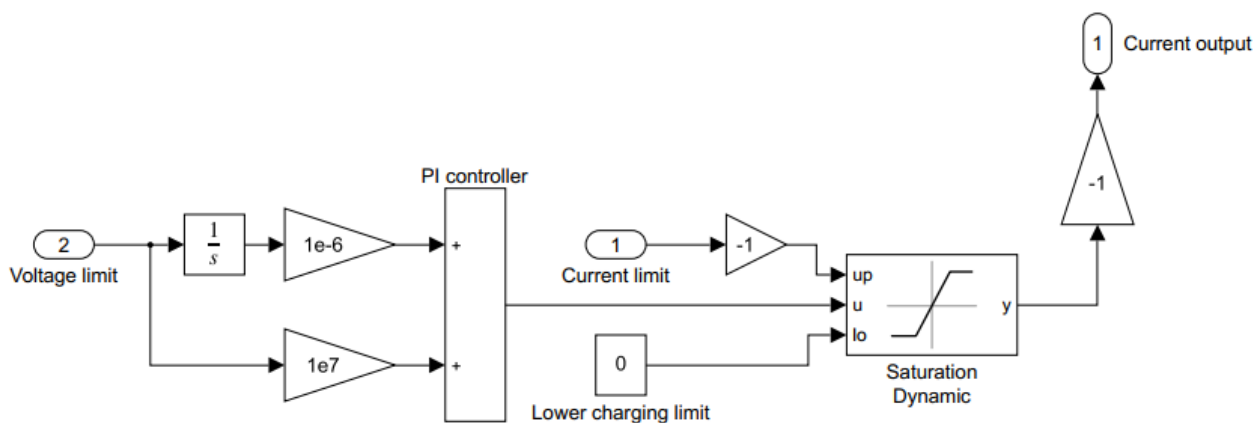
V následující části je práce zaměřena na popsání jednotlivých subsystémů a na rovnice a vlivy, které můžeme najít v rámci Li-Ion baterie a které jsou implementovány do tohoto modelu.



Obrázek 4.9 Přehled celkového uspořádání hlavního subsystému

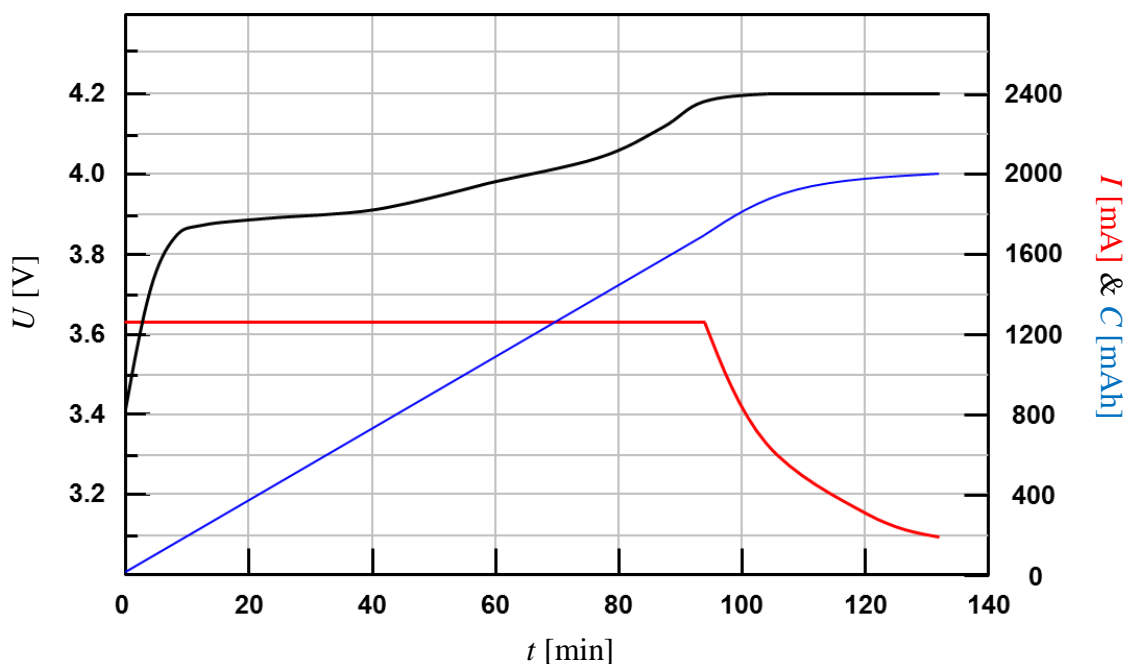
4.2.1 PI regulátor

Pokud na schématu začneme zleva, tak jako první subsystém, který je zde zmíněn, je PI regulátor. Tento subsystém má za úkol simulovat správné chování baterie při nabíjení.



Obrázek 4.10 Subsystém PI regulátor

Tento PI regulátor je využíván pro nabíjecí část modelu a je zde využit pro regulaci nabíjení, jelikož nabíjení Li-ion baterie probíhá ve dvou fázích. V první fázi probíhá nabíjení konstantním proudem, a to až do téměř plného nabití. Ve chvíli, kdy na svorkách baterie dosáhneme maximálního napětí, začne v praxi zdroj nabíjet baterii konstantním napětím a hodnota proudu začne exponenciálně klesat, dokud neklesne k nule. Celý tento proces můžete vidět na obrázku 4.11.



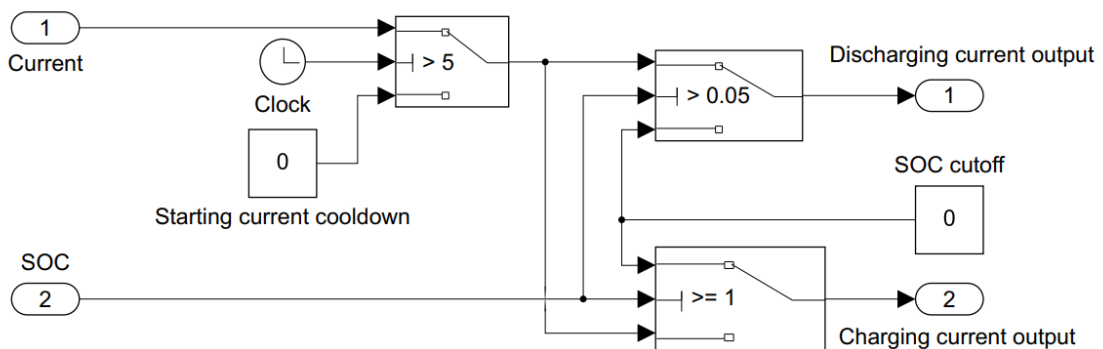
Obrázek 4.11 Průběh nabíjení Li-Ion baterie [25]

Z tohoto důvodu je zde implementován klasický PI regulátor, do kterého vstupuje vstupem 2 rozdíl mezi napětím, kterým chceme nabíjet a napětím, které dostáváme reálně v baterii. Na základě tohoto rozdílu je následně napětí regulováno a model se chová jako u reálné baterie. Proud je zde omezen pomocí bločku dynamické saturace, který nám umožňuje regulovat maximální hodnotu na základě zadané hodnoty uživatelem. Výstupem je potom proud, kterým je baterie, resp. její model, nabíjen. [25]

4.2.2 Ovládání proudu a limitace SOC

Další z funkčních částí, která byla následně uzavřena do vlastního subsystému je kontrola a ovládání proudu. Tuto část můžeme vidět na následujícím obrázku 4.12. Tento systém se skládá ze dvou částí. První částí je pozdržení prvního cyklu, jelikož chceme, aby model byl schopen ukázat počáteční hodnotu nezatížené baterie. Z toho důvodu je zde nastaveno zdržení 5 vteřin. Tato funkce je čistě estetického charakteru a nemá základ v reálném fungování baterie a je tedy ji možné klidně zanedbat bez toho, aby to ovlivnilo další funkci modelu.

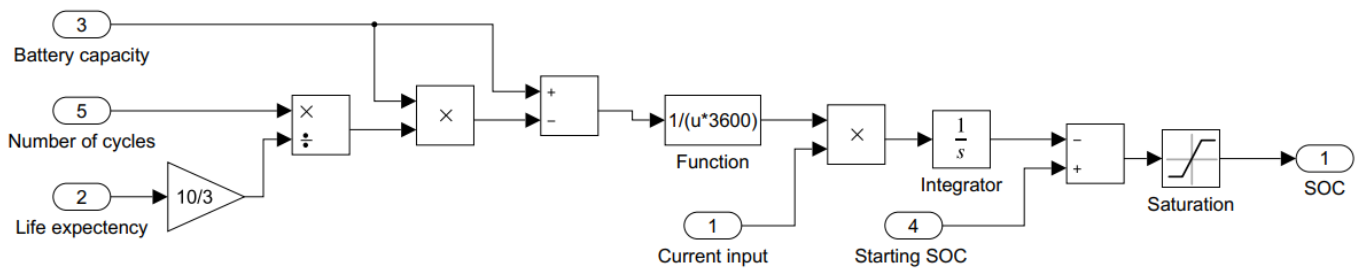
Druhá část je zde použita pro opačnou stranu cyklu. Ve chvíli, kdy při vybíjecím cyklu klesá hodnota SOC na velmi nízké hodnoty, tak při reálném použití dochází z důvodu bezpečnosti k odpojení baterie. Tato skutečnost je zde popsána přidáním omezení, které odpojí baterii v případě, že SOC dosáhne 5 %. V případě nabíjecího cyklu je implementována stejná podmínka, zde však není důvodem žádný bezpečnostní prvek a je proto nastavena na hodnotu SOC 100 %. Tady tyto dvě podmínky nám zajišťují, že se v modelu nemůže vyskytovat jiný SOC než z námi definovaného rozmezí. Pro úplný popis je důležité ještě doplnit, že vstupem 1 zde vstupuje proud a vstupem 2 je zde zpětně doveden SOC. Výstupy 1 i 2 jsou proudy, jeden z nich je pro vybíjení a druhý z nich je pro nabíjení.



