

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrotechnologie

## Vylepšené zachycení elektrického chování lithium-iontových baterií pomocí kinetického modelu

**Bc. Jan Kasper**

Vedoucí: MSc. Václav Knap, Ph.D.  
Obor: Elektrotechnika, energetika a management  
Květen 2024



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kasper** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **483589**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Technologické systémy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vylepšené zachycení elektrického chování lithium-iontových baterií pomocí kinetického modelu**

Název diplomové práce anglicky:

**Improved modeling of the electrical behavior of lithium-ion batteries using a kinetic model**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište způsoby modelování lithium-iontových baterií.
- 2) Proveďte laboratorní měření lithium-iontových článků pro získání jejich charakteristik.
- 3) Vytvořte model baterie formou náhradního schématu elektrického obvodu.
- 4) Vytvořte kinetický model baterie.
- 5) Ověřte vyvinuté modely a demonstруйте jejich použití.

Seznam doporučené literatury:

T. Kim and W. Qiao, "A Hybrid Battery Model Capable of Capturing Dynamic Circuit Characteristics and Nonlinear Capacity Effects," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 4, pp. 1172-1180, Dec. 2011, doi: 10.1109/TEC.2011.2167014.  
Gilles Nies, et al., Mastering operational limitations of LEO satellites – The GomX-3 approach, Acta Astronautica, Volume 151, 2018, Pages 726-735, ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.04.040>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**MSc. Václav Knap, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

\_\_\_\_\_  
MSc. Václav Knap, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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



## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce za cenné rady, tipy, doporučení a hlavně za trpělivost a ochotu pomoci při psaní této práce. Mé obrovské díky také patří mým přátelům a především rodině za podporu nejen při psaní této práce, ale po celou dobu studia.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. 22. května 2024

Jan Kasper

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vývojem modelu lithium-iontového článku. Možnosti modelování článků baterií jsou v této práci popsány a z nich je vybrán tzv. 2RC model ekvivalentního elektrického obvodu a kinetický model. Dále jsou zmíněny možnosti identifikace parametrů modelu z dat, která byla naměřena pro účely této práce. Po identifikaci a vytvoření modelu je otestována a ověřena jeho funkčnost. Následuje teoretický popis kinetického modelu a jeho parametrizace. Funkčnost kinetického modelu je poté otestována a též ověřena. V poslední části je kinetický model implementován do elektrického modelu pro přesnější výpočet SOC a výsledný hybridní model je ověřen.

**Klíčová slova:** Modelování lithium-iontových článků, kinetický model, elektrický model, hybridní model.

**Vedoucí:** MSc. Václav Knap, Ph.D.

## Abstract

This thesis deals with the development of a lithium-ion cell model. The battery cell modelling options are described in this thesis and from them the so called 2RC equivalent circuit model and kinetic model are selected. Furthermore, the possibilities of identifying the model parameters from the data measured for the purpose of this work are mentioned. Once the model is identified and developed, its functionality is tested and verified. This is followed by a theoretical description of the kinetic model and its parameterization. The functionality of the kinetic model is then tested and also verified. In the last part, the kinetic model is implemented into the electrical model for more accurate SOC calculation and the resulting hybrid model is verified.

**Keywords:** Lithium-ion cell modeling, kinetic model, electric model, hybrid model.

**Title translation:** Improved modeling of the electrical behavior of lithium-ion batteries using a kinetic model

# Obsah

<b>0 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Modelování lithium-iontových článků</b>	<b>3</b>
1.1 Elektrický model	3
1.2 Empirický model	4
1.3 Kinetický model	5
1.4 Elektrochemický model článku	5
1.5 <i>Data driven</i> modely	6
1.6 Tepelné modely	7
<b>2 Elektrický model bateriového článku</b>	<b>9</b>
2.1 Napětí naprázdno	10
2.1.1 Stav nabití	10
2.1.2 Výsledné napětí naprázdno	11
2.2 Sériový odpor	11
2.3 RC člen	11
2.4 Testy pro parametrizaci Li-ion článku	13
2.4.1 Parametrizace napětí naprázdno (OCV)	13
2.4.2 Parametrizace sériového odporu	15
2.4.3 Parametrizace RC členu	16
<b>3 Laboratorní měření</b>	<b>19</b>
3.1 Měřící pracoviště	19
3.2 Oživení článku	20
3.3 Kvazi-OCV test	22
3.3.1 Naměřené hodnoty	23

3.4 Pulzní test .....	24
3.5 Kapacitní test .....	27
3.6 Dynamický vybíjecí test .....	29
3.7 Rychlostní profily .....	30
3.8 Krokové vybíjení s pauzou .....	33
<b>4 Navržený elektrický model</b>	<b>35</b>
4.1 Parametrizace OCV .....	35
4.2 Parametrizace $R_0$ a RC členů .....	38
4.3 Testování a ověření navrženého elektrického modelu .....	41
4.3.1 Testování a ověření na dynamickém vybíjecím testu .....	41
4.3.2 Testování a ověření na WLTC profilu .....	43
<b>5 Kinetický model</b>	<b>47</b>
5.1 Identifikace parametrů $k$ a $c$ .....	48
5.2 Testování kinetického modelu .....	49
5.3 Ověření kinetického modelu .....	50
<b>6 Ověření Rozšířeného modelu</b>	<b>51</b>
6.1 Ověření na dynamickém vybíjecím profilu .....	51
6.1.1 Střední kvadratické chyby - DDP .....	53
6.2 Ověření na WLTC profilu .....	53
6.2.1 Střední kvadratické chyby - WLTC .....	55
6.3 Porovnání výsledků ověření elektrického a rozšířeného modelu .....	55
<b>7 Závěr</b>	<b>57</b>
7.1 Navazující kroky na tuto práci .....	58
<b>A Datasheet článku NCA - Panasonic ncr18650</b>	<b>59</b>



<b>B Seznam použitých symbolů</b>	<b>63</b>
<b>C Literatura</b>	<b>67</b>
<b>D Obrázky</b>	<b>71</b>
<b>E Tabulky</b>	<b>75</b>



# Kapitola 0

## Úvod

Kvůli globální změně klimatu narůstá tlak na snížení uhlíkové stopy zejména v oblasti energetiky a dopravy. V energetice se přechází na výrobu elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů, jako jsou fotovoltaické a větrné elektrárny. Tyto zdroje však nezaručují stabilní dodávku výkonu, a proto je potřeba je vyrovnávat pomocí bateriových uložišť.

V osobní i hromadné silniční dopravě je aktuálním cílem omezit využívání spalovacích motorů a do popředí se dostává elektromobilita. Elektromobily nezatěžují životní prostředí emisemi z výfukových plynů, což je ceněná vlastnost zejména v hustě obydlených oblastech. Některá města již zavádějí zákaz vjezdu automobilům se spalovacími motory do určitých částí, typicky do center a historických oblastí s cílem zvýšení kvality vzduchu v dané lokalitě.

Pro elektromobilitu a stacionární uložišť tak lithium-iontové baterie představují klíčovou technologii. Mají spoustu výhod oproti ostatním bateriím jako například vysokou energetickou hustotu, nízké samovybíjení a dlouhou životnost. Pro jejich efektivní užívání je důležité sledovat stavy, například stav nabití (SOC) a stav života (SOH). Ty však nelze měřit přímo, lze je ale odvodit z měřitelných veličin jako je proud, napětí a teplota pomocí modelů a odhadovacích algoritmů.

Modely lze dělit na základě jejich principu, nebo jevů které popisují. V současnosti se často využívají elektrochemické modely [1],[2],[3] popisující vnitřní elektrochemické reakce v článku pomocí komplexních nelineárních diferenciálních rovnic. Empirické modely jsou tvořeny na základě přímo pozorovaného chování lithium-iontových článků. Jejich podstatou jsou funkce, popisující toto vypořádané chování například napětovým průběhem při zatížení určitým proudem. Oproti elektrochemickému modelu jsou abstraktní a nezachycují vnitřní děje článku[4],[5],[6],[7]. *Data driven* modely využívají technik strojového učení, kde se využívá obrovské množství naměřených dat pro natrénování modelu [8],[9],[10],[11]. Elektrické modely [12],[13],[14],[15] se využívají v modelování a simulacích díky schopnosti přesného odhadování odezvy výstupního napětí na proud článku pomocí náhradních elektrických obvodů popisujících bateriový článek. Jsou však omezeny vlastnostmi elektrických součástek, což znamená, že nedosahují takové přesnosti, jako mají například elektrochemické modely. Nicméně nejsou tak náročné z výpočetního hlediska, díky čemuž je lze aplikovat do řídicích jednotek automobilů. Kinetické modely [16],[17],[18],[19] se využívají pro predikování stavu nabití (SOC) článku, kde jejich podstatou je zachycování nelineárního chování kapacity. Lze je kombinovat s jinými modely pro dosažení lepších výsledků simulací. Tepelné modely [20],[21] se využívají pro modelování chování teploty a odhadování možných kritických stavů článku, které by mohly nastat kvůli extrémní teplotě článku.

Dnes je již navrženo široké spektrum modelů, kde každý typ je vhodný pro konkrétní využití s cílem co nejlépe modelovat danou aplikaci. S popularizací elektromobilů je kladen

důraz na vytváření vhodných modelů pro odhadování SOC a SOH, simulování jednotlivých bateriových článků a vytváření řídicích a informativních softwarů, proto směřujeme k modelům s dostatečnou přesností a malou hardwarovou náročností, což je i motivací pro tuto diplomovou práci. Cílem této práce je vytvořit kombinovaný model složený z elektrického a kinetického modelu pro přesnější simulaci a předpověď napětí a SOC lithium-iontového článku.

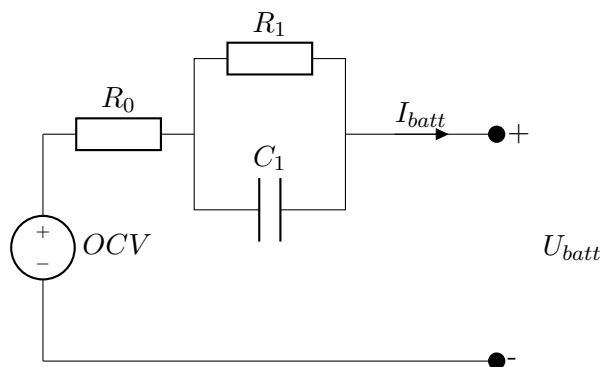
# Kapitola 1

## Modelování lithium-iontových článků

Bateriové modely se využívají v širokém množství aplikací. Důležitou roli zastávají při dimenzování a návrhu systémů. Také jsou nezbytnou součástí algoritmů pro odhadování stavu baterií a v neposlední řadě je lze využít pro přesný popis a pochopení vnitřních mechanismů článků. V této kapitole jsou rozebrány dnes často používané typy modelů.

### 1.1 Elektrický model

Elektrický model popisuje článek jako náhradní elektrický obvod složený ze zdroje napětí a kombinace odporů, kondenzátorů, indukčnosti a impedance, jež se skládá z různých zapojení odporů, kondenzátorů a případně indukčností, jimiž je charakterizováno chování článku. Použití elektrického modelu je intuitivní pro elektroinženýry, jelikož model je tvořen běžně užívanými komponenty elektrických obvodů a sestavení rovnic je pouze matematické vyjádření daného obvodu. Obecnými výhodami pak jsou lehká integrace s dalšími modely a malá výpočetní náročnost oproti jiným modelům. Hlavní nevýhodou je nepřesnost tvořena užitím elektrických součástí, čímž dojde k vynechání některých mechanismů kvůli omezenému množství kombinací elektrických prvků a omezení daná jejich vlastnostmi. Většina elektrických modelů je tvořena z Theveninova náhradního obvodu nebo z impedančního modelu [14][15][22].



Obrázek 1.1: Elektrický model na bázi Theveninova náhradního obvodu.

Elektrický model na bázi Theveninova náhradního obvodu je složen ze zdroje napětí, který reprezentuje napětí naprázdno (OCV), ze sériového odporu reprezentujícího odpor elektrolytu a vodivých cest, například konektorů a sběračů proudu, v článku, dále z paralelní kombinace odporu a kondenzátoru (dále paralelní RC) pro popis přechodových dějů. Theveninův model se v praxi používá s jedním až třemi RC členy z důvodu výpočetní zátěže a fyzikální interpre-

tovatelnosti. S každým přidaným RC členem přibývá do popisu další stavová rovnice, dva parametry a jedna časová konstanta. Model lze ještě rozšířit o obvod explicitně interpretující kapacitu článku [14][22].

## 1.2 Empirický model

Empirické modely využívají empirických rovnic, nebo matematických stochastických modelů. Empirický model je schopen simulovat napětí článku a jeho dynamickou odezvu. Nejčastěji využívanými modely jsou Shepherdův vybíjecí model, modifikovaný Shepherdův model a model využívající lineární regresi [22][5][6][4][7].

Vybíjecí Shepherdův model je popsán následující rovnicí.

$$V = E_0 - K \left( \frac{Q}{Q - it} \right) i - R_0 \cdot i + A \cdot e^{(-B \cdot it)}, \quad (1.1)$$

kde:

- $E_0$  - reprezentuje napětí naprázdno článku při plné kapacitě [V],
- $K$  - je polarizační odporový koeficient [ $\Omega$ ],
- $Q$  - je kapacita článku [Ah],
- $i$  - je proud protékající článkem [A],
- $R_0$  - je vnitřní odpor článku [ $\Omega$ ],
- $it = 1 - \frac{1}{Q} \cdot \int idt$  - vybitá kapacita [Ah],
- $A, B$  - jsou empirické konstanty [V, 1/Ah].