Obrázek 4.12 Subsystém kontroly proudu a limitace SOC

4.2.3 Výpočet SOC

Výpočet SOC je nejdůležitějším prvkem celého modelu, jelikož SOC je nosnou a nezbytnou informací pro následné určení všech ostatních parametrů modelu. Na obrázku 4.13 můžeme vidět praktickou realizaci výpočtu SOC. Na základě rozdělení v kapitole 3 můžeme říct, že dvě nejzákladnější skupiny identifikování parametrů jsou online a offline identifikace. V tomto případě výpočtu je SOC jediný parametr, který je určen čistě online metodou a všechny ostatní parametry jsou určeny offline metodou.



Obrázek 4.13 Blokové schéma výpočtu SOC

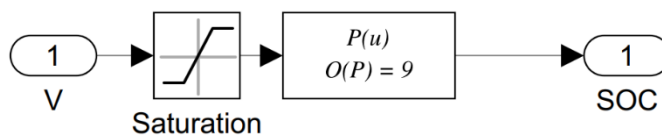
V tomto subsystému je jednoduše aplikován výpočet SOC, založený na určeném počátečním stavu SOC a následné integraci energie dodané nebo odebrané z baterie. Tento způsob výpočtu SOC se označuje jako Coulombova počítací metoda. Celkový vzorec popisující výše popsany proces, a také vzorec, který je blokovým schématem popsán na obrázku 4.13, je

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q \cdot 3600} \cdot \int_{t_0}^t i_{batt}(\tau) d\tau. \quad (4.1)$$

Na první pohled je z rovnice patrné, že vstupem do bloku *Function* je Q neboli kapacita baterie. Tato kapacita však podléhá různým vlivům, viz kapitola 2.1, a tyto vlivy je nutné zohlednit. Mimo jiné je jedním z hlavních vlivů stárnutí baterie. Tento vliv je zde proveden pomocí znalosti množství cyklů, které má článek za sebou a pomocí tzv. „*life expectancy*“, kterou bychom měli dostat od výrobce dané baterie. Takto vypočítaný SOC je vstupní informací pro výpočty všech dalších komponentů, jako je OCV, hodnoty odporu R_1 , R_0 a hodnota kondenzátoru C_1 . Ze skriptu, který bylo možné vidět výše, jsou spočítané hodnoty odporů a kondenzátorů v baterii. Tyto hodnoty jsou následně proloženy nejvhodnější křivkou, viz kapitola 3.4, která je funkcí SOC. Pomocí SOC tedy můžeme v Simulinku propojit všechny výpočty hodnot odporů a kondenzátorů mezi sebou. Toto propojení je možné vidět na celkovém schématu modelu na obrázku 4.9.

Ze schématu je možné vidět, že původní hodnota SOC není konstantní. Toto vychází z funkcionality modelu, který hodnotu SOC určuje z naměřeného napětí na baterii. Určení SOC z naměřeného napětí probíhá pomocí křivky, která je zde reprezentovaná blokem polynomu, který je vidět na obrázku 4.14. Tento polynom byl získán nejvhodnějším

proložením závislosti mezi vstupním naměřeným napětím a SOC. V tomto případě se jednalo o polynom 9. stupně. Možnými variantami proložení se zabývá kapitola 3.4.

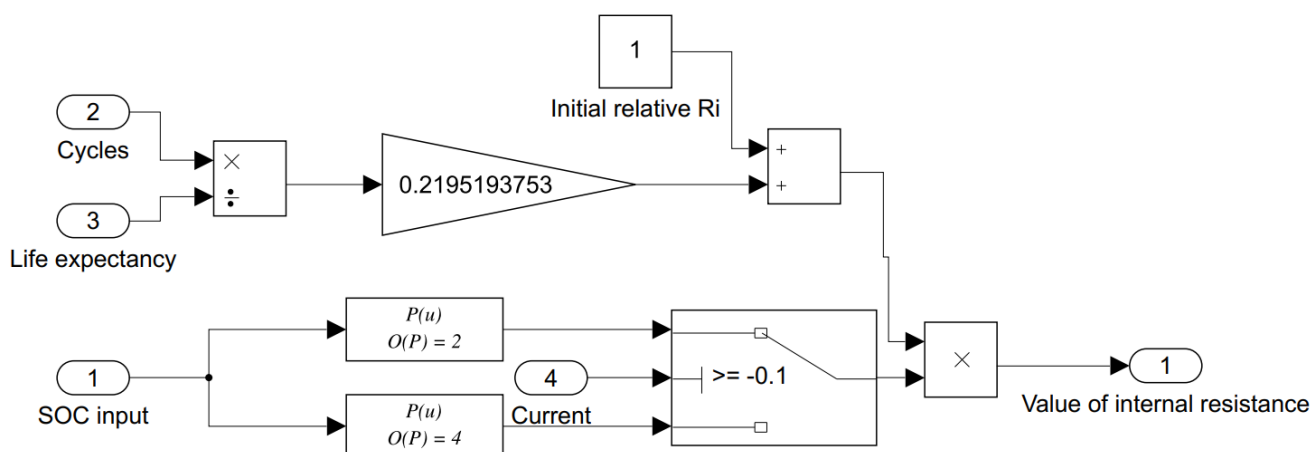


Obrázek 4.14 Schéma subsystému pro určení původního SOC

Je nutné zde zmínit, že stárnutí není jediným vlivem ovlivňující kapacitu a zároveň stárnutí není konstantní pro všechny teploty. Teplotní závislost je vliv, který značně urychluje degradaci a snižování kapacity baterie a tento vliv je dobře popsán ve velkém množství odborných publikací, jako například článek od Feng Leng a kolektivu [39] či další články od jiných autorů, viz [34]. Bohužel vstupní data neobsahovala dostatečné množství informací a dat k tvorbě závislosti na teplotě a z toho důvodu není uvažována teplotní závislost.

4.2.4 Výpočet vnitřního odporu R_i

Na obrázku 4.15 je možné vidět postup výpočtu velikosti vnitřního odporu. Vstupem 1 zde vstupuje informace o SOC, která je v rozmezí 0 až 1, a tato informace následně vstupuje do bloku, který obsahuje polynom pro výpočet vnitřního odporu. Tento polynom byl získán proložení vypočítaných parametrů, viz obrázek 4.1 a 4.2 v rámci skriptu. Je zde vidět, že polynom se liší pro nabíjecí a vybíjecí část. Pro rozlišení, zda se jedná o nabíjení nebo vybíjení je zde vstupem 4 přiveden proud a podle polaroty proudu je rozhodnuto o použitém polynomu. Mimo toto určení hodnoty vnitřního odporu z polynomu je zde druhá část, která se věnuje vlivům, které ovlivňují velikost vnitřního odporu.



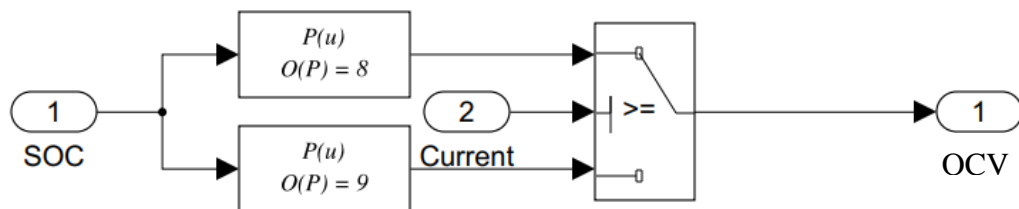
Obrázek 4.15 Schéma výpočtového bloku pro vnitřní odpor

Dalším z vlivů, které zde byly zmíněny je stárnutí baterie. Stárnutí je jedním z nejvýznamnějších okolností, které mají vliv na vnitřní parametry baterie, speciálně na vnitřní odpor. Z toho důvodu je nutné i tento vliv započíst do určení velikosti vnitřního odporu. Jak je možné vidět, hlavním parametrem, který zde dělá rozdíl ve velikosti vnitřního odporu s přibývajícímími cykly, je blok *Gain*, který v sobě obsahuje konstantu. Tato konstanta byla získána z naměřených hodnot, kdy byl zkoumán nárůst vnitřního odporu s přibývajícímími cykly. Nárůst byl značně lineární a z toho důvodu bylo možné použít tuto konstantu, která vychází z nárůstu při poklesu kapacity o 30 %.