Tento základní model není schopen dostatečně přesně simulovat přechodové děje odehrávající se v článku při vybíjení proměnlivým proudem. Pro simulaci profilů s proměnlivým proudem byl vytvořen modifikovaný Shepherdův model [4], který již pracuje s polarizačním napětím a polarizačním odporem článku. Zde jsou uvedeny pouze výsledné rovnice. Upravená rovnice pro vybíjení je pak:

$$V = E_0 - K \left( \frac{Q}{Q - it} \right) i^* - K \left( \frac{Q}{Q - it} \right) it - R_0 + A \cdot e^{(-B \cdot it)}, \quad (1.2)$$

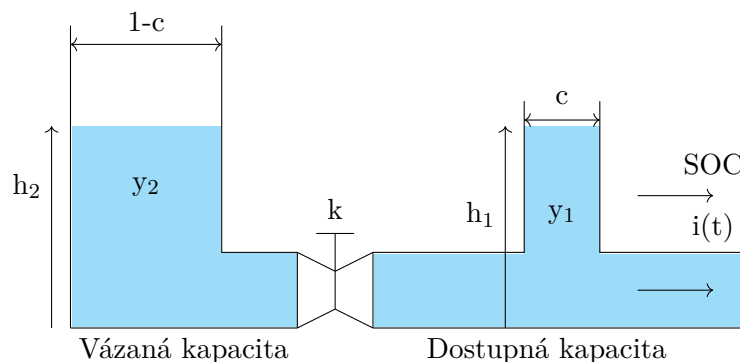
kde  $K$  je polarizační odporový koeficient,  $Q$  je kapacita článku,  $i(t)$  je proud,  $R_0$  charakterizuje vnitřní odpor,  $A$  je exponenciální část amplitud a  $B$  je exponenciální část časových konstant. Pro nabíjení má rovnice tvar:

$$V = E_0 + K \left( \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \right) i^* - K \left( \frac{Q}{Q - it} \right) it + R_0 + A \cdot e^{(-B \cdot it)}. \quad (1.3)$$

Upravený Shepherdův model již poskytuje nástroje pro simulování jak vybíjecího, tak nabíjecího profilu a také simulování proměnlivých proudových zatížení [22][5].

## 1.3 Kinetický model

Kinetický model popisuje nelinearitu a dynamické chování kapacity článku. Nelinearita kapacity je spojena se závislostí velikosti kapacity na velikosti vybíjecího, potažmo nabíjecího proudu. Kde čím vyšší proud je použit, tím nižší je výsledná hodnota. Model využívá dvou kapacit, dostupné a vázané. Dostupná kapacita je aktuálně využitelná kapacita zanedbávající nelineární kapacitu a lze ji vypočítat Coulombovskou metodou. Vázaná kapacita je aktuálně nedostupná kapacita článku, která již počítá s nelinearitou kapacity [17][18].



Obrázek 1.2: Kinetický model baterie, základní vyobrazení [17].

Obecně je kinetický model reprezentován dvěma „nádržemi“ viz obr.(1.2), kde nádoba y<sub>2</sub> reprezentuje vázanou kapacitu a y<sub>1</sub> reprezentuje dostupnou kapacitu. Součet dostupné a vázané kapacity dává celkovou kapacitu v článku. Model počítá s distribucí celkové kapacity kapacitním faktorem c, kde platí  $0 < c < 1$ . Při vybíjení je kapacita dodávána pouze z dostupné kapacity a ta je postupně doplňována z vázané kapacity přes ventil k, což je konstanta rychlosti difúze. Neboli konstanta udávající rychlost přeměny vázaného náboje na náboj volný. Přeměna náboje záleží také na výšce jednotlivých hladin h<sub>1</sub> a h<sub>2</sub>. Pokud jsou výšky vyrovnané, nedochází k přesunu náboje. Základní rovnice kinetického modelu jsou následující:

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = -i(t) + k \cdot [h_2(t) - h_1(t)] \quad (1.4)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = -k \cdot [h_2(t) - h_1(t)] \quad (1.5)$$

kde i(t) se považuje za kladný při vybíjení a za záporný při nabíjení. Podrobnější popis kinetického modelu je rozebrán v kapitole (5) [17][18].

## 1.4 Elektrochemický model článku

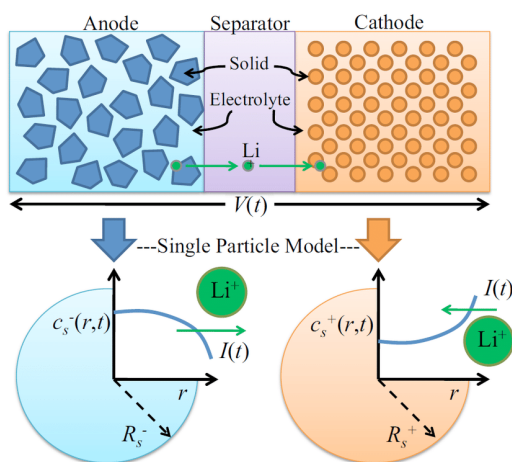
Elektrochemické modely detailně popisují elektrochemické děje probíhající uvnitř článku pomocí nelineárních diferenciálních rovnic. Oproti elektrickému modelu lze elektrochemickým modelem docílit daleko detailnějšího popisu mechanismů uvnitř článku, avšak stále nedosahují

dokonalého popisu celého systému. Dnes jsou široce užívané tři typy elektrochemických modelů: Doyle-Fuller Newman model, pseudo-2D-model a *single particle model*.

Doyle-Fuller-Newman model, který rozděluje článek do x dimenzí a v každé dimenzi popisuje článek třemi částmi (kladná elektroda, záporná elektroda a separátor). Výsledný model pak popisuje 6 jevů probíhajících v článku. Jmenovitě koncentraci lithiových iontů v pevném a kapalném skupenství, potenciál pevné a elektrolytické složky, Butler-Volmer kinetiku, hustotu výměnného proudu, rozdíl potenciálů elektrod a výstupní napětí na svorkách článku [1][2][22].

Tento model dosahuje díky své komplexnosti velmi přesných výsledků v oblasti odhadování stavů článku, je však velmi výpočetně náročný a proto není vhodný pro dynamické aplikace. Tento fakt vedl k vytvoření zjednodušených pseudo-2D-modelů, nedosahujících tak dobrých výsledků, ale jsou výpočetně jednodušší. Lze je proto využít i v dynamičtěších aplikacích. Jako hlavní aplikace pseudo-2D-modelů se jeví modelování stárnutí článků, kde tyto modely díky své komplexitě velmi přesně odhadují stárnutí článku. Zjednodušené modely pak mohou odhadovat i dynamické děje v článku [1][22].

Dalším široce užívaným modelem je *single particle model*, což je v podstatě pseudo-2D-model přetvořený do jedné dimenze, kde anodu a katodu reprezentují sféry o poloměrech  $R_{an}$  a  $R_{ka}$ . Výhodou *single particle modelu* je jeho nízká výpočetní náročnost oproti Doyle-Fuller-Newman a pseudo-2D-modelu [2][3].

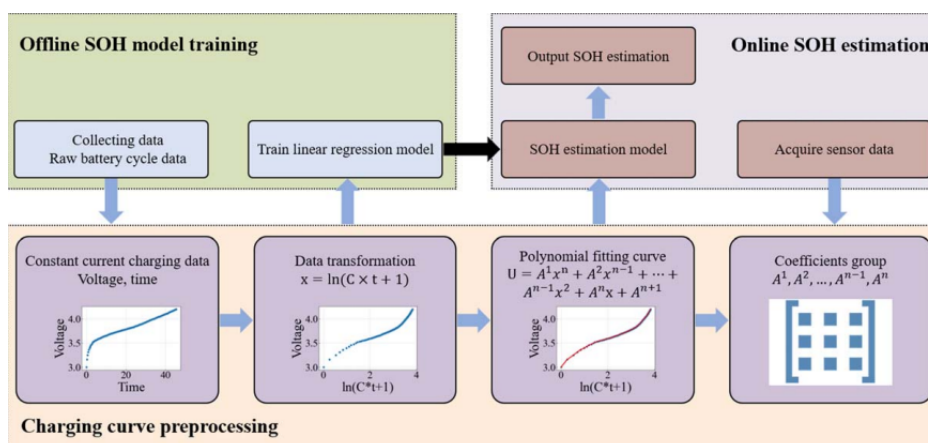


Obrázek 1.3: Schematický obrázek *single particle modelu*. Převzato z [3].

## 1.5 Data driven modely

*Data driven* modely využívají statistické přístupy a strojové učení, s čímž je spojená potřeba velkého množství naměřených dat z modelované oblasti. Pro odhad stavu života pomocí statistického přístupu se využívá například Markova modelu [23], nebo „sample entropy“ [24], což jsou statistické modely pseudo náhodných jevů. Strojové učení je postaveno na neuronových sítích, regresi Gaussovým procesem a dalších [25]. Modely lze zkombinovat s elektrickým modelem a kalmanovými filtry [26], čímž lze dosáhnout při trénování modelu daleko přesnějších výsledků. [8][9][11][10][25][27].





**Obrázek 1.4:** Ilustrativní obrázek datově řízeného modelu pro prognózu stavu života baterie. Převzato z [28].

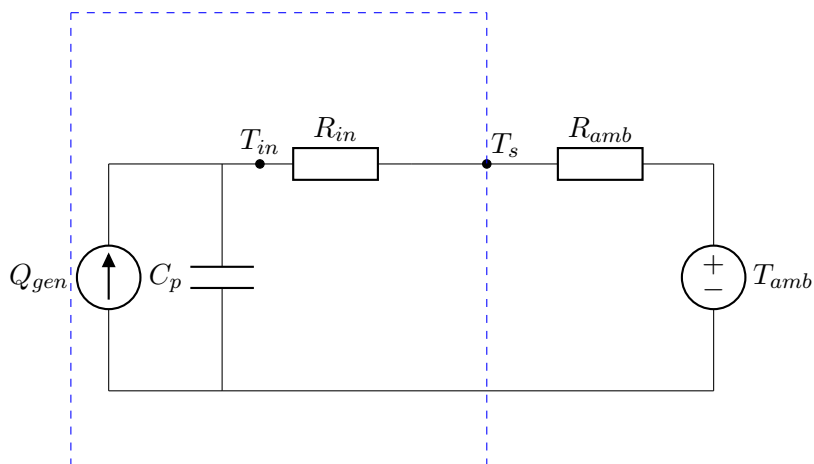
## 1.6 Tepelné modely

Tepelné modely se využívají buď v kombinaci s ostatními modely, nebo samostatně pro modelování teplotního profilu článku při určitém zatížení. Existuje několik přístupů.

Nejjednodušší tepelný model je *zero-dimensional thermal model* neboli tepelný model nulté dimenze, který předpokládá článek pouze jako hmotu bez rozměru, která má určité tepelné vlastnosti [29]. Hlavním prvkem 0D modelu je energetická bilance, která zohledňuje příjem, ztrátu a akumulaci tepelné energie v systému. 0D tepelný model může sloužit jako užitečný nástroj při potřebě rychlého a jednoduchého zhodnocení teplotního chování, pokud není vyžadováno prostorové rozlišení. Složitějším tepelným modelem je 1D model, který byl poprvé představen v článku [30], kde autoři poprvé modelovali termální stabilitu lithia interkalanovaného v uhlíku pomocí Arrheniova vztahu pro aktivační energii. Později byl vytvořen 3D model [21], který je dnes velmi často využíváný. 1D a 3D tepelné modely vychází z Fourier-Kirchhoffovy rovnice přenosu tepla:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T + \dot{q} \quad (1.6)$$

Dalším často užívaným typem jsou tepelné obvody. Jedná se o využití elektrických prvků pro vytvoření tepelného modelu [20].



**Obrázek 1.5:** Zjednodušený tepelný obvod. Převzato z [20].

Obr.(1.5) je vyobrazen zjednodušený tepelný obvod bateriového článku. Modré ohraničení je článek samotný.  $Q_{gen}$  reprezentuje teplo generované článkem.  $C_p$  je tepelná kapacita článku.  $T_{in}$  je vnitřní teplota článku.  $R_{in}$  je vnitřní tepelný odpor článku.  $T_s$  je teplota povrchu článku.  $R_{amb}$  je tepelný odpor okolí v němž se článek nachází a  $T_{amb}$  reprezentuje okolní teplotu.

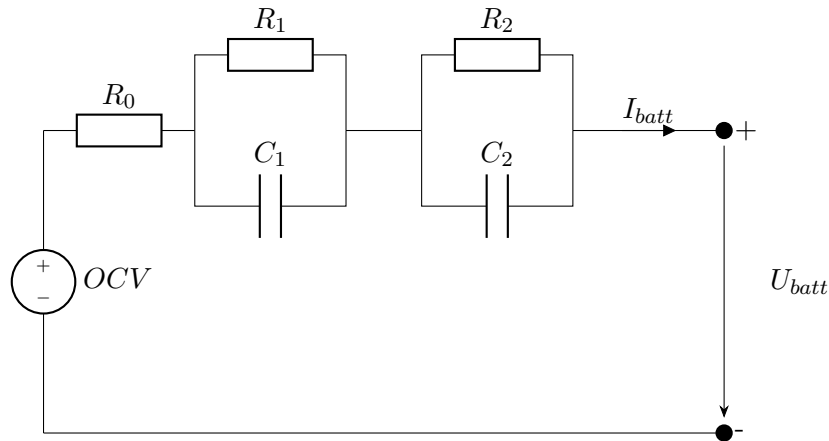
První dva modely se využívají hlavně na modelování článku jako celku pro odhad teplotního profilu. Třetí model je již schopen i odhadovat tzv. „thermal runaway“ efekt. „thermal runaway“ efekt je jev, kdy exotermické řetězové reakce v článku zvednou vnitřní teplotu článku natolik, že dochází k destabilizaci a degradaci vnitřní struktury, což vede až ke kompletnímu zničení článku [30][20][21].

## Kapitola 2

### Elektrický model bateriového článku

V této kapitole je popsán elektrický model jako celek, dále pak jeho jednotlivé komponenty a jejich parametrizace. Elektrický model bateriového článku je ekvivalentní forma popisu značně zjednodušených fyzikálních dějů probíhajících v článku. Elektrický model se soustředí na externě pozorovatelné veličiny, například jaká je změna napětí v závislosti na odebraném proudu, přičemž interní stavy jsou aproximovány strukturou elektrického obvodu. Při modelování je nutné najít kompromis mezi komplexností a přesností modelu, tedy jaká je přesnost modelu a jak výpočetně je model náročný, protože elektrický model je často využit v *embedded* zařízeních, kde je omezený výpočetní výkon.