Samozřejmě i u vnitřního odporu je značná závislost na teplotě, která však už byla popsána celkově v kapitole 2.1. Tak jako u výpočtu SOC i zde není možné přidat teplotu z důvodu absence relevantních dat. Celé určení velikosti vnitřního odporu společně s dalšími prvky obvodu se už řadí mezi offline identifikaci parametrů, jelikož je závislé na dříve naměřených datech a není tedy univerzálně použitelné na všechny typy baterií a musí být tedy vhodně zváženo, zda se tento model hodí.

4.2.5 Výpočet R_1 , C_1 a OCV

Dalším z použitých subsystémů je výpočet odporu, kapacity a napětí naprázdno. Všechny tyto tři zmíněné prvky jsou zástupci offline identifikace parametrů, jelikož vychází z naměřených dat a nejsou tedy schopny predikovat, jaké budou jejich hodnoty pro kompletně odlišné baterie. Můžeme všechny tři tyto určení zkombinovat pod jeden příklad, jelikož jejich určení v rámci modelu probíhá analogicky.

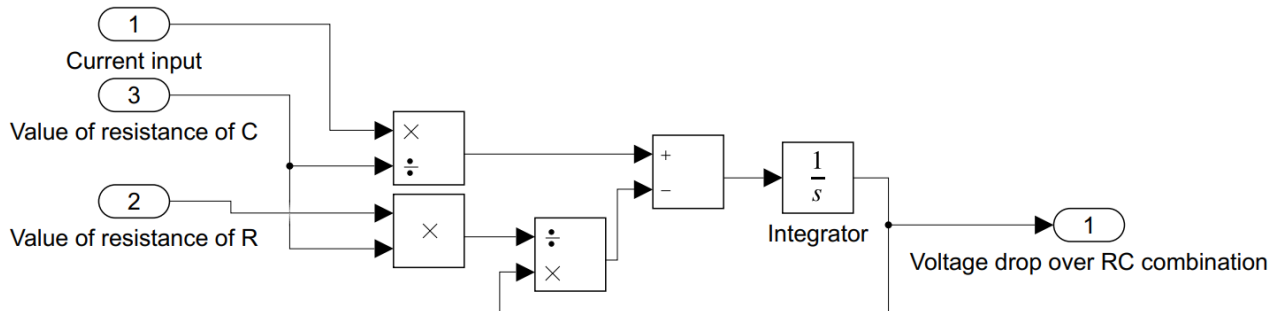


Obrázek 4.16 Schéma výpočtového bloku pro výpočet OCV

Pro příklad je zde uvedeno určení napětí naprázdno. Vstupem 1 zde vstupuje SOC, který na základě orientace proudu, který vstupuje vstupem 2, je pomocí polynomu přepočítán na napětí naprázdno. Tento polynom byl získán proložení parametrů určených v rámci skriptu a jeho hodnoty je možné vidět na obrázku 4.1 a 4.2. Díky tomu, že rozlišujeme průběh pro nabíjení a vybíjení, tak můžeme říct, že je zde pokryt nejen přepočet SOC na OCV, ale i hystereze napětí mezi nabíjením a vybíjením. Stejným způsobem probíhá i určení R_1 a C_1 včetně zmíněné hystereze.

4.2.6 Výpočet paralelní kombinace RC

Dalším subsystémem, který se podílí na celkovém výsledku modelu je výpočet paralelní kombinace odporu R_1 a kondenzátoru C_1 . Tento subsystém je velmi jednoduchý, jedná se klasický výpočet paralelní kombinace dvou prvků. Celý tento blok můžete vidět na obrázku níže.



Obrázek 4.17 Schéma výpočtového bloku pro paralelní kombinaci

Očíslovanými vstupy 1,2 a 3 zde vstupují vypočtené hodnoty odporu a kondenzátoru, společně s proudem a výstupem celého subsystému je úbytek na této paralelní kombinaci. Pokud bychom chtěli tento subsystém popsat rovnicí, mohli bychom použít rovnici

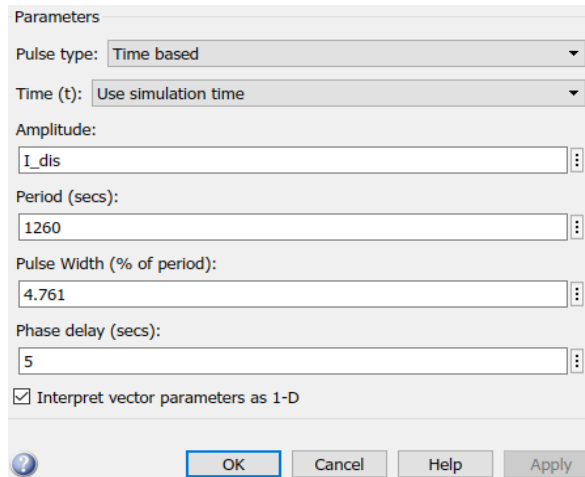
$$u_{RC}(t) = \int \frac{i(t)}{C_1} - \frac{u_{RC}(t)}{R_1 \cdot C_1} dt . \quad (4.2)$$

4.3 Srovnání výsledků

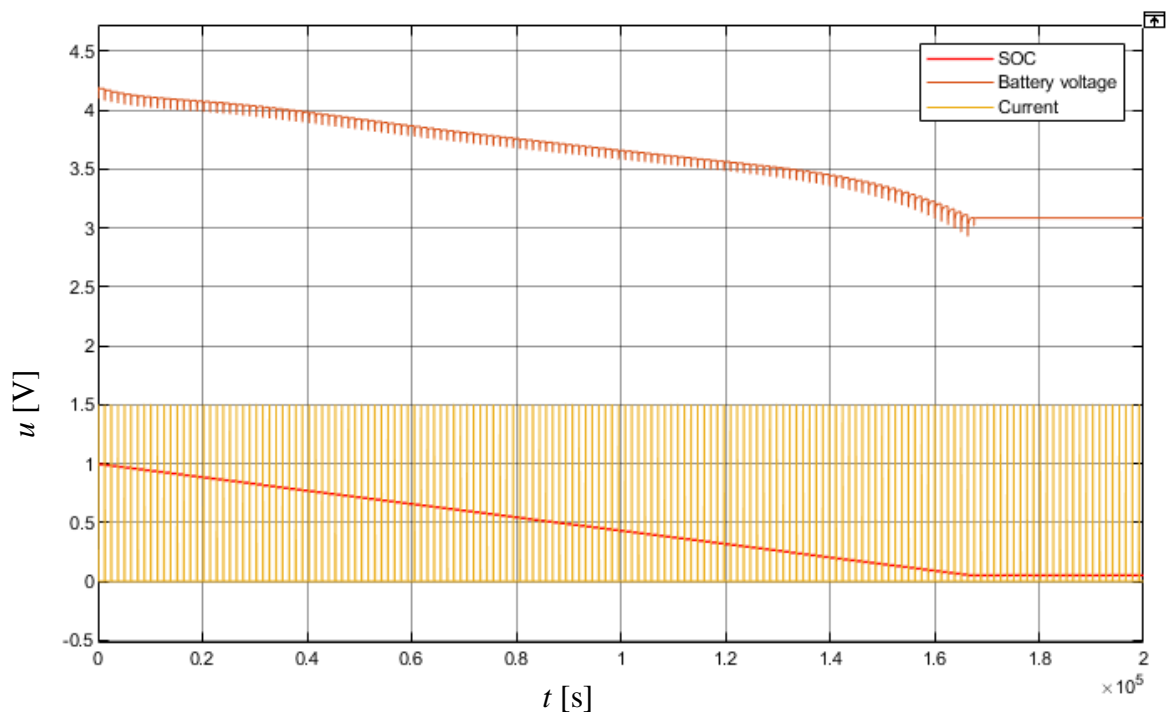
Tato část je věnována prezentování výsledků modelu, a to jak pro nabíjení, tak pro vybíjení. Oba průběhy jsou taktěž srovnány s daty naměřenými na reálné baterii pro zhodnocení použitelnosti a přesnosti modelu. Data jsou srovnána i pro různé podmínky jako je stárnutí baterie, různé proudy atd.

4.3.1 Za referenčních podmínek

Jelikož parametry baterie byly identifikovány pro reálnou baterii od firmy Panasonic, tak můžeme nejprve srovnat výsledky simulací vůči této baterii a srovnat jejich přesnost. Nejprve vidíme na obrázku 4.19 celkový pohled na výsledek simulace vybíjení. Toto vybíjení probíhalo při uvažování konstantních okolních podmínek, to znamená teplota okolí baterie dosahovala 25 °C a baterie byla vybíjená pulsním proudem, jehož amplituda dosahovala 1,5 A. Nastavení pulsního generátoru vybíjení můžete vidět na obrázku 4.18. Zároveň zde je uvažováno, že baterie je nová, tudíž nedošlo k žádnému poklesu kapacity a ani k nárůstu vnitřního odporu vlivem stárnutí. Tyto parametry byly zvoleny pro co nejněvhodnější reprezentaci měřených dat.



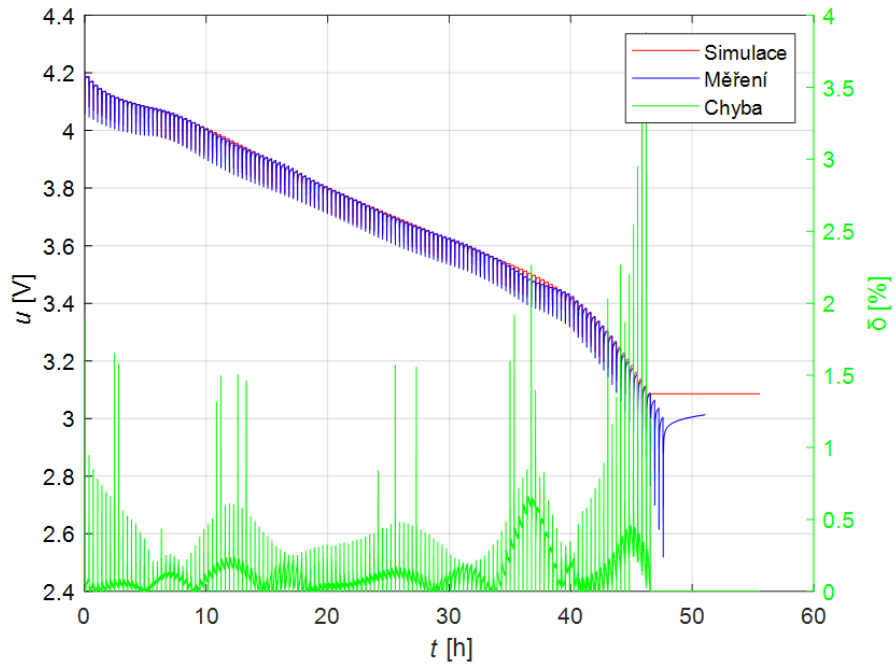
Obrázek 4.18 Nastavení vybíjecího pulsního generátoru



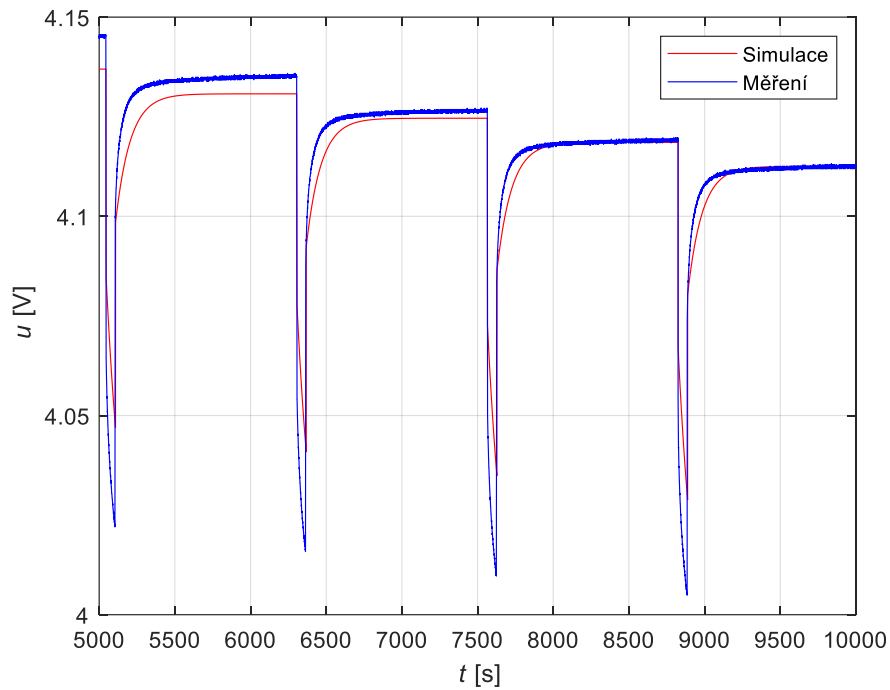
Obrázek 4.19 Průběh SOC a napětí při vybíjení baterie

Samotný průběh výsledného vybíjení je vidět na následujícím grafu. Pokud bychom srovnali průběh s původním měřeným průběhem a sledovali taktéž chybu (viz obrázek 4.20), tak bychom viděli, že jsme dosáhli maximální hodnoty relativní chyby 3,88 % a průměrné relativní chyby 0,12 %. Tyto výsledky můžeme považovat za obstojné a tento model by pro simulování vybíjení bylo možné použít. Největší chybu pozorujeme při nízkém SOC, a to především díky možným nepřesnostem v identifikaci jednotlivých parametrů. V ostatních částech průběhu vybíjení je přesnost vyšší, především pro stavy mezi 20 % až 80 % SOC je přesnost velmi vysoká a dala by se srovnávat i s modely

založenými na principu strojového učení.

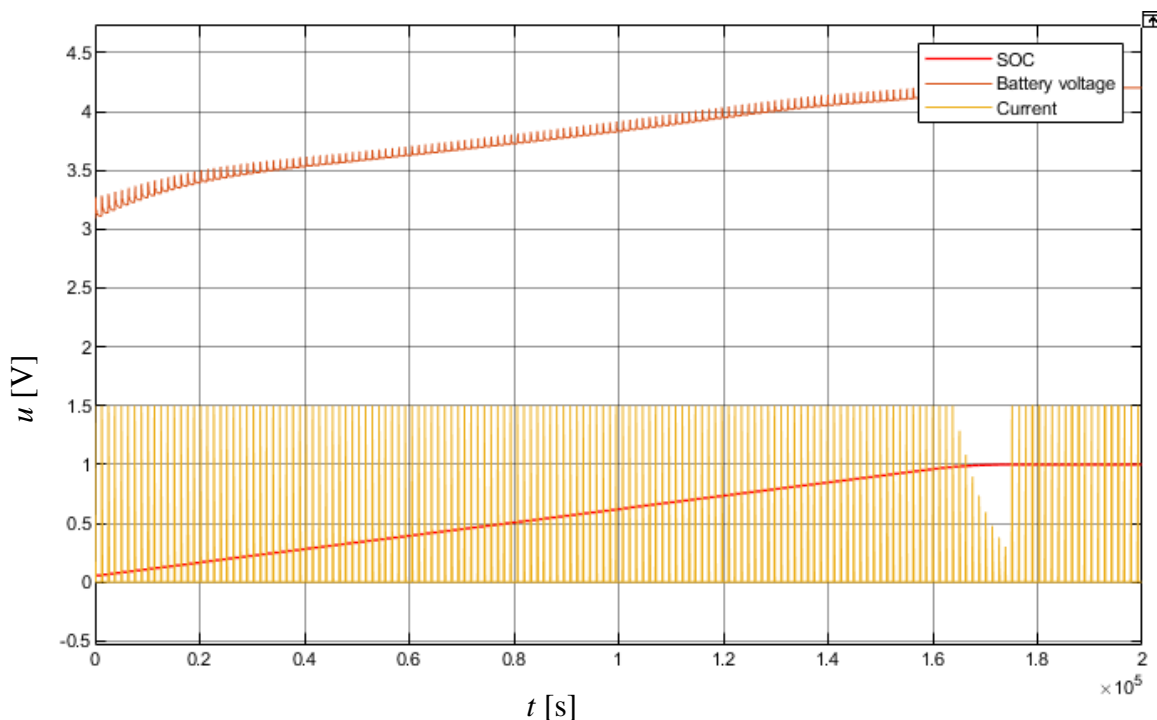


Obrázek 4.20 Srovnání simulovaného pulsního vybíjení s reálným průběhem baterie



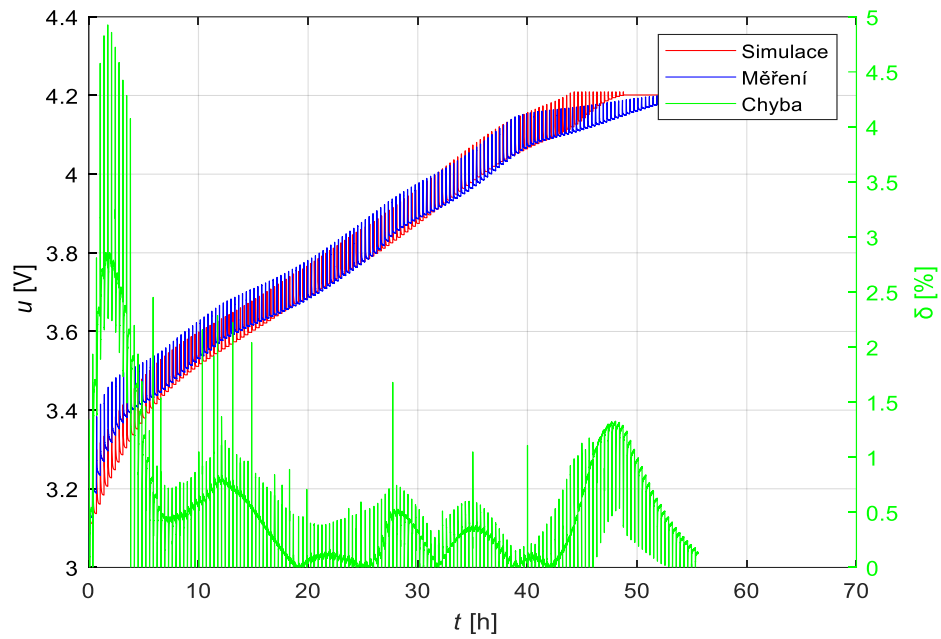
Obrázek 4.21 Detail srovnání simulovaného pulsního vybíjení s reálným průběhem baterie

Simulace nabíjení probíhala za teoretických stejných podmínek jako vybíjení, stejně tak byl pulsní generátor nastaven stejným způsobem jako v případě vybíjení. Průběh nabíjení můžeme vidět na obrázku 4.22. I zde byla baterie uvažována jako nová, tudíž nedošlo k poklesu kapacity vlivem stárnutí.