Jako náhradní schéma lithium - iontového článku byl vybrán theveninův náhradní obvod s dvěma RC členy. Dva RC členy byly použity z důvodu kompromisu přesnosti a náročnosti výpočtu.



**Obrázek 2.1:** Elektrický model s dvěma RC členy.

Model na obr. (2.1) lze popsat následujícími rovnicemi:

$$U_{batt} = OCV - I_{batt} \cdot R_0 - I_{R_1} \cdot R_1 - I_{R_2} \cdot R_2 \quad (2.1)$$

$$\frac{dI_{R_1}}{dt} = -\frac{I_{R_1}}{R_1 \cdot C_1} + \frac{I_{batt}}{R_1 \cdot C_1} \quad (2.2)$$

$$\frac{dI_{R_2}}{dt} = -\frac{I_{R_2}}{R_2 \cdot C_2} + \frac{I_{batt}}{R_2 \cdot C_2} \quad (2.3)$$

Rovnice (2.1) - (2.3) popisují chování modelu. Pro řádný popis modelu je nutné určit parametry  $OCV$ ,  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ .

## 2.1 Napětí naprázdno

Základním prvkem elektrického modelu je tzv. napětí naprázdno (OCV). Napětí naprázdno je důsledek elektrochemických potenciálů elektrod a lze jej změřit jen pokud je článek nezatížený a v klidu. Hodnota napětí naprázdno je ovlivněna dvěma faktory, stavem nabití (SOC) a teplotou.

### 2.1.1 Stav nabití

Stav nabití (SOC) definuje v poměru kolik kapacity je aktuálně uloženo v článku oproti maximální hodnotě kapacity článku. Tedy při plném nabití je  $SOC = 1$ . Při plném vybití je  $SOC = 0$ . Platí vztah:

$$SOC = \frac{Q}{Q_{tot}} [-], \quad (2.4)$$

kde  $Q$  je aktuální kapacita článku a  $Q_{tot}$  je maximální kapacita článku v ampérhodinách nebo mili-ampérhodinách. Obecně se SOC vyjadřuje v %, je tedy nutné vztah (2.4) upravit:

$$SOC = \frac{Q}{Q_{tot}} \cdot 100 [\%] \quad (2.5)$$

Maximální kapacita článku je závislá na teplotě, velikosti vybíjecího proudu a stáří článku. Obecně považujeme lithium-iontový článek za vybitý, když hodnota jeho napětí klesne na úroveň specifikovanou výrobcem [12][14].

Obecně je SOC popsáno pomocí obyčejné diferenciální rovnice:

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{-\eta(t) \cdot I(t)}{Q_{tot}}, \quad (2.6)$$

kde kladné znaménko proudu  $I(t)$  je při vybíjení,  $\eta(t)$  je nabíjecí účinnost a je definována jako  $\eta(t) = 1$  při vybíjení a  $\eta(t) \leq 1$  při nabíjení.

Rovnici (2.6) lze integrovat a použít pro určení SOC v čase  $t$  za předpokladu známého výchozího stavu SOC v čase  $t_0$ .

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_{tot}} \int_{t_0}^t \eta(t) I(t) dt. \quad (2.7)$$

Pro *embedded* systémy je často upřednostňována formulace modelů v diskrétním čase, což odpovídá také prakticky diskrétní povaze naměřených dat. Proto je vhodné uvést rovnici (2.7) v diskrétní formě. V tomto přístupu jsou data vzorkována s periodou  $\Delta t$ , a časový interval, který začíná v čase  $t_0 = k\Delta t$  a končí v čase  $t_1 = (k+1)\Delta t$ , je základem pro diskrétní vyjádření. Za předpokladu konstantního proudu pak můžeme rovnici (2.7) převést do této diskrétní formy

$$SOC((k+1)\Delta t) = SOC(k\Delta t) - \frac{\Delta t}{Q_{tot}} \eta(k\Delta t) I(k\Delta t). \quad (2.8)$$

Pro lepší přehlednost je dobré v rovnici (2.8) nahradit členy  $k\Delta t = k$ , čímž se tvar rovnice (2.8) změní na

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{\Delta t}{Q_{tot}} \eta(k) I(k). \quad (2.9)$$

### ■ 2.1.2 Výsledné napětí naprázdno

Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly, napětí naprázdno je funkcí stavu nabití a teploty. Dle Pletta [12] lze OCV pro různé teploty popsat pomocí vztahu

$$OCV(SOC(t), T(t)) = OCV_0(SOC(t)) + T(t) \cdot OCV_{rel}(SOC(t)), \quad (2.10)$$

kde  $OCV(SOC(t), T(t))$  je napětí naprázdno funkcí stavu napětí a teploty,  $OCV_0(SOC(t))$  je napětí naprázdno při teplotě  $0^\circ\text{C}$  a  $OCV_{rel}(SOC(t))$  je lineární teplotní korekční faktor [12].

## ■ 2.2 Sériový odpor

Každý elektrický prvek má definovaný odpor. Stejně tomu je i u bateriového článku. Tzv. vnitřní odpor bateriového článku je odpor reprezentující odpor elektrolytu a odpor vodivých cest v článku. V této práci je označován jako sériový odpor  $R_0$ . Pro počáteční zjednodušení uvažujme konstantní proud odebíraný z bateriového článku  $I > 0$ . Úbytek napětí na odporu  $R_0$  můžeme psát jako:

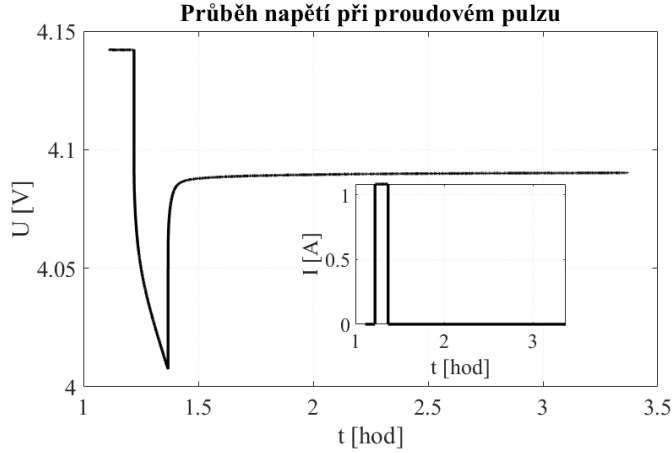
$$U_R = I_{batt} \cdot R_0 \quad (2.11)$$

Nenulové  $U_R$  znamená, že napětí na bateriovém článku bude nižší, než je napětí naprázdno právě o úbytek napětí na odporu  $R_0$ . V opačném případě, když bude konstantní proud dodáván do bateriového článku, tak bude napětí na bateriovém článku vyšší, než napětí naprázdno.

V zjednodušeném pojetí je sériový odpor závislý na dvou parametrech. Stavů nabití a teplotě. V případech modelování života bateriového článku je nutné rozšířit závislost sériového odporu ještě o závislost na stavu života (SOH). Jak bateriový článek stárne, mění se parametry jeho chemie, což ovlivňuje i velikost odporu elektrolytu a odpor vodivých cest. To má za následek zvýšení sériového odporu.

## ■ 2.3 RC člen

V předchozí části byly popsány prvky modelu pro statické chování bateriového článku. Napěťová odezva článku však vykazuje i dynamický charakter, jelikož se projevují polarizační procesy spojené s přenosem náboje a difuzí a tudíž je nutné ho rozšířit o další prvky.



**Obrázek 2.2:** Ukázka průběhu napětí při proudovém pulzu.

Na obrázku (2.2) je vyobrazen průběh napětí při krátkém vybíjecím pulsu a následné relaxaci. V první části článek relaxuje a hodnota napětí se téměř nemění. V druhé části je článek vybíjen proudem, napětí klesá a dochází k polarizaci. V momentě přerušení odběru proudu dojde ke strmému nárůstu napětí a následnému pozvolnému růstu, což je způsobeno depolarizací a tzv. *Charge recovery effectem* [31].

Výše popsaný jev lze při modelování popsat paralelním zapojením odporu a kondenzátoru (v schématu označeny  $R_1$  a  $C_1$ ).

$$U(t) = OCV(SOC(t), T(t)) - U_C(t) - U_R(t) \quad (2.12)$$

$$U(k) = OCV(SOC(k), T(k)) - U_C(k) - U_R(k) \quad (2.13)$$

Dále pro paralelní kombinaci odporu a kondenzátoru platí:

$$I_{R_1}(t) + C_1 \cdot \frac{dU_{C_1}}{dt} = I(t), \quad (2.14)$$

kde

$$U_{C_1}(t) = R_1 \cdot I_{R_1}(t) \quad (2.15)$$

Rovnici (2.14) lze přepsat do tvaru:

$$I_{R_1}(t) + R_1 \cdot C_1 \frac{dI_{C_1}(t)}{dt} = I(t) \quad (2.16)$$

Rovnice (2.16) je obyčejná diferenciální rovnice prvního řádu, lze ji tedy řešit klasickými metodami.

Nyní je k dispozici stavová rovnice pro popis změny SOC v čase a výstupní rovnice pro popis výstupního napětí.

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{-\eta(t) \cdot I_{batt}(t)}{Q_{tot}} \quad (2.17)$$

$$U(t) = OCV(SOC(t)) - I_{R_1} \cdot R_1(t) - I_{batt} \cdot R_0(t) \quad (2.18)$$

Transformace z časové oblasti do diskretní zde provedena nebude, je velmi podrobně popsána v knize od Gregory Pletta [12].

Výsledné stavové rovnice pro diskretní model jsou:

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{\Delta t}{Q_{tot}} \cdot \eta(k) \cdot I(k) \quad (2.19)$$

$$I_{R_1}(k+1) = e^{-\frac{\Delta t}{R_1 \cdot C_1}} \cdot I_{R_1}(k) + \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 \cdot C_1}}\right) \cdot I(k) \quad (2.20)$$

a výsledná výstupní rovnice je:

$$U(k) = OCV(SOC(k)) - R_1 \cdot I_{R_1}(k) - R_0 \cdot I(k) \quad (2.21)$$

Pro lepší přehlednost vztahů jsou vztahy uvedeny pouze s proměnnou  $t$  a  $k$ , ale pořád platí, že veličiny jsou závislé na teplotě ( $T$ ) a SOC.

Tímto jsou k dispozici rovnice pro popsání elektrického modelu lithium - iontového článku. V další části jsou popsány testy pro parametrizaci jednotlivých prvků elektrického modelu.

## ■ 2.4 Testy pro parametrizaci Li-ion článku

V předchozí části byly rozebrány jednotlivé komponenty elektrického modelu lithium - iontového článku a byly vytvořeny rovnice pro popis modelu. Tato část se věnuje parametrizačním testům potřebným k získání parametrů prvků v modelu. Pro přehlednost jsou jednotlivé testy v této kapitole popsány pouze obecně a je i obecně popsán postup pro získání jednotlivých parametrů. Testy použité pro tuto práci jsou uvedeny v kapitole (3).

### ■ 2.4.1 Parametrizace napětí naprázdno (OCV)

Napětí naprázdno lze parametrizovat dvěma způsoby.

#### 1. Krokové nabíjení / vybíjení:

Tato metoda je založena na krátkých nabíjecích intervalech a následné relaxaci. V prvním kroku se baterie vybije na minimální dovolené napětí, poté se nechá zrelaxovat několik hodin a následně se odečte OCV pro dané SOC. Následuje pomalé nabíjení proudem přibližně  $C/3$  tak dlouho, aby se SOC zvedlo o 5%. Následuje opět několikahodinová relaxace při které se odečte OCV. Tento proces se opakuje až do plného nabití. Dalším krokem je vybíjení opět přibližně proudem  $C/3$  po pětiprocentním snížení SOC se vybíjení pozastaví a nastane opět fáze relaxace a odečtení OCV. Tyto kroky se opakují až do úplného vybití. Výsledkem je křivka OCV v závislosti na SOC.

#### 2. Kvazi-OCV test:

Kvazi-OCV test je daleko rychlejší, jelikož zde oproti krokovému testu není tak dlouhá relaxace. Článek se nejprve plně nabije, poté se nechá zrelaxovat a vybije se proudem typicky  $C/30$ . Po tomto kroku následuje kalibrační dovybití, kde pro jiné teploty než  $25^\circ\text{C}$  se článek nechá přivést na teplotu  $25^\circ\text{C}$  a provede se zmíněné kalibrované dovybití. Poté se opět nechá zrelaxovat, aby se ustálila teplota a následuje pomalé nabíjení proudem  $C/30$  s následnou relaxací pro ustálení teploty při dosažení plného nabití a konečným

hodinovým dobitím. Výsledkem jsou křivky odpovídající závislosti napětí na stavu nabití. Díky faktu, že je článek nabíjen velmi pomalu lze prohlásit naměřenou křivku napětí za křivku napětí naprázdno. Obecně Kvazi-OCV test probíhá následujícím postupem:

a. Kalibrované přednabití článku:

V tomto kroku se kalibrovaně přednabije článek. Cílem je dostat článek do stavu plného nabití. Kalibrované přednabití probíhá za teploty 25 °C. Předpokladem je, že článek je v prostředí, kde lze kontrolovat teplotu. Postup je následující:

- Nastavení teploty na 25 °C.
- Čekání na ustálení teploty článku na 25 °C. Tento krok by měl trvat alespoň dvě hodiny.
- Plné nabití článku do maximálního napětí.

b. Pomalé vybití článku:

V tomto kroku se plně nabitý článek vybíjí malým proudem, typicky  $C/30$  až do minimálního povoleného napětí.

- Nastavení požadované teploty pro měření.
- Čekání na ustálení teploty článku na požadované teplotě. Tento krok by měl trvat alespoň dvě hodiny.
- Vybití článku proudem  $C/30$ .

c. Kalibrované dovybití:

Tento krok má za cíl plně dovybít článek, opět do minimální hodnoty povoleného napětí.