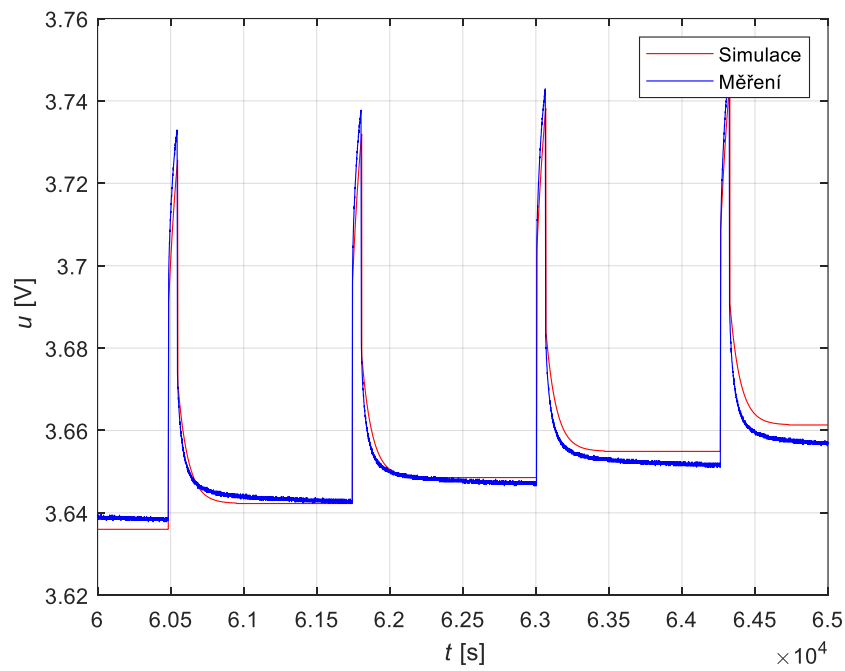


Obrázek 4.22 Průběh SOC a napětí při nabíjení baterie

Je zde mimo jiné vidět správná funkčnost PI regulátoru, který funguje podle teoretického předpokladu ohledně nabíjení baterie, viz kapitola 4.2.1. Pokud srovnáme výsledek simulace s naměřeným průběhem na baterii a budeme chtít znát chybu, zjistíme, že v případě nabíjení chyba dosahuje vyšších hodnot než v případě vybíjení. V tomto případě maximální relativní chyba dosahuje téměř 5 % a průměrná relativní chyba dosahuje 0,55 %. Tak jako v předchozím případě, největší chyba je v případě krajních pozic SOC, zejména při nízkých hodnotách SOC. Pokud se však podíváme na více střední hodnoty SOC, tak můžeme konstatovat, že v případě, že je SOC větší jak 10 %, tak chyba dosahuje v maximálních hodnotách méně jako 1 %.



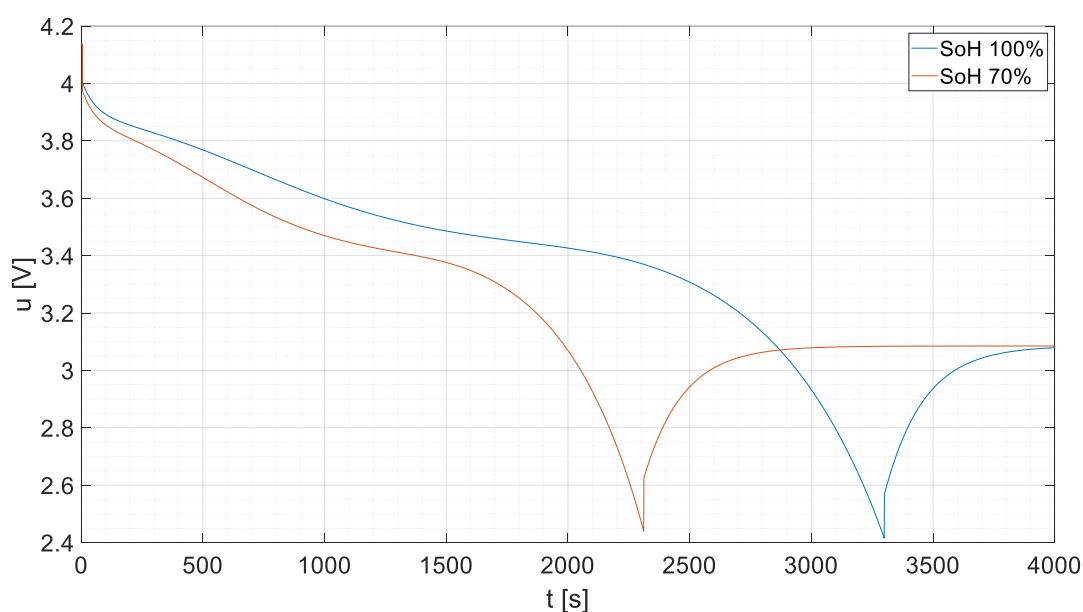
Obrázek 4.23 Srovnání simulovaného pulsního vybíjení s reálným průběhem baterie



Obrázek 4.24 Detail srovnání simulovaného pulsního vybíjení s reálným průběhem baterie

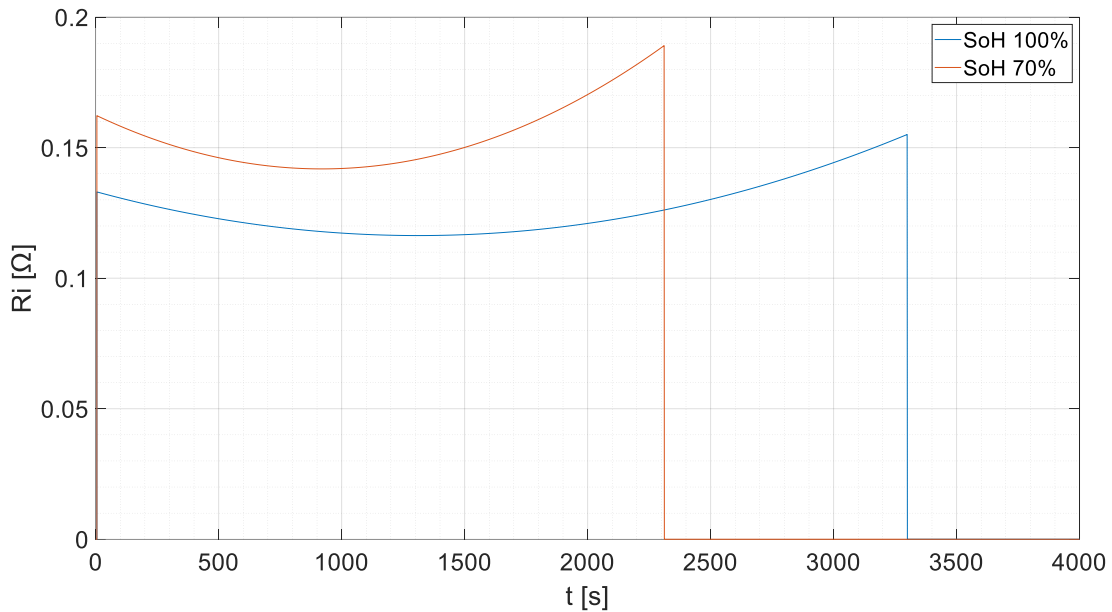
4.3.2 Srovnání výsledků při poklesu kapacity o 30 %

Životnost Li-Ion baterií je obecně určována počtem cyklů, které baterie vydrží, než poklesne její kapacita o více jak 30 %. Tady tomuto jevu se věnuje kapitola 2.1. Navržený model je schopen simulovat stavy, při kterých kapacita klesá vlivem stárnutí a na následujícím grafu je možné sledovat celkový průběh napětí v případě, že baterie je na hraně životnosti, tudíž její kapacita C dosahuje 70 % původní hodnoty. Mimo pokles kapacity vlivem stárnutí dochází taktéž k nárůstu vnitřního odporu z důvodu usazování lithia na elektrodách a vznikající pasivní vrstvě. Na obrázcích 4.25 a 4.26 je možné vidět, jak se stárnutí baterie projevuje na pokles výstupního napětí baterie a na vzrůstající hodnot vnitřního odporu.



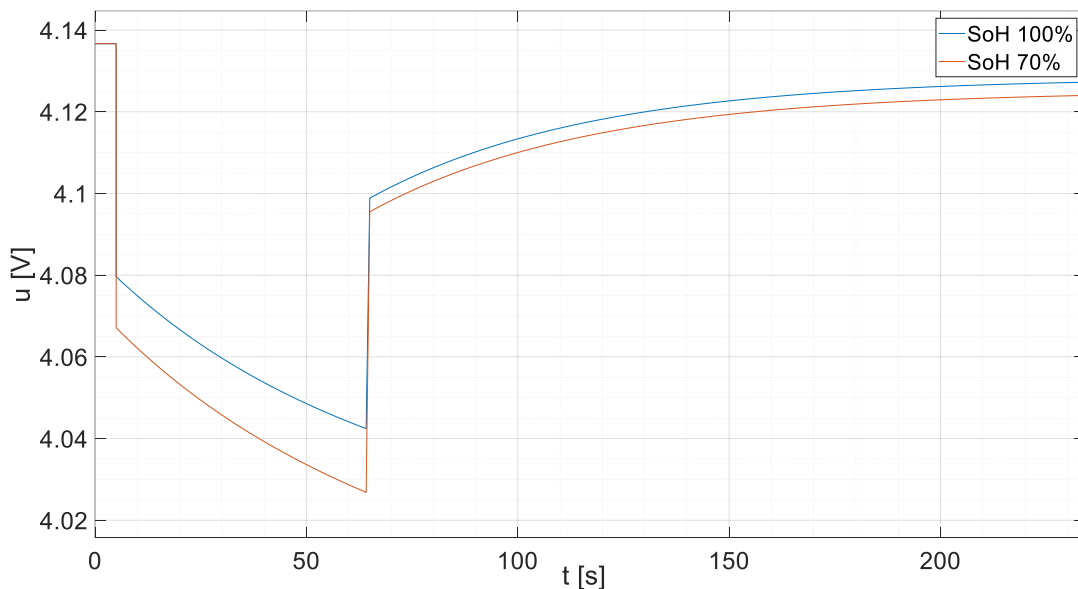
Obrázek 4.25 Průběh napětí na baterii při poklesu kapacity o 30 %

Z obrázku 4.25 je okamžitě možné vidět, že vlivem stárnutí dochází ke zkrácení doby, po kterou je baterie schopná dodávat napětí do zátěže. Zároveň můžeme z grafu určit, že vlivem stárnutí klesá i napětí, kterého je baterie schopna dosáhnout na výstupu. Samotný nárůst odporu je možné vidět na dalším obrázku 4.26. Nárůst vnitřního odporu je jedním z hlavních důvodů poklesu maximálního napětí, kterého je baterie schopna.



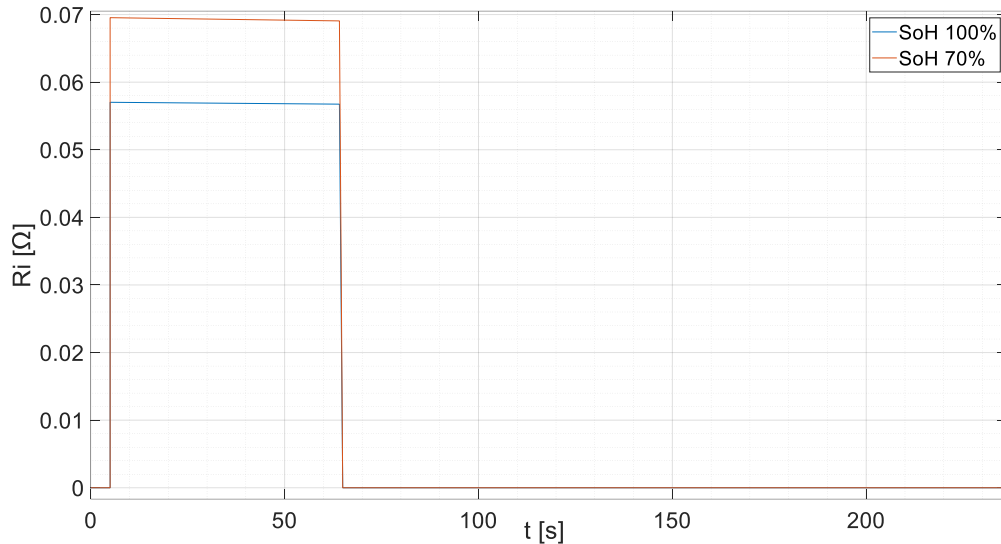
Obrázek 4.26 Průběh nárůstu vnitřního odporu baterie při poklesu kapacity o 30 %

Tady tento trend narůstajícího vnitřního odporu je ještě více patrný v případě pulsního vybíjení, kdy je už při prvním vybíjecím impulsu okamžitě vidět nárůst odporu a tím urychlení vybíjecího procesu. Mimo urychlení vybíjecího procesu je nutné zmínit taktěž generované teplo, které s nárůstem vnitřního odporu roste. Na obrázku je možné tedy vidět detail na první vybíjecí impuls v případě, že kapacita klesne na 70 %.



Obrázek 4.27 Pohled na odezvu na vybíjecí impuls při poklesu kapacity o 30 %

V rámci vybíjecího impulsu je možné se podívat i velikost vnitřního odporu při tomto detailu na vybíjecí impuls. Z obrázku 4.27 je taktéž možné vidět, že vlivem zvětšeného vnitřního odporu a snížené kapacity se už po prvním vybíjecím impulsu napětí ustaluje na nižší hodnotě, než v případě nové baterie.



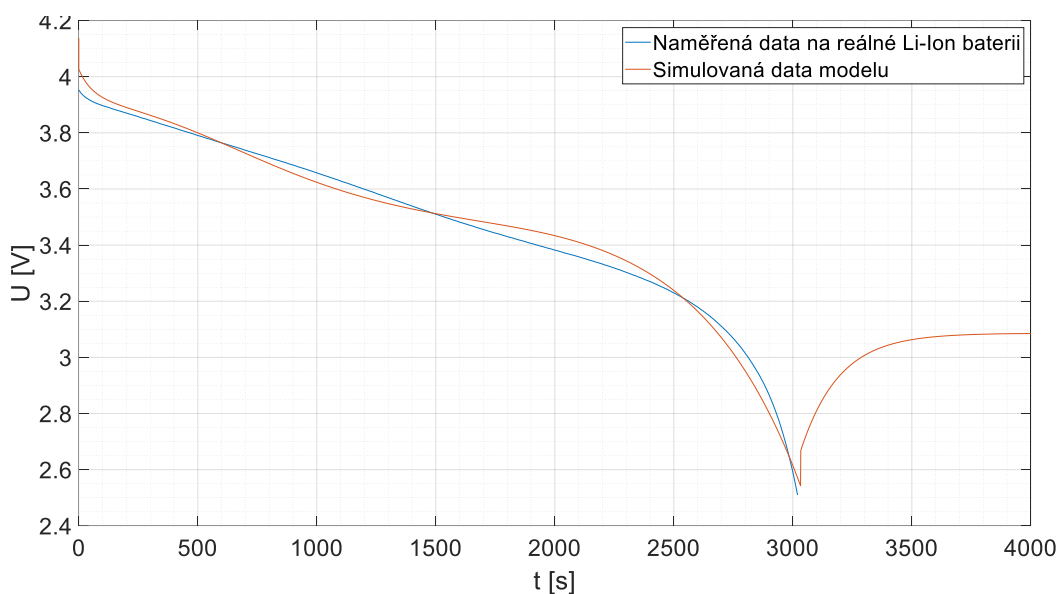
Obrázek 4.28 Pohled na velikost vnitřního odporu pro vybíjecí impuls při poklesu kapacity o 30 %

Detail, který je taktéž důležité zmínit a který je patrný z obrázku 4.28 je mírný pokles hodnoty vnitřního odporu s narůstajícím časem v rámci vybíjecího impulsu. Toto můžeme přisoudit zrychlení procesu interkalování a tím efektivnější výměně elektronů, což má za důsledek počáteční snížení odporu.

4.3.3 Srovnání s naměřenými daty pro neznámou baterii

Srovnání, provedené v předchozích kapitolách je však značně zkreslené, a to z důvodu, že model vycházel přímo z dat, se kterými následně srovnáváme. Pokud bychom tedy provedli srovnání s naměřenými daty jiné baterie, tak zde můžeme nejlépe vidět přesnost modelu a jeho použitelnost. Pro toto srovnání byla využita data naměřená autorem Dr. Kollmeyerem z Univerzity v Madisonu ve státě Wisconsin, viz [53]. Jeho data set obsahuje data naměřená pro baterii Li-Ion 18650PF od výrobce Panasonic.

Na obrázku 4.29 můžeme vidět srovnání mezi výstupem vytvořeného modelu a mezi naměřenými daty. Je možné vidět, že model věrohodně kopíruje naměřený průběh a dosahuje zde solidní přesnosti, co se týče použití. Avšak je nutné také zmínit, že i toto srovnání ukazuje nepřesnosti mezi modelem a reálným průběhem, například v odlišné počáteční hodnotě napětí. Celkově by však bylo možné použít navržený model pro simulaci zmíněné baterie Li-Ion.



Obrázek 4.29 Srovnání simulované baterie s naměřeným průběhem na neznámé Li-Ion baterii

Pokud tedy tento navržený model popíšeme a zhodnotíme, tak se jedná o model Li-Ion baterie založený na Theveninově modelu s jednou paralelní RC kombinací. Jednotlivé parametry tohoto modelu jsou určeny pomocí kombinované offline a online metody. Co se týče flexibility modelu, tak tento model je schopen predikovat výstupní napětí baterie pro různé proudy a pro různé stáří baterie. Model je zároveň schopen na základě naměřeného proudu a napětí určit SOC baterie společně s hodnotou vnitřního odporu. Jednou z nevýhod tohoto řešení je nemožnost změny okolní teploty, avšak tak jak bylo zmíněno v samotné práci, data, která by byla nutná pro realizaci této závislosti, nebyla k dispozici, a proto tato závislost nebyla uvažována. Pokud tedy zhodnotíme celkově navržený model, tak model můžeme označit jako přesný a použitelný, což ukázaly simulace v této kapitole. Avšak i tento model by mohl být zpřesněn a upraven pro jeho větší flexibilitu. Jedno z možných řešení by bylo použití některého z filtrů, například Kálmánův, či využití strojového učení. Tyto metody by byly schopné ještě lepší predikce, avšak i tak můžeme model považovat za přesný a prakticky použitelný.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá seznámením s principem Li-ion článku, literární rešerší na téma matematický model Li-ion článku a následnou tvorbou vybraného matematického modelu.