- Nastavení teploty na 25 °C.
- Čekání na ustálení teploty článku na 25 °C. Tento krok by měl trvat alespoň dvě hodiny
- plné dovybití článku.

d. Pomalé nabití článku:

V tomto kroce se článek nabíjí malým proudem typicky  $C/30$  až do maximálního povoleného napětí.

- Nastavení požadované teploty pro měření.
- Čekání na ustálení teploty článku na požadované teplotě. Tento krok by měl trvat alespoň dvě hodiny.
- Nabití článku proudem  $C/30$ .

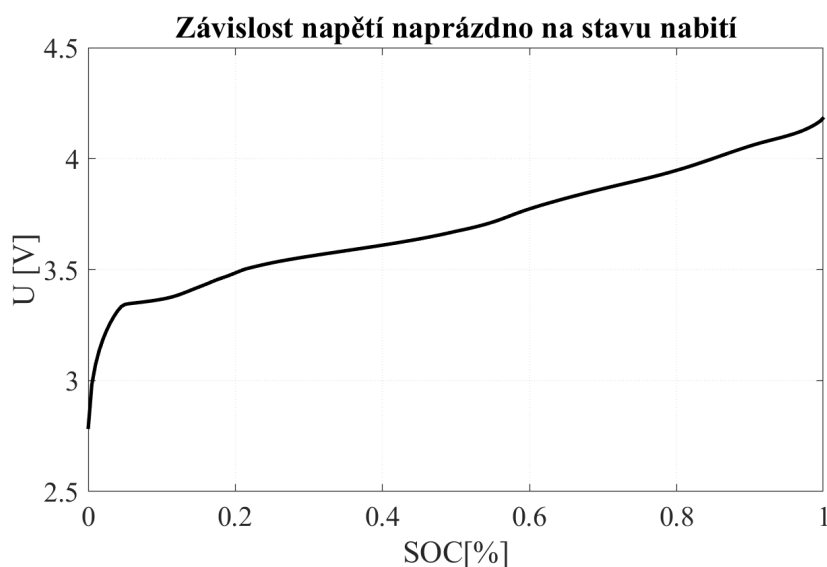
e. Kalibrované donabití:

Tímto krokem se plně donabije článek na maximální hodnotu povoleného napětí.

- Nastavení teploty na 25 °C.
- Čekání na ustálení teploty článku na 25 °C. Tento krok by měl trvat alespoň dvě hodiny.
- plné donabití článku.

Kroky kalibrovaného dovybití a donabití jsou pro dosažení stavů 0% a 100% SOC.





**Obrázek 2.3:** Ilustrace závislosti napětí naprázdno na stavu nabití z Kvazi-OCV testu.

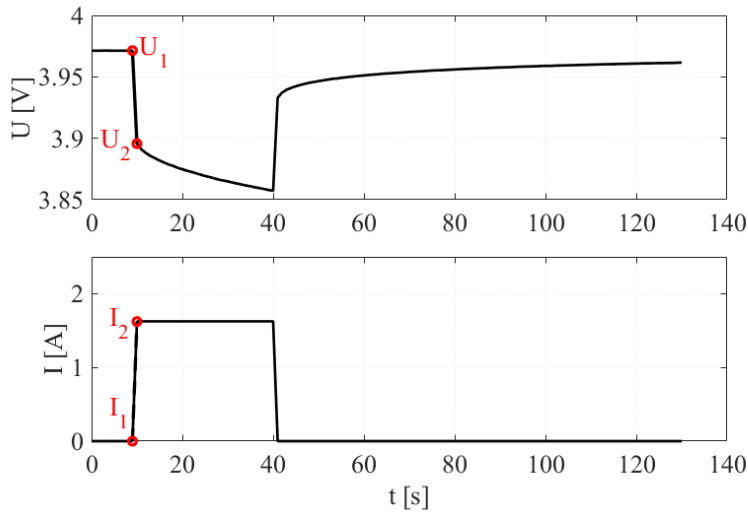
## ■ 2.4.2 Parametrizace sériového odporu

Sériový odpor baterie je závislý na mnoha faktorech a to na SOC, teplotě, velikosti vybíjecího proudu a délce pulzu. Sériový odpor je možné měřit několika způsoby.

Prvním způsobem je měření pomocí proudových pulzů. To lze rozdělit na dva způsoby. Hybridní pulsová výkonová charakterizace (HPPC) a „pulse train“. HPPC je založena na střídání vybíjecího pulzu, pauzy, regeneračního pulzu (nabíjecího pulzu) a relaxace. Typický vybíjecí pulz je stanoven na hodnotu maximálního vybíjecího pulzního proudu po dobu 10 vteřin, následně pak pauzou trvajícího 40 vteřin, poté regeneračním pulzem o velikosti cca 75% maximálního vybíjecího pulzního proudu. HPPC testy jsou také popsány v normě ISO 12405-1 standard, čili lze se držet postupu daného normou.

„Pulse train“ je metoda dle normy ISO 12405-1 na testování výkonu a vnitřního odporu bateriového článku. Procedura testu se skládá z několika střídajících se nabíjecích a vybíjecích pulzů na konkrétní hodnotě SOC. Tedy nejprve se článek uvede na určitou hodnotu SOC a pak se provede několik nabíjecích a vybíjecích pulzů. Poté následuje relaxace článku. Důležité je poznamenat, že pulzy se střídají, tzn. pokud je první pulz nabíjecí, tak druhý pulz je vybíjecí. Každý další pulz je vyšší, než byl předchozí pulz stejného charakteru. Příkladem může být pulse train při vybíjení. Nejprve se nastaví hodnota SOC na příkladem 90% SOC, článek se nechá definovaný čas relaxovat (obvykle 2 hodiny) a poté se provede série nabíjecích a vybíjecích pulzů s definovanou pauzou po každém pulzu. Jako konkrétnější příklad lze uvést, první nabíjecí pulz bude proveden proudem 0.1 C, následuje 10-ti minutová pauza a poté je proveden vybíjecí pulz opět hodnotou 0.1 C, po kterém opět následuje 10-ti minutová pauza. Další dvojice pulzů bude provedena stejně, ale vybíjecí proud bude například 0.5 C. Výsledkem jsou napěťové křivky pro různé vybíjecí proudy.

Základně lze sériový odpor odhadnout pomocí metody dvou proudů.



**Obrázek 2.4:** Proudový pulz pro odhad  $R_s$ .

Na obr.(2.4) je vyobrazen průběh napětí při proudovém pulzu. Pro aproximaci sériového odporu lze využít body  $U_1$  a  $U_2$  resp.  $I_1$  a  $I_2$ . Využijeme faktu, že napětí  $U_1$  je poslední bod napětí, kde je ještě nulový proud a napětí  $U_2$  je první bod kdy proud není nulový. Pak lze sériový odpor článku aproximovat jako:

$$R_0 = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_1 - U_2}{I_2}. \quad (2.22)$$

Další metodou je elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS) [32]. Při EIS se článek vybudí sinusovým napětím nebo proudem o určité frekvenci a sleduje se proudová nebo napěťová odezva článku. Z naměřených signálů se následně spočítá impedance ve formě amplitudy a úhlu fázového posunu a nebo reálné a imaginární složky impedance. Měření se provádí pro zvolený frekvenční rozsah. Získaná impedance se běžně interpretuje ve formě Nyquistova diagramu, kde sériový odpor je definován v místě nulové imaginární části impedance. Následné další minimum imaginární části impedance je hodnota přechodového odporu. Kondenzátor pak lze dopočítat ze vztahu  $T = R \cdot C$ , kde  $T$  je časová konstanta článku. Problém EIS je, že křivka nemusí mít lokální minimum na daném frekvenčním rozsahu, kvůli čemuž pak nelze určit RC parametry [12][33][34].

### 2.4.3 Parametrizace RC členu

Pro hrubý odhad RC členu lze využít pulzního testu. Článek se zatíží vybraným proudem po vybranou dobu a poté se nechá relaxovat. Pro určení parametrů  $R_1$  a  $C_1$  se vychází z křivky odezvy na vybíjecí pulz, kde pokud vyjdeme z rovnice vyjadřující změnu napětí, tedy

$$\Delta U = \frac{R_0 + R_1}{\Delta I}, \quad (2.23)$$

kde  $\Delta U$  je rozdíl napětí mezi začátkem a koncem pulsu,  $\Delta I$  je známá hodnota z předchozího výpočtu odporu  $R_0$  a  $R_0$  již známe, tak lze rovnici přepsat na tvar

$$R_1 = \frac{\Delta U}{\Delta I} - R_0. \quad (2.24)$$

Dále lze říci, že napětí se při přechodovém ději ustálí za čas cca

$$\tau = 5 \cdot R_1 \cdot C_1. \quad (2.25)$$

Pokud je známa doba mezi počátkem a ukončením proudového pulzu, je možné určit  $C_1$  jako

$$C_1 = \frac{\tau}{5 \cdot R_1}. \quad (2.26)$$

Daleko přesnějšími metodami určování RC parametrů je využití optimalizačních metod na bázi minimalizování chyby. Jednou z využitelných metod je *prediction error minimization* (PEM). Pro PEM je nutné definovat matematický model článku, definovat stavy a parametry. Následně se z naměřených dat využije proud jako vstup do PEM a napětí jako výstupní reálná hodnota [35] [36]. PEM poté mění parametry tak, aby minimalizoval chybu

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t), \quad (2.27)$$

kde  $y(t)$  jsou naměřená výstupní data v čase  $t$  a  $\hat{y}(t)$  jsou výstupní data z modelu v čase  $t$  [37][38].

Další využitelnou metodou je *Particle swarm optimization* (PSO). PSO je výpočetní technika inspirována sociálním chováním ptáků v hejnech, nebo chovem ryb. Pro PSO je nutné definovat „velikost roje (počet částic)“ a počáteční podmínky parametrů. Dále se do modelu implementuje rovnice (2.27). PSO funguje na principu hledání nejlepší hodnoty každé částice z hlediska její osobní pozice a zároveň z hlediska její nejlepší pozice v celém „roji“ [39][40].



## Kapitola 3

### Laboratorní měření

V této kapitole jsou popsána provedená měření pro parametrizaci a následnou validaci elektrického a kinetického modelu. Měření byla provedena na článcích Panasonic NCR 18650B. Datový list článku je v příloze (A). Každý test byl proveden na dvou článcích. Pro získání teplotní závislosti parametrů byly jednotlivé testy provedeny na 6-ti teplotách:  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.1 Měřící pracoviště

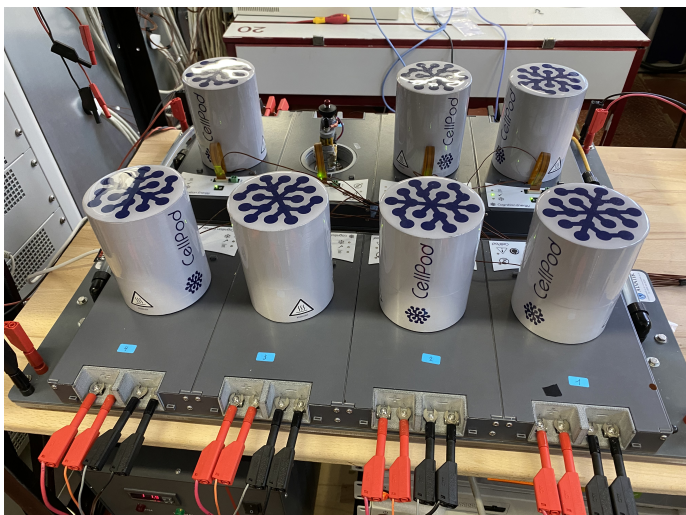
Měřící pracoviště bylo realizováno z bateriového testeru od firmy Neware a teplotních komor Cellpod od firmy Cognition Energy. Pro chladicí oběh byl využit chladič Industrial Chiller Laserscript.



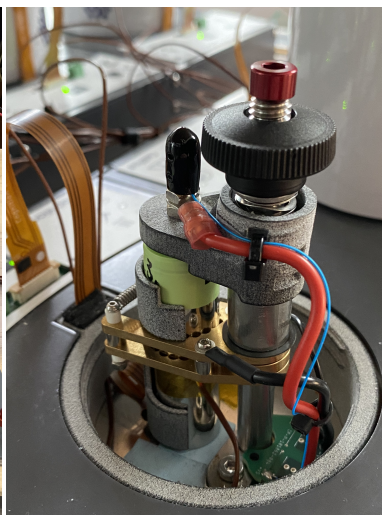
Obrázek 3.1: Měřící pracoviště.



Obrázek 3.2: Cellpod pro měření.



Obrázek 3.3: Cellpody použité pro měření.



Obrázek 3.4: Článek zapojený v Cellpodu.