V první části se tato práce zabývá principem funkce Li-ion článku, jeho konstrukcí, materiálem elektrod a taktéž základním popisem elektrochemických dějů odehrávajících se v Li-ion článku. Je zde taktéž zmíněno základní dělení baterií na primární články, sekundární články, palivové články a rezervní články.

V navazující části je krátce shrnuta historie baterií, především sekundárních Li-ion článků. Mimo to jsou zde nastíněny výhody a nevýhody tohoto typu baterie a jsou dány do kontextu s jinými typy a s jejich pro a proti.

Následně se práce přesunula k matematickým modelům, a to především k jednotlivým komponentům matematického modelu, které mohou či nemusí být součástí modelu. Jsou zde taktéž zmíněny různé další přístupy k modelování a možné varianty, jako například strojové učení, empirické modelování či elektrochemické modelování. V této části práce jsou také popsány jednotlivé matematické modely a je vybrán i ten, ze kterého je vycházeno v případě tvorby samotného modelu. Tímto modelem je Theveninův model s jednou paralelní RC větví.

Následující část této práce se zaměřuje na metody identifikace parametrů, a to především na online identifikaci parametrů, v rámci čehož jsou představeny různé varianty filtrů, namátkově Kálmánův filtr, Luenbergerův pozorovatel či možnosti predikce pomocí strojového učení.

V další části je popsána identifikace parametrů na základě měřených průběhů napětí a proudu. Identifikace parametrů je zaměřená především na praktickou identifikaci u vybraného modelu, avšak věnuje se taktéž i Theveninově modelu s dvěma paralelními větvemi. Vybraný model je následně pomocí výše zmíněného procesu podroben identifikaci parametrů v programu Matlab.

V předposlední části je popsána tvorba modelu, který je vytvořen na základě identifikovaných parametrů. Samotná identifikace byla zvolena jako kombinace online a offline metody. V této části je možné také vidět popsané jednotlivé průběhy modelu, včetně rovnic, na základě kterých jsou tyto části vytvořeny.

Poslední část se zabývá srovnáním zrealizovaného modelu s reálnými průběhy. Výsledkem této diplomové práce je tedy model, jenž je založen na Theveninově modelu, a který je schopen predikovat průběh vybíjení a nabíjení pro různé podmínky, a to včetně možného stárnutí baterie. Co se týče přesnosti, tak v případě vybíjení je model schopen dosáhnout průběhu výstupního napětí na baterii s průměrnou relativní chybou 0,12 %. Pokud se jedná o nabíjecí průběh, tak zde je model schopný predikovat s průměrnou relativní chybou 0,55 %.

LITERATURA

- [1] LINDEN, David, REDDY, Thomas B., ed. *Linden's handbook of batteries* [online]. The McGraw-Hill Companies, 2011 [cit. 2020-10-28]. 4th edition. ISBN 9780071624213.
- [2] PLETT, Gregory L. *Battery Modeling* [online]. London: ARTECH HOUSE, 2015 [cit. 2020-10-29]. ISBN 9781630810238.
- [3] SAPRU, Vishal. The World of Alkaline Batteries. *Battery Power* [online]. Cambridge [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <https://bit.ly/3835swh>
- [4] OMAR, N., Y. FIROUZ, M.A. MONEM, A. SAMBA, H. GUALOUS, T. COOSEMANS, P. VAN DEN BOSSCHE a J. VAN MIERLO. Analysis of Nickel-Based Battery Technologies for Hybrid and Electric Vehicles. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* [online]. Elsevier, 2014, 2014 [cit. 2020-11-02]. ISBN 9780124095472. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409547-2.10740-1
- [5] ABDUL-ZEHRA, Hassan. *Fuel cells and batteries: Reserve batteries* [online]. In: . Babylon: University of Babylon, s. 1-6 [cit. 2020-10-05]. Dostupné z: http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/paper_4_22223_736.pdf
- [6] Fuel cells. *Department of energy* [online]. Washington [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- [7] REDDY, Mogalahalli V., Alain MAUGER, Christian M. JULIEN, Andrea PAOLELLA a Karim ZAGHIB. Brief History of Early Lithium-Battery Development. *Materials* [online]. 2020, **13**(8) [cit. 2020-11-10]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13081884
- [8] LI, Matthew, Jun LU, Zhongwei CHEN a Khalil AMINE. 30 Years of Lithium-Ion Batteries. *Advanced Materials* [online]. 2018, **30**(33) [cit. 2020-11-10]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201800561
- [9] Abeceda baterií a akumulátorů: Li - akumulátory. *Battex: Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. Slaný, 2018 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory>

- [10] TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory. *TZBinfo: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov* [online]. 2019-07-15 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [11] ASENBAUER, Jakob, Tobias EISENMANN, Matthias KUENZEL, Arefeh KAZZAZI, Zhen CHEN a Dominic BRESSER. *The success story of graphite as a lithium-ion anode material – fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites* [online]. 2020, **4**(11), 5387-5416 [cit. 2020-11-15]. ISSN 2398-4902. Dostupné z: doi:10.1039/D0SE00175A
- [12] OHZUKU, Tsutomu a Ralph J. BRODD. An overview of positive-electrode materials for advanced lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* [online]. 2007, **174**(2), 449-456 [cit. 2020-11-15]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2007.06.154
- [13] Structure and reaction formula of batteries. In: *Battery association of Japan* [online]. 2010 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <http://www.baj.or.jp/e/knowledge/structure.html>
- [14] MENG, Jinhao, Guangzhao LUO, Mattia RICCO, Maciej SWIERCZYNSKI, Daniel-Ioan STROE a Remus TEODORESCU. Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles. *Applied Sciences* [online]. 2018, **8**(5) [cit. 2020-11-20]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8050659
- [15] CIPIN, Radoslav, Marek TOMAN, Petr PROCHAZKA a Ivo PAZDERA. *Identification of Li-ion Battery Model Parameters* [online]. IEEE, 2019, 2019, , 225-229 [cit. 2020-11-20]. ISBN 978-1-7281-0389-1. Dostupné z: doi:10.1109/EDPE.2019.8883926
- [16] CHANG, Wen-Yeau. The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. *ISRN Applied Mathematics* [online]. 2013, **2013**, 1-7 [cit. 2020-12-01]. ISSN 2090-5572. Dostupné z: doi:10.1155/2013/953792
- [17] HE, Hongwen, Rui XIONG a Jinxin FAN. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies* [online]. 2011, **4**(4), 582-598 [cit. 2020-12-01]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en4040582

- [18] MADANI, Seyed, Erik SCHALTZ a Søren KNUDSEN KÆR. An Electrical Equivalent Circuit Model of a Lithium Titanate Oxide Battery. *Batteries* [online]. 2019, **5**(1) [cit. 2020-12-03]. ISSN 2313-0105. Dostupné z: doi:10.3390/batteries5010031
- [19] PLAKHTII, O., V. NERUBATSKYI, M. PHILIPJEVA a A. MASHURA. Research of mathematical models of Lithium-ion storages. *Mathematical modeling* [online]. 2019, **3**(4) [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://stumejournals.com/journals/mm/2019/4/127.full.pdf>
- [20] LIU, Xiangyong, Wanli LI a Aiguo ZHOU. PNGV Equivalent Circuit Model and SOC Estimation Algorithm for Lithium Battery Pack Adopted in AGV Vehicle. *IEEE Access* [online]. 2018, **6**, 23639-23647 [cit. 2020-12-03]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2018.2812421
- [21] JIN, Feng, He YONGLING a Wang GUOFU. Comparison Study of Equivalent Circuit Model of Li-Ion Battery for Electrical Vehicles. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* [online]. 2013, **6**(20), 3756-3759 [cit. 2020-12-03]. ISSN 20407459. Dostupné z: doi:10.19026/rjaset.6.3587
- [22] PEI, Zhaodi, Xiaoxu ZHAO, Huimei YUAN, Zhen PENG a Lifeng WU. An Equivalent Circuit Model for Lithium Battery of Electric Vehicle considering Self-Healing Characteristic. *Journal of Control Science and Engineering* [online]. 2018, **2018**, 1-11 [cit. 2020-12-03]. ISSN 1687-5249. Dostupné z: doi:10.1155/2018/5179758
- [23] PLETT, Gregory L. *Battery management systems: Equivalent-circuit methods* [online]. 2. Boston: Artech House, [2016] [cit. 2020-12-03]. ISBN 9781630810238.
- [24] RAHMOUN, Ahmad a Helmuth BIECHL. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd Elektrotechniczny* [online]. 2012, **88**(7), 152-156 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279767931_Modelling_of_Li-ion_batteries_using_equivalent_circuit_diagrams
- [25] Li-ion Battery and Gauge Introduction. In: *RICHTEK* [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN024>

- [26] KIM, Do-Hyun, In-Yeob NA, Duck Hyun LEE a Gyu Tae KIM. Foldable water-activated reserve battery with diverse voltages. *RSC Advances* [online]. 2020, **10**(1), 402-410 [cit. 2021-04-14]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C9RA09401F
- [27] BARCELONA, Simone a Luigi PIEGARI. Lithium Ion Battery Models and Parameter Identification Techniques. *Energies* [online]. 2017, **10**(12) [cit. 2021-04-14]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en10122007
- [28] LI, J., K. ADEWUYI, N. LOTFI, R.G. LANDERS a J. PARK. A single particle model with chemical/mechanical degradation physics for lithium ion battery State of Health (SOH) estimation. *Applied Energy* [online]. 2018, **212**, 1178-1190 [cit. 2021-04-18]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.01.011
- [29] JUN XU, Chunting Chris MI, BINGGANG CAO, JUNJUN DENG, ZHENG CHEN a SIQI LI. The State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Based on a Proportional-Integral Observer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. 2014, **63**(4), 1614-1621 [cit. 2021-04-19]. ISSN 0018-9545. Dostupné z: doi:10.1109/TVT.2013.2287375
- [30] BRANDO, Gianluca, Adolfo DANNIER, Ivan SPINA a Luigi PIEGARI. Comparison of accuracy of different LiFePO₄ battery circuital models. *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion* [online]. IEEE, 2014, 2014, , 1092-1097 [cit. 2021-04-19]. ISBN 978-1-4799-4749-2. Dostupné z: doi:10.1109/SPEEDAM.2014.6872021
- [31] MURASHKO, K.A., A.V. MITYAKOV, J. PYRHÖNEN, V.Y. MITYAKOV a S.S. SAPOZHNIKOV. Thermal parameters determination of battery cells by local heat flux measurements. *Journal of Power Sources* [online]. 2014, **271**, 48-54 [cit. 2021-04-19]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2014.07.117
- [32] LAI, Yanqing, Shuanglong DU, Liang AI, Lihua AI, Yun CHENG, Yiwei TANG a Ming JIA. Insight into heat generation of lithium ion batteries based on the electrochemical-thermal model at high discharge rates. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2015, **40**(38), 13039-13049 [cit. 2021-4-25]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2015.07.079

- [33] HOSSAIN AHMED, Sazzad, Xiaosong KANG a S. O. BADE SHRESTHA. Effects of Temperature on Internal Resistances of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Energy Resources Technology* [online]. 2015, **137**(3) [cit. 2021-4-25]. ISSN 0195-0738. Dostupné z: doi:10.1115/1.4028698
- [34] ŁEBKOWSKI, Andrzej. Temperature, Overcharge and Short-Circuit Studies of Batteries used in Electric Vehicles. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY* [online]. 2017, **1**(5), 69-75 [cit. 2021-4-25]. ISSN 0033-2097. Dostupné z: doi:10.15199/48.2017.05.13
- [35] BARCELLONA, S. a L. PIEGARI. Effect of current on cycle aging of lithium ion batteries. *Journal of Energy Storage* [online]. 2020, **29** [cit. 2021-4-26]. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2020.101310
- [36] ZHANG, Yaguang, Ning DU a Deren YANG. Designing superior solid electrolyte interfaces on silicon anodes for high-performance lithium-ion batteries. *Nanoscale* [online]. 2019, **11**(41), 19086-19104 [cit. 2021-4-26]. ISSN 2040-3364. Dostupné z: doi:10.1039/C9NR05748J
- [37] JUAREZ-ROBLES, Daniel, Anjul Arun VYAS, Conner FEAR, Judith A. JEEVARAJAN a Partha P. MUKHERJEE. Overcharge and Aging Analytics of Li-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2020, **167**(9) [cit. 2021-4-26]. ISSN 1945-7111. Dostupné z: doi:10.1149/1945-7111/ab9569
- [38] ZHANG, Ruifeng, Bizhong XIA, Baohua LI, et al. A Study on the Open Circuit Voltage and State of Charge Characterization of High Capacity Lithium-Ion Battery Under Different Temperature. *Energies* [online]. 2018, **11**(9) [cit. 2021-4-26]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en11092408
- [39] LENG, Feng, Cher Ming TAN a Michael PECHT. Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. *Scientific Reports* [online]. 2015, **5**(1) [cit. 2021-4-28]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep12967
- [40] KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering* [online]. 1960, **82**(1), 35-45 [cit. 2021-5-10]. ISSN 0021-9223. Dostupné z: doi:10.1115/1.3662552
- [41] SPAGNOL, P., S. ROSSI a S. M. SAVARESI. Kalman Filter SoC estimation for Li-Ion batteries. *2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)* [online]. IEEE, 2011, 2011, , 587-592 [cit. 2021-5-10]. ISBN 978-1-4577-1062-9. Dostupné z: doi:10.1109/CCA.2011.6044480

- [42] CHEN, Zheng, Yuhong FU a Chunting Chris MI. State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles Using Extended Kalman Filtering. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. 2013, **62**(3), 1020-1030 [cit. 2021-5-10]. ISSN 0018-9545. Dostupné z: doi:10.1109/TVT.2012.2235474
- [43] CHAOUI, Hicham, Asmae EL MEJDOUBI a Hamid GUALOUS. Online Parameter Identification of Lithium-Ion Batteries With Surface Temperature Variations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. 2017, **66**(3), 2000-2009 [cit. 2021-5-11]. ISSN 0018-9545. Dostupné z: doi:10.1109/TVT.2016.2583478
- [44] KO, Sung-Tae; AHN, Jung-Hoon; LEE, Byoung Kuk. Enhanced equivalent circuit modeling for li-ion battery using recursive parameter correction. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2018, 13.3: 1147-1155.
- [45] TANIM, Tanvir R., Christopher D. RAHN a Chao-Yang WANG. State of charge estimation of a lithium ion cell based on a temperature dependent and electrolyte enhanced single particle model. *Energy* [online]. 2015, **80**, 731-739 [cit. 2021-5-11]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2014.12.031
- [46] S. R. Habibi, "The Smooth Variable Structure Filter", *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 5, pp. 1026-1059, 2007
- [47] FARAG, M. S., R. AHMED, S. A. GADSDEN, S. R. HABIBI a J. TJONG. A comparative study of Li-ion battery models and nonlinear dual estimation strategies. *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* [online]. IEEE, 2012, 2012, , 1-8 [cit. 2021-5-11]. ISBN 978-1-4673-1408-4. Dostupné z: doi:10.1109/ITEC.2012.6243485
- [48] AVZAYESH, Mohammad, Mamoun ABDEL-HAFEZ, M. ALSHABI a S.A. GADSDEN. The smooth variable structure filter: A comprehensive review. *Digital Signal Processing* [online]. 2021, **110** [cit. 2021-5-11]. ISSN 10512004. Dostupné z: doi:10.1016/j.dsp.2020.102912
- [49] AL-SHABI, M., S.A. GADSDEN a S.R. HABIBI. Kalman filtering strategies utilizing the chattering effects of the smooth variable structure filter. *Signal Processing* [online]. 2013, **93**(2), 420-431 [cit. 2021-5-11]. ISSN 01651684. Dostupné z: doi:10.1016/j.sigpro.2012.07.036

- [50] ZHANG, Ruifeng, Bizhong XIA, Baohua LI, Libo CAO, Yongzhi LAI, Weiwei ZHENG, Huawen WANG a Wei WANG. State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles. *Energies* [online]. 2018, **11**(7) [cit. 2021-5-11]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en11071820
- [51] YANG, Duo, Yujie WANG, Rui PAN, Ruiyang CHEN a Zonghai CHEN. A Neural Network Based State-of-Health Estimation of Lithium-ion Battery in Electric Vehicles. *Energy Procedia* [online]. 2017, **105**, 2059-2064 [cit. 2021-5-11]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.03.583
- [52] HANNAN, M.A., M.S.H. LIPU, A. HUSSAIN a A. MOHAMED. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **78**, 834-854 [cit. 2021-5-11]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.05.001
- [53] KOLLMEYER, Phillip, *Panasonic 18650PF Li-ion Battery Data* [online], Mendeley Data, V1, 2018 [cit. 2021-05-24].
Dostupné z: doi: 10.17632/wykht8y7tg.1

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

SOC	State of charge
SOH	State of health
OCV	Open circuit voltage
PNGV	Partnership for new generation of vehicles
LQE	Linear quadratic estimation
SVSF	Smooth variable structure filter
SVM	Support vector machine
ELM	Extreme machine learning
EIS	Electrochemical impedance spectroscopy
SEI	Solid electrolyte interface
IR	Internal resistance

Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
R	odpor	(Ω)
C	kapacita	(F)
t	čas	(s)
T	termodynamická teplota	(K)
ρ	hustota	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
c	specifické teplo baterie	($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
λ	tepelná vodivost	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
b	Peukertova konstanta	(-)
q	teplo	(J)
E	aktivační energie baterie	(J)
R	plynná konstanta	($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)
η	účinnost	(-)
P	výkon	(W)
$\eta_{x,y}$	prvky Gaussovského šumu	(-)