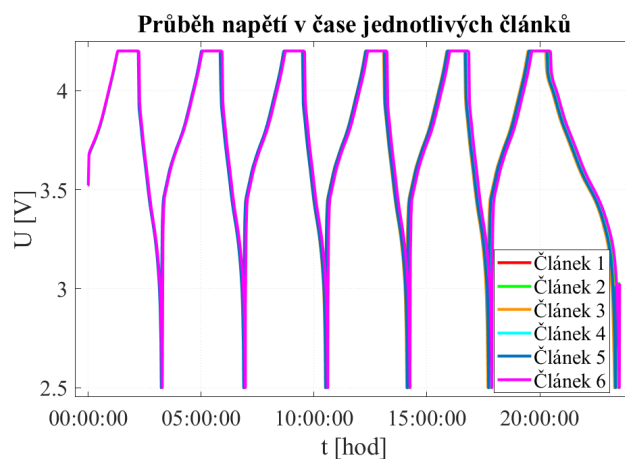
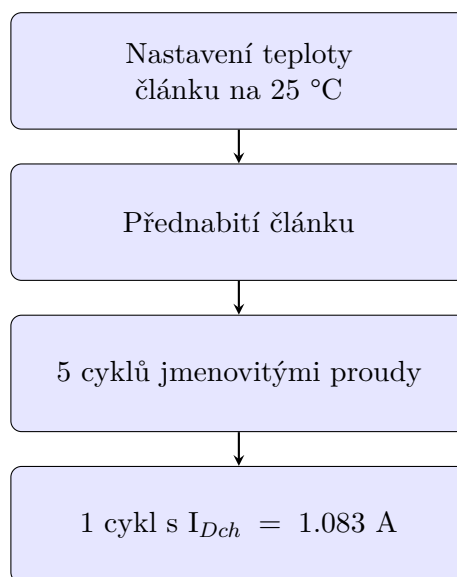
Na obr.(3.1) je foto celého systému pro měření bateriových článků. V pravém dolním rohu je tester Neware spolu s jeho řídicí jednotkou. V levém dolním rohu je chladič Industrila Chiller Laserscript zajišťující cirkulaci vody v chladicím systému Cellpodů. V horní části obrázku jsou pak samotné cellpody v kterých byly bateriové články uzavřeny a podrobeny testům při šesti různých teplotách. Cellpody i Neware systém využívají čtyřbodovou metodu pro přesnější měření.

Pro ustálení teploty napříč bateriovým článkem v Cellpodech bylo nutné provést úpravu Cellpodu samotného. Cellpod má teplotní čidlo, dle kterého reguluje teplotu ve spodní části. Toto provedení má za důsledek nerovnoměrné rozložení teploty na článku, jelikož zde nedochází k proudění vzduchu a přenos tepla je zajišťován pouze pomocí konvekce, která není v tomto případě dostatečně silná. Bylo tedy nutné do Cellpodů vedle bateriových článků postavit alespoň malé chladiče, čímž bylo docíleno lepšího přestupu tepla a mělo to za následek vyrovnání teplot napříč článkem.

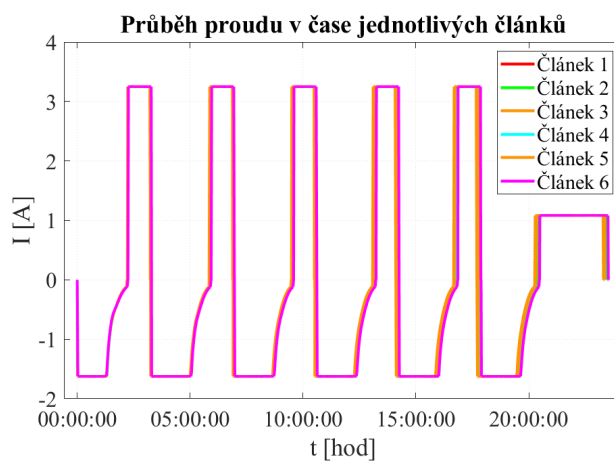
## 3.2 Oživení článku

Obecně platí, že článek je po vyrobení nějakou dobu nepoužíván, proto se musí před prvním testováním oživit („preconditioning test“). Cílem testu je jednak „probudit“ článek a také základně ověřit jeho funkčnost, potažmo vyřadit špatné články.

Oživení článku bylo provedeno následovně:



**Obrázek 3.5:** Průběh napětí všech článků při „pre-conditioning testu“.

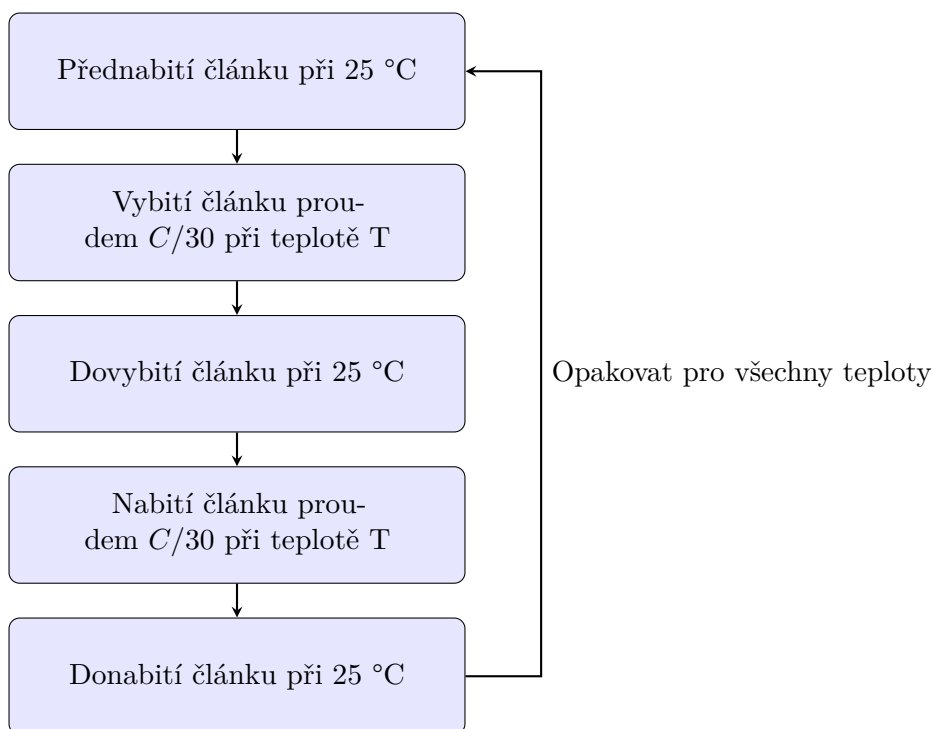


**Obrázek 3.6:** Průběh proudů všech článků při „pre-conditioning testu“.

Z obrázku (3.5) je patrné, že všech 6 článků je velmi podobných a nenachází se mezi nimi žádný vadný. Pokud by některý článek měl výrazně jiný průběh, bylo by nutné udělat rozbor naměřených dat a zjistit zda je vadný.

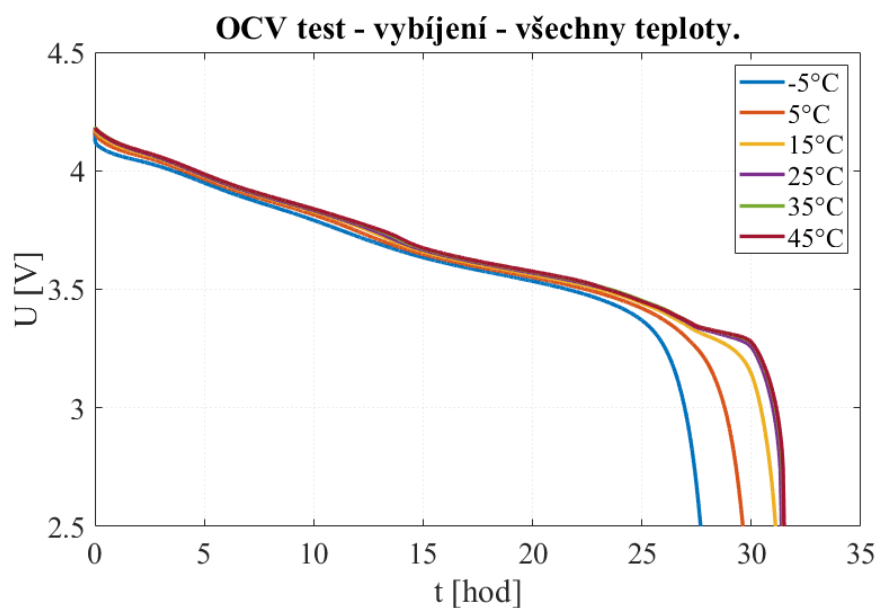
### 3.3 Kvazi-OCV test

Z časového důvodu byl pro získání OCV parametru zvolen Kvazi-OCV test jehož metodika je popsána v podkapitole (2.4.1). Provedený Kvazi-OCV test měl následující proceduru.

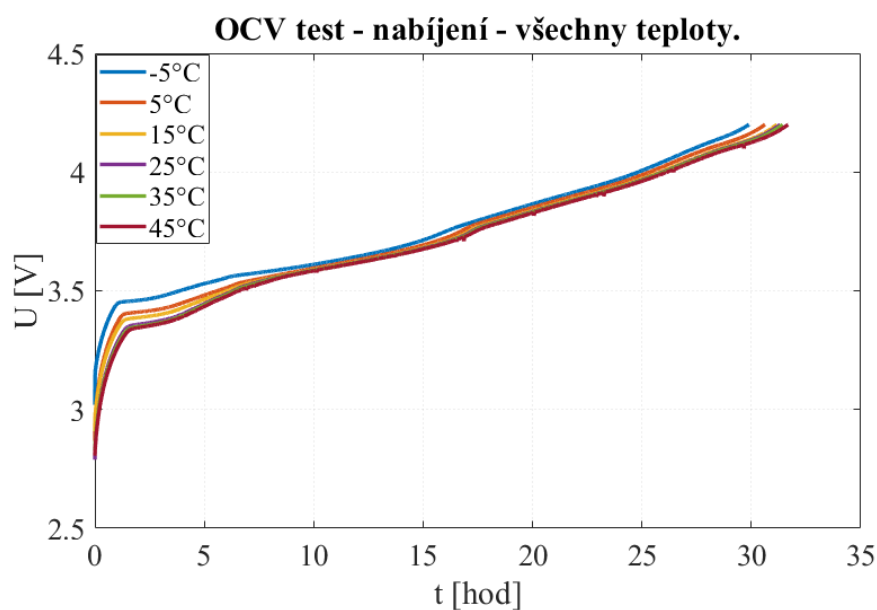




### 3.3.1 Naměřené hodnoty



**Obrázek 3.7:** Kvazi-OCV vybíjecí test, teplotní závislost.



**Obrázek 3.8:** Kvazi-OCV nabíjecí test, teplotní závislost

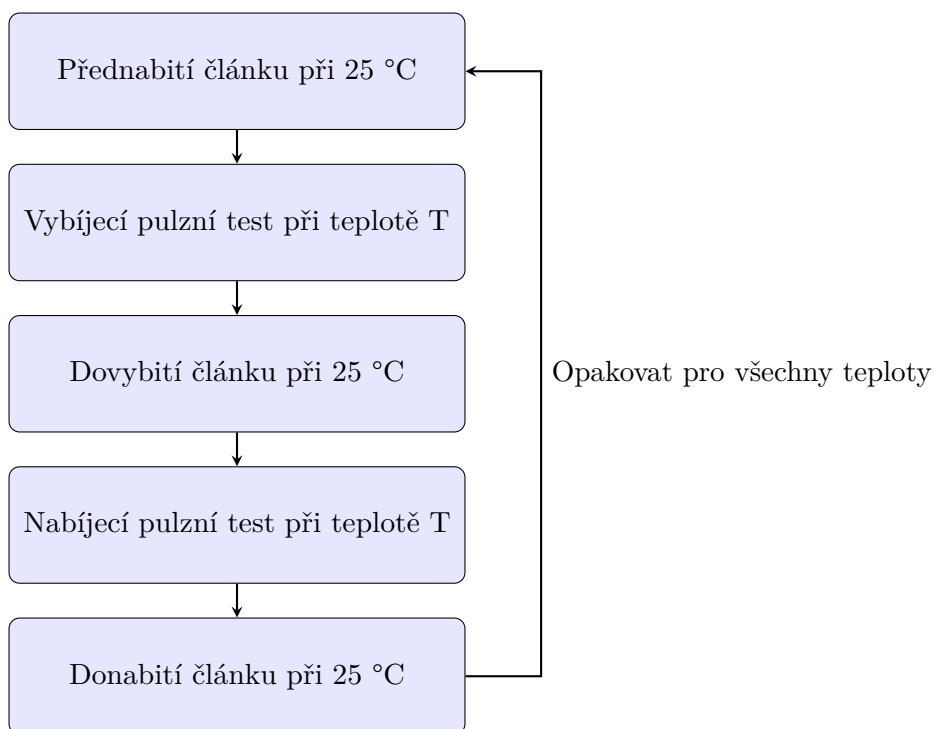
Z obr.(3.7) a (3.8) je vidět, že s klesající teplotou článku klesá doba vybíjení. Z obr.(3.8) je vidět, že s klesající teplotou klesá celkový nabíjecí čas. Na obr. (3.7) je vyobrazen průběh napětí při vybíjecím kroku OCV testu. Jsou zde vyobrazeny všechny měřené teploty. Z křivek je vidět, že s klesající teplotou klesá napětí naprázdno a také doba vybíjení. Oboje je podmíněno zvyšujícím se vnitřním odporem článku, což znamená jak vyšší úbytek napětí, tak nižší kapacitu článku.

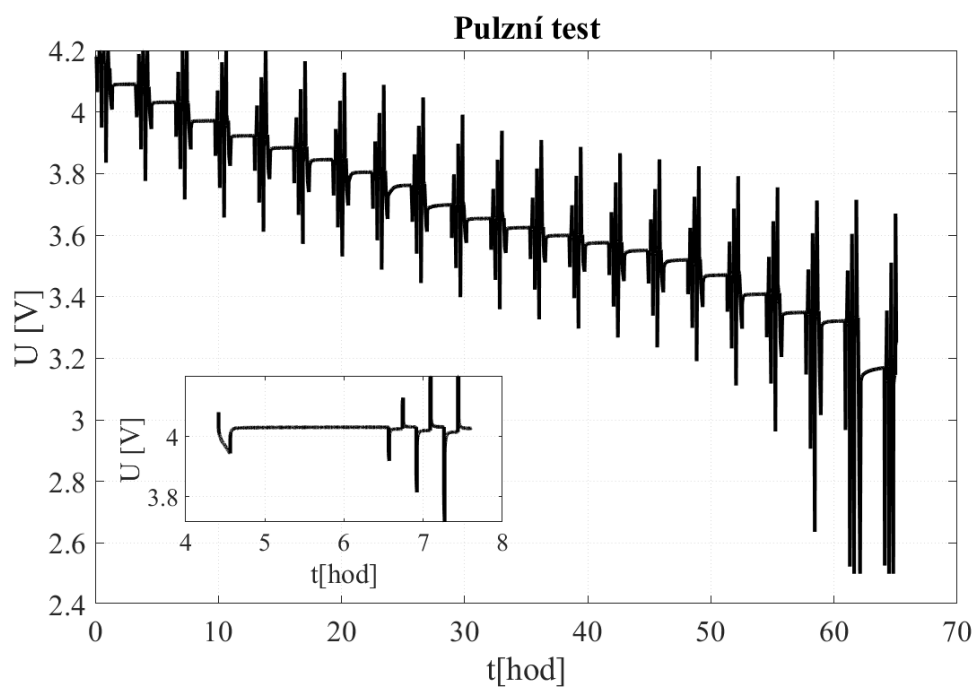
Nižší napětí naprázdno je důsledkem vyššího vnitřního odporu a nižší kapacita článku je důsledkem pomalejších transportních a kinetických mechanismů, tedy nižší rychlostí reakcí.

Na obr. (3.8) je vyobrazen průběh napětí při nabíjecím kroku OCV testu pro všechny měřené teploty. Je vidět, že počáteční napětí roste s klesající teplotou a délka nabíjení roste se zvyšující se teplotou jelikož roste kapacita článku.

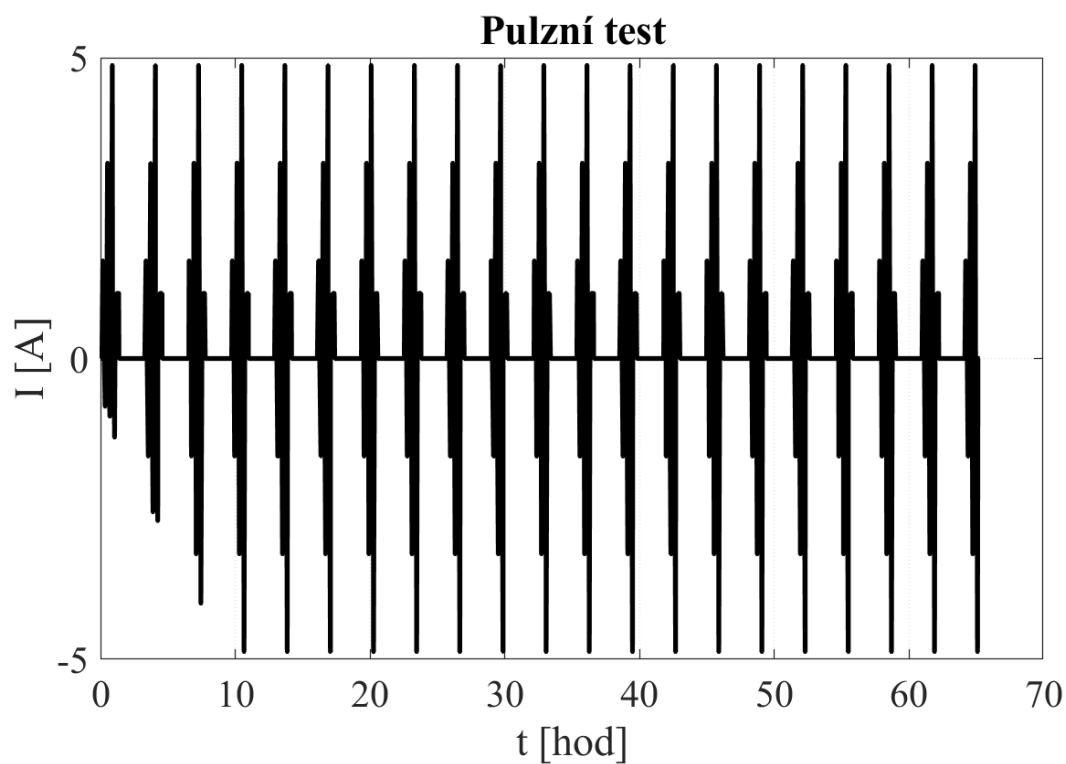
### 3.4 Pulzní test

Pro parametrizaci RC členů byla zvolena varianta testu „pulse train“. Test byl proveden na celém rozsahu SOC s 5-ti procentním rozlišením. Podstatou testu bylo zjistit jak teplotní, tak SOC závislost RC parametrů článku. Pulzní test měl následující proceduru:

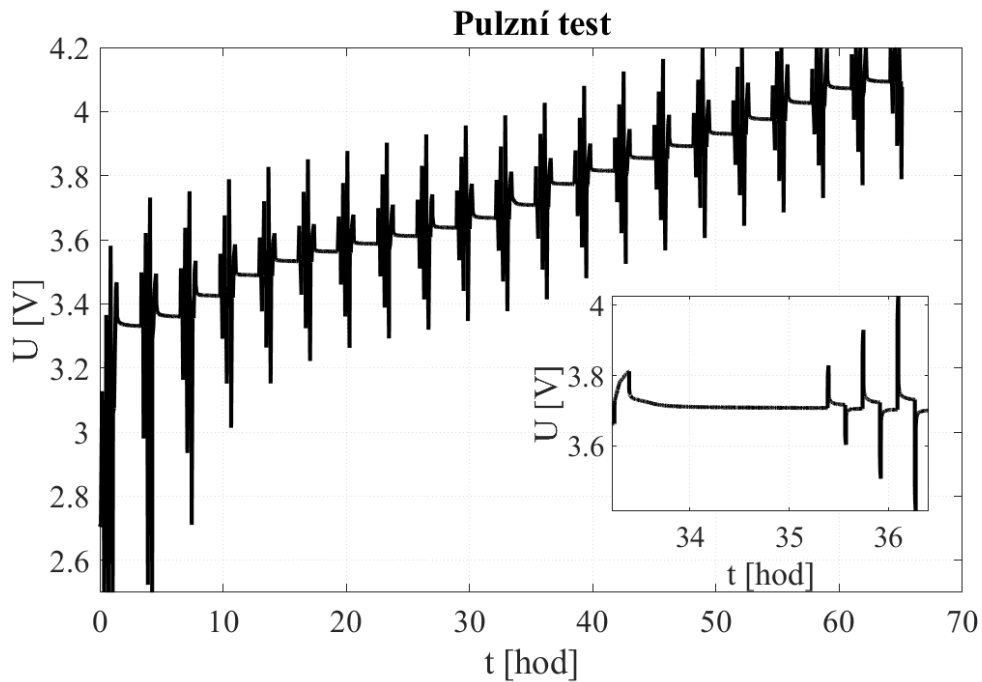




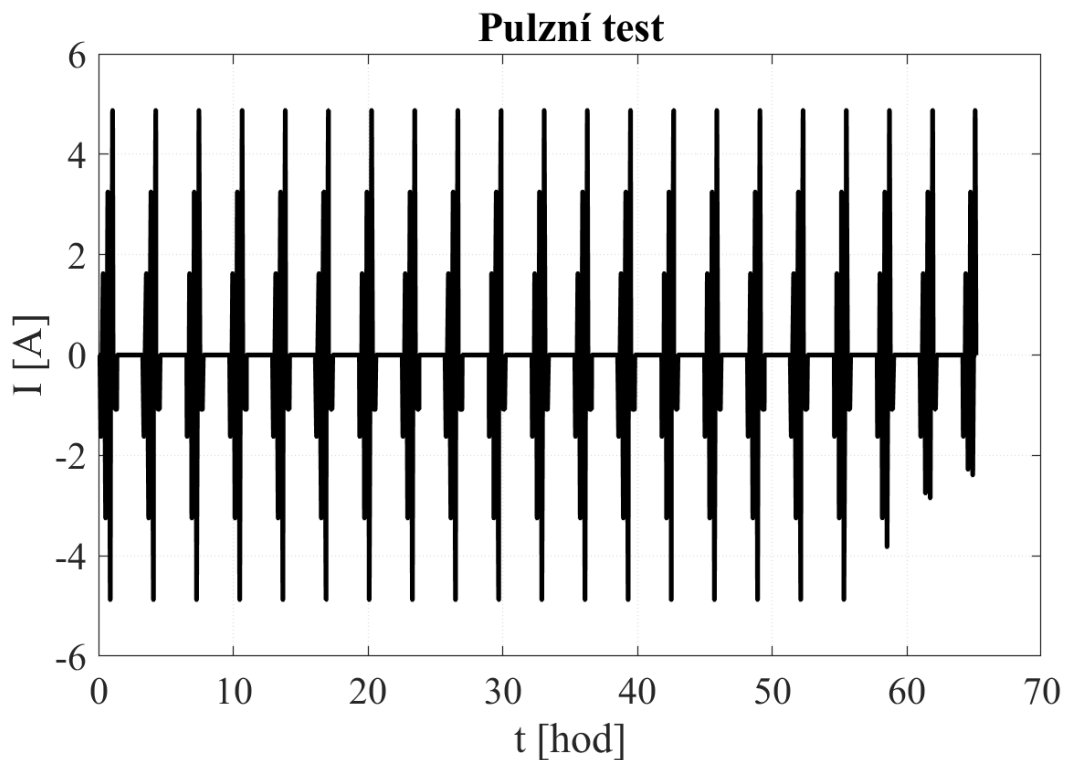
Obrázek 3.9: Průběh napětí – vybíjecí pulzní test.



Obrázek 3.10: Průběh proudu – vybíjecí pulzní test.



Obrázek 3.11: Průběh napětí – nabíjecí pulzní test.



Obrázek 3.12: Průběh proudu – nabíjecí pulzní test.

Na obr. (3.9) a (3.10) jsou vyobrazeny průběhy napětí resp. proudu při vybíjecím pulzním testu při teplotě 25 °C. Článek byl nejprve vybit konstantním proudem o velikosti  $I = 0.108$  A

o 5 % SOC a poté byla provedena následující série proudových pulzů:

Proud [A]	délka pulzu [s]
1.625	30
-1.625	30
3.250	30
-3.250	30
4.875	30
-4.875	30

**Tabulka 3.1:** Tabulka sekvence proudů ve vybíjecím pulzním testu.

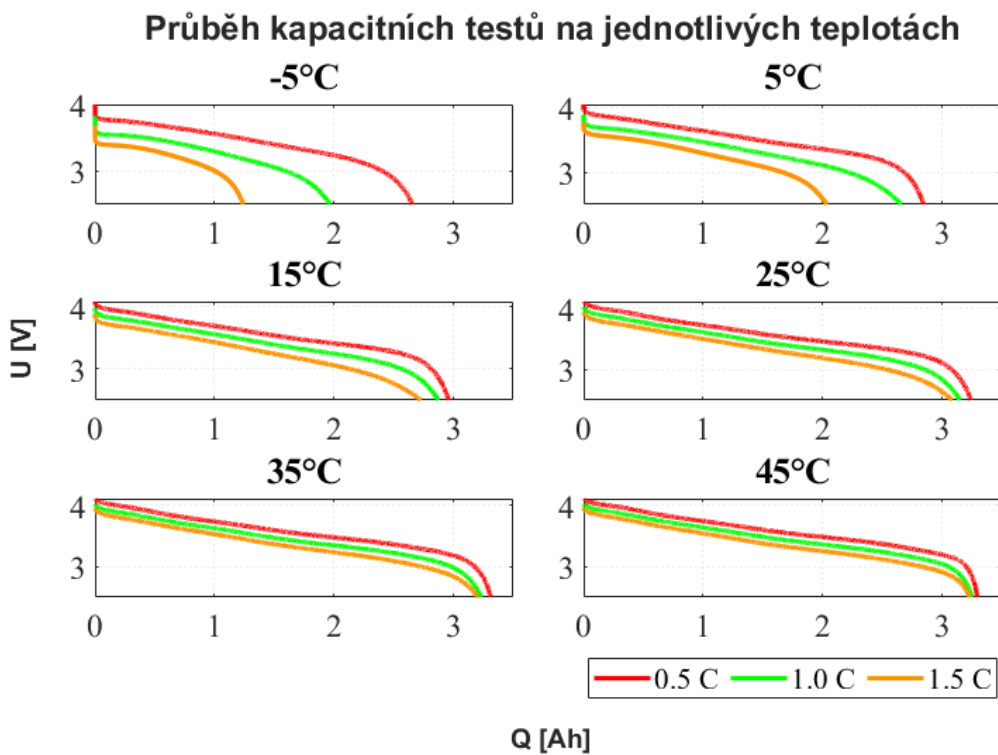
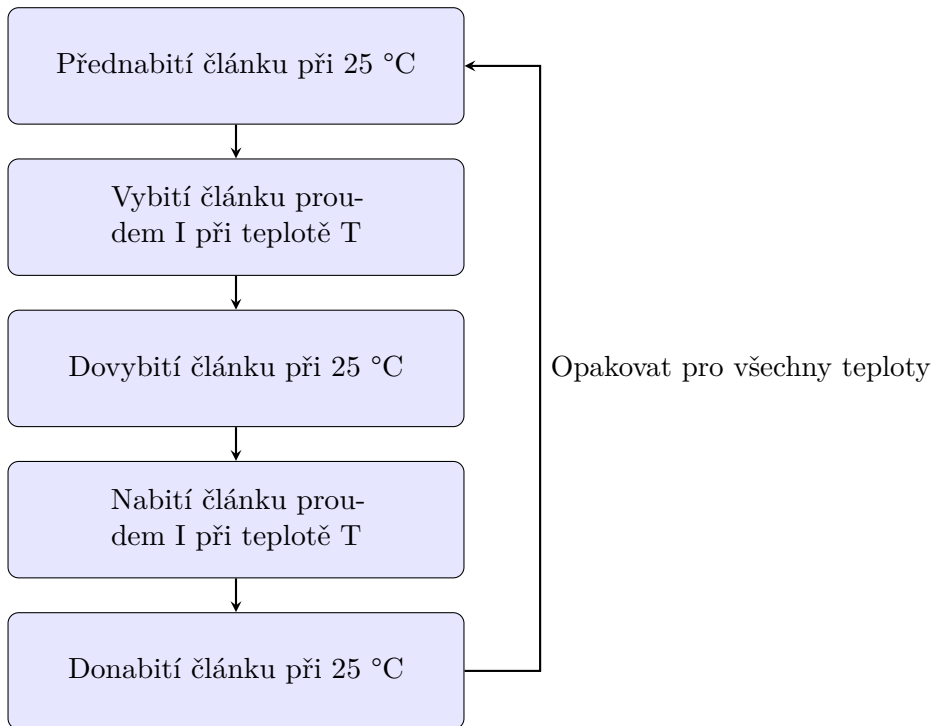
Na obr. (3.11) a (3.12) jsou vyobrazeny průběhy napětí resp. proudu při nabíjecím pulzním testu při teplotě 25 °C. Článek byl nejprve nabit konstantním proudem o velikosti  $I = 0.108 \text{ A}$  o 5 % SOC a poté byla provedena následující série proudových pulzů:

Proud [A]	délka pulzu [s]
-1.625	30
1.625	30
-3.250	30
3.250	30
-4.875	30
4.875	30

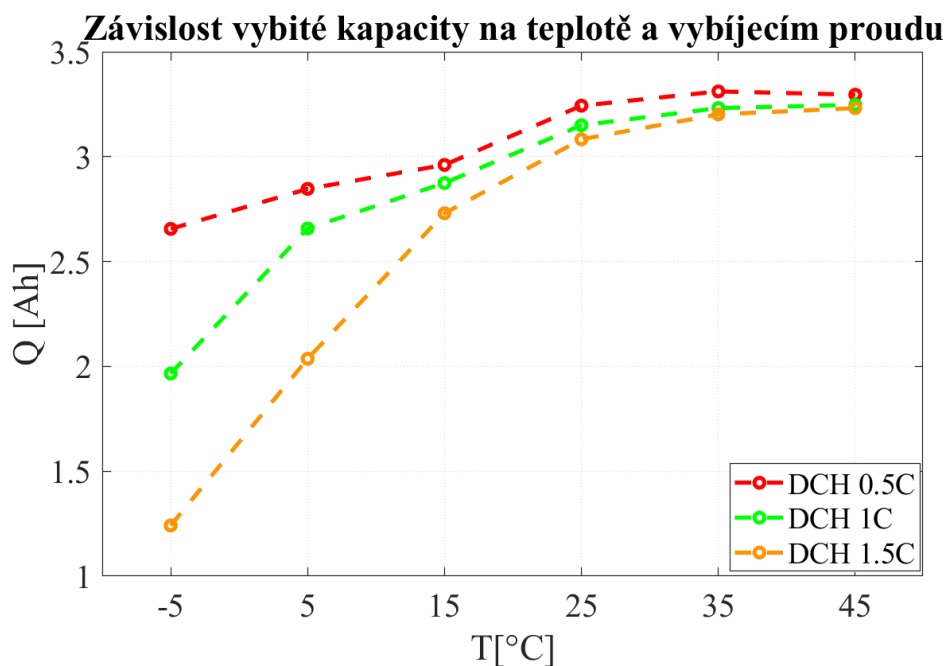
**Tabulka 3.2:** Tabulka sekvence proudů v nabíjecím pulzním testu.

## 3.5 Kapacitní test

Kapacitní test byl proveden pro parametrizaci kinetického modelu. Test byl proveden hodnotami proudů  $I = 0.5 \text{ C} = 1.625 \text{ A}$ ,  $I = 1 \text{ C} = 3.25 \text{ A}$  a  $I = 1.5 \text{ C} = 4.875 \text{ A}$  pro vybíjení i nabíjení. Kapacitní test měl následující proceduru:



Obrázek 3.13: Průběhy jednotlivých vybíjecích kapacitních testů.



**Obrázek 3.14:** Závislost vybité kapacity na teplotě.

Na obr.(3.13) jsou vyobrazeny průběhy jednotlivých vybíjecích kapacitních testů pro všechny testované teploty a proudy. Dále je z obrázku patrné, že čím nižší je teplota článku, tím nižší kapacitu je schopen dodat konstantním proudem. Pro přehlednost je na obr.(3.14) uvedena závislost vybité kapacity na teplotě a vybíjecím proudu. Je vidět, že při nízkých teplotách je vybitá kapacita silně závislá na velikosti vybíjecího proudu, avšak tato závislost s rostoucí teplotou klesá. Dále je patrné, že obecně vybitá kapacita roste s rostoucí teplotou.

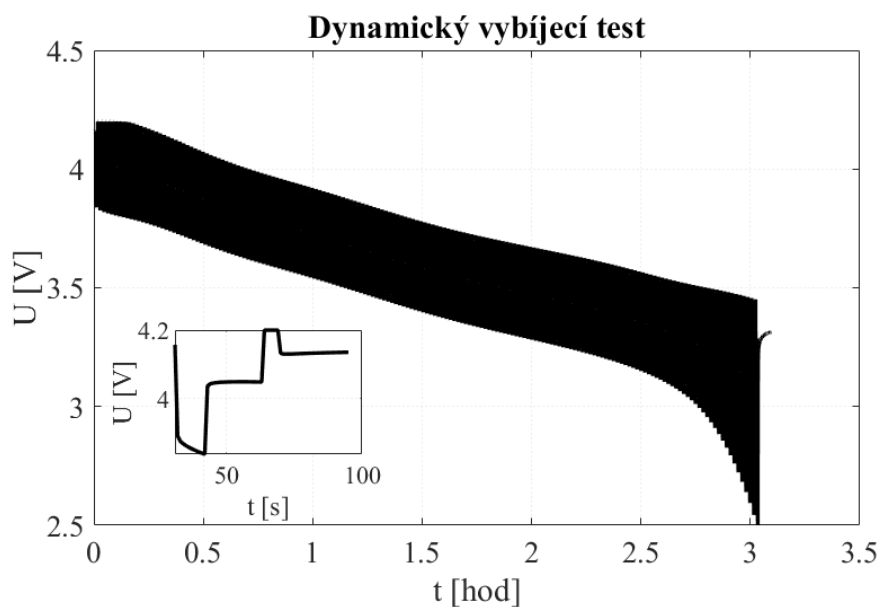
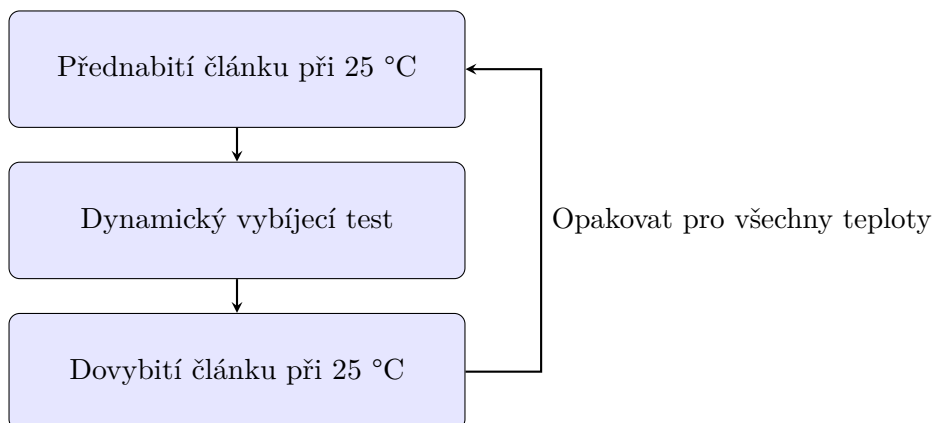
## 3.6 Dynamický vybíjecí test

Dynamický vybíjecí test byl proveden za účelem validace elektrického modelu. Test byl proveden sekvencí tří proudů o různých časových intervalech s následnou 25-ti vteřinovou pauzou. Sekvence proudů je uvedena v následující tabulce.

Proud [A]	délka pulzu [s]
5.2	10
1.3	20
-2.6	5

**Tabulka 3.3:** Dynamický vybíjecí test - tabulka proudových pulzů.

Dynamický vybíjecí test měl následující proceduru:



Obrázek 3.15: Dynamický vybíjecí test – průběh napětí.

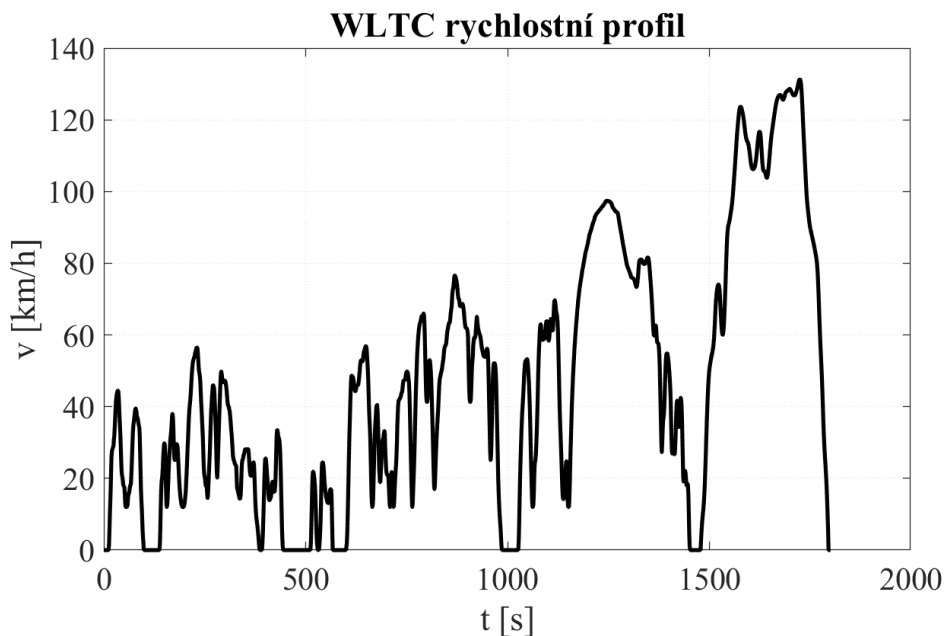
Na obr. 3.15 je vyobrazen průběh napětí při dynamickém vybíjecím testu, v levé spodní části je pro přehlednost vyobrazena detailně jedna sekvence pulzů.

### 3.7 Rychlostní profily

Rychlostní profily jsou standardizované profily pro testování emisí vozidel, jejich spotřeby paliva, nebo proudové zatížení baterie. Profily simulují různé jízdní profily, které může vozidlo zažít v reálném provozu. Pomáhají zjišťovat srovnatelné a opakovatelné výsledky mezi různými vozidly. Škoda auto například uvádí kombinovanou spotřebu a vypuštěné emise  $CO_2/km$  dle WLTC (*Worldwide harmonized light duty driving profile*) profilu [41]. WLTC profil byl využit



pro validaci elektrického i kinetického modelu. Na následujícím obrázku je vyobrazen WLTC rychlostní profil.



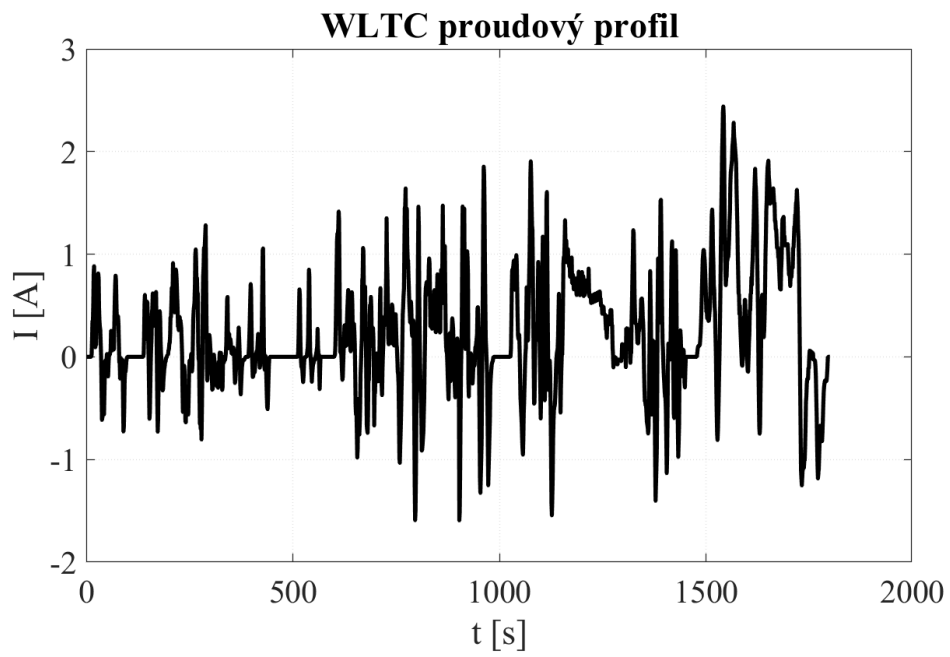
**Obrázek 3.16:** Rychlostní profil WLTC

V rámci aktuálně běžícího projektu TAČR byl vytvořen Jurajem Majerou fyzikální model automobilu Škoda ENYAQ, ke kterému jsem naparametrizoval baterii složenou z NCA článků využitých v této práci (A), aby bylo možné ze simulací dostat WLTC proudový profil. Panu Juraji Majerovi tímto děkuji za možnost využití jeho modelu. Baterie má následující parametry:

$C_N$ [Ah]	208
$U_N$ [V]	360
$N_s$ [-]	100
$N_p$ [-]	64
$I_{max}$ [A]	416

**Tabulka 3.4:** Tabulka parametrů baterie pro fyzikální model automobilu.

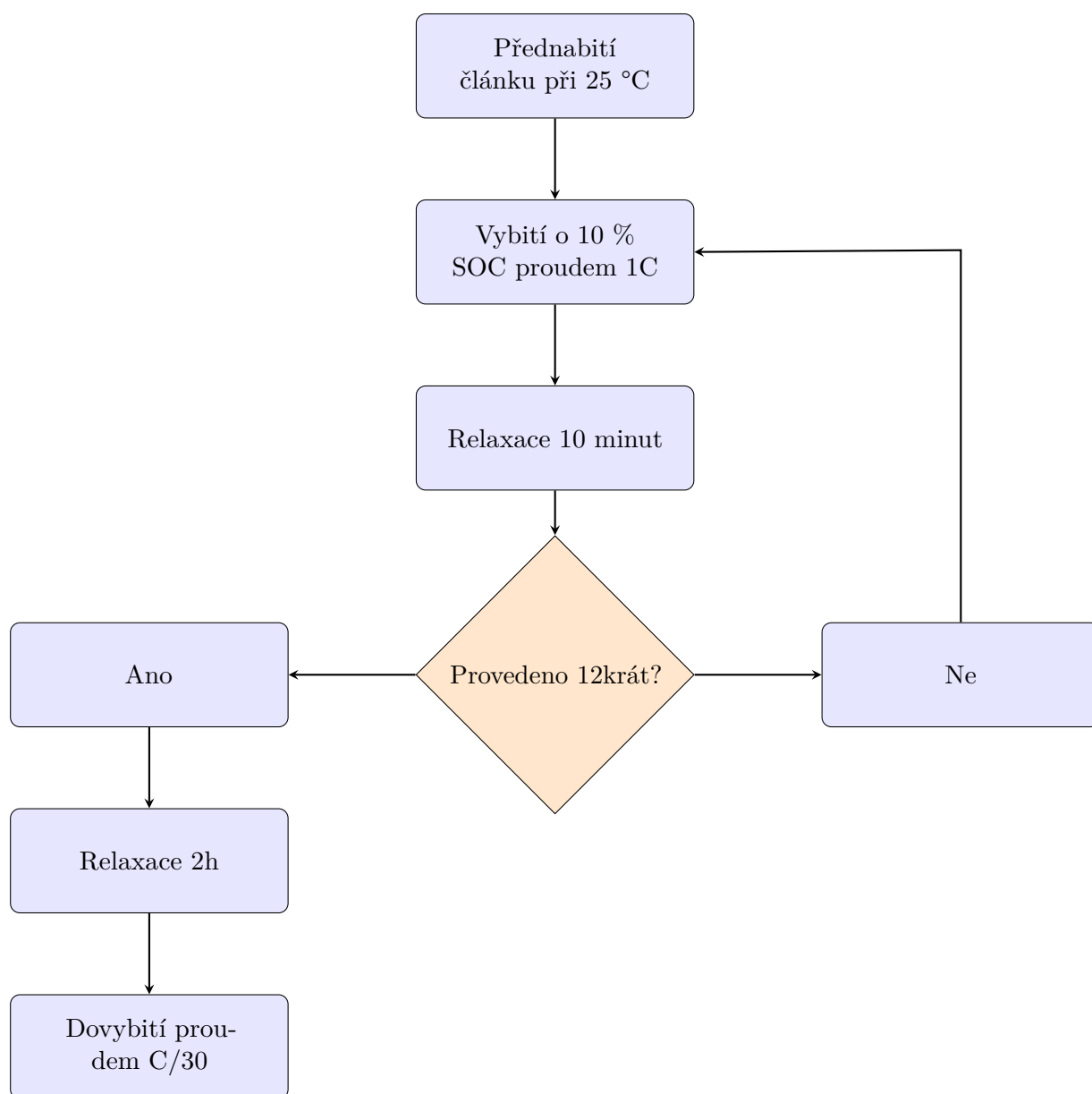
Kde  $C_N$  je jmenovitá kapacita baterie,  $U_N$  je jmenovité napětí,  $N_s$  je počet článků zapojených v sérii,  $N_p$  je počet článků zapojených paralelně a  $I_{max}$  je maximální proud, který může baterie kontinuálně dodávat. Všechny hodnoty jsou dopočteny na základě dat uvedených v příloze (A). Výsledný proudový profil je na následujícím obrázku.

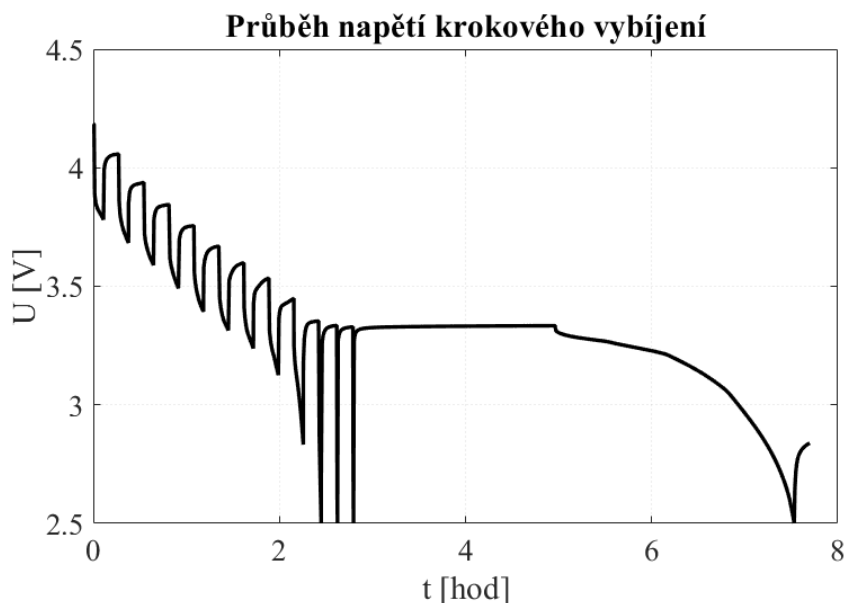


**Obrázek 3.17:** Proudový profil WLTC.

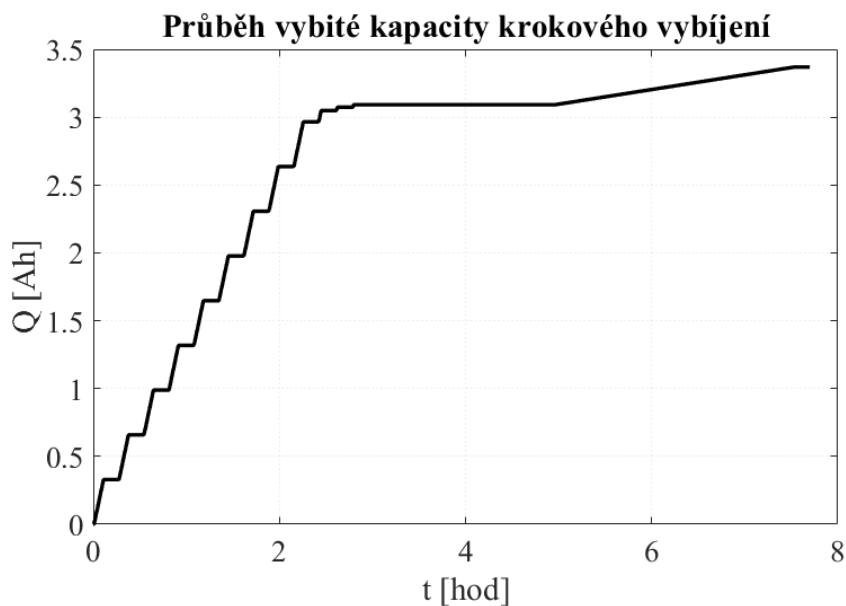
### 3.8 Krokové vybíjení s pauzou

Krokové vybíjení s pauzou bylo vymyšleno pro otestování a ověření kinetického modelu. Smyslem tohoto testu bylo zachytit tzv. *charge recovery effect* a nelinearitu kapacity. Test byl koncipován následovně:





**Obrázek 3.18:** Průběh napětí krokového vybíjení s pauzou.



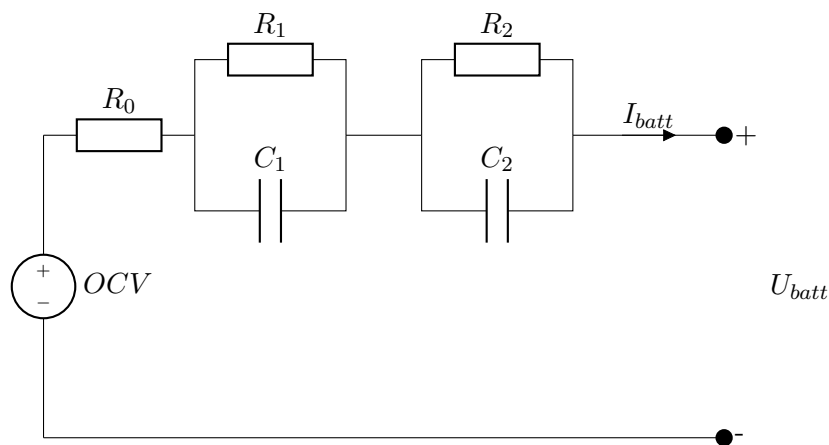
**Obrázek 3.19:** Průběh naměřené vybité kapacity krokového vybíjení s pauzou.

Tento test byl proveden při počáteční teplotě 18 °C. Na obr.(3.18) je vyobrazen průběh napětí při krokovém vybíjení. Na obr.(3.19) je vyobrazen průběh vybité kapacity při krokovém vybíjení. Test byl cíleně koncipován tak, aby se pokusil vybit více než 100 % kapacity článku. Z obrázku lze pozorovat, že článek poprvé dosáhne minimální hodnoty napětí 2.5 V při 10-tém kroku, kde vybitá kapacita v tomto kroku klesla z původních 0.328 Ah na 0.820 Ah. Celková vybitá kapacita v této části testu je 3.06 Ah. Po následné dvouhodinové pauze byl článek dovybit proudem  $C/30$ . Celková vybitá kapacita při tomto testu dosáhla hodnoty 3.35 Ah.

## Kapitola 4

### Navržený elektrický model

V kapitole (1.1) jsou popsány možnosti parametrizace elektrického modelu. V této části je podrobně popsán postup vytvoření a parametrizace elektrického modelu lithium-iontového článku z naměřených dat uvedených v kap.(3). Pro přehlednost je níže opět uveden vybraný elektrický model a rovnice ho popisující.



Obrázek 4.1: Zvolený elektrický model.

$$U_{batt} = OCV - I_{batt} \cdot R_0 - I_{R_1} \cdot R_1 - I_{R_2} \cdot R_2 \quad (4.1)$$

$$\frac{dI_{R_1}}{dt} = -\frac{I_{R_1}}{R_1 \cdot C_1} + \frac{I_{batt}}{R_1 \cdot C_1} \quad (4.2)$$

$$\frac{dI_{R_2}}{dt} = -\frac{I_{R_2}}{R_2 \cdot C_2} + \frac{I_{batt}}{R_2 \cdot C_2} \quad (4.3)$$

#### 4.1 Parametrizace OCV

Prvním krokem pro získání výsledného OCV je zpracování naměřených dat z (3.3) pro 25 °C. Máme k dispozici nabíjecí a vybíjecí křivku napětí. Dle [12] lze odhadnout velikost odporu  $R_0$  v místech 100 % a 0 % SOC pomocí poklesu napětí mezi posledním bodem kdy je proud nulový a prvním bodem kdy je proud nenulový. Také lze odhadnout  $R_0$  v 50 % SOC a to jako rozdíl hodnoty napětí nabíjecí a vybíjecí křivky v tomto bodě. Dále je nutné přijmout předpoklad, že mezi těmito třemi body se  $R_0$  mění lineárně. OCV křivku pak lze sestavit

ve dvou krocích. V prvním kroku se sestrojí OCV pro rozsah 100 % - 50 % SOC z vybíjecí křivky, kde se k vybíjecí křivce přičte úbytek napětí na odporu  $R_0$ .

$$U_{prid} = R_0(SOC) \cdot I \quad (4.4)$$

$$OCV_{100-50} = U_{vyb} + U_{prid}, \quad (4.5)$$

kde  $U_{vyb}$  je naměřená napěťová vybíjecí křivka.

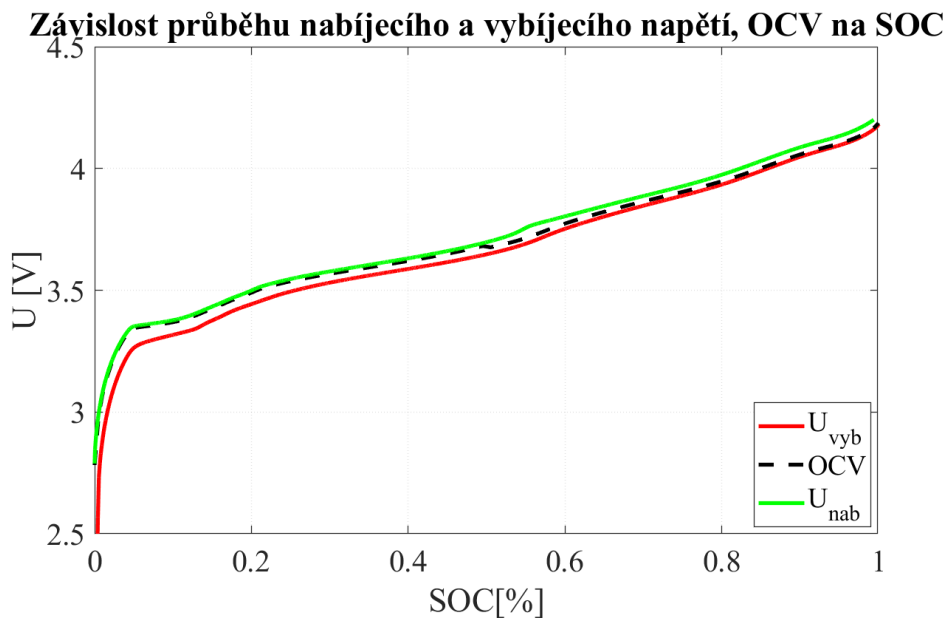
V druhém kroku se sestrojí OCV pro rozsah 50 % - 0 % SOC. Postup je stejný jako v prvním kroku s rozdílem, že úbytek napětí na odporu  $R_0$  se odečte od nabíjecí křivky.

$$U_{odebr} = R_0(SOC) \cdot I \quad (4.6)$$

$$OCV_{50-0} = U_{nab} - U_{odebr}, \quad (4.7)$$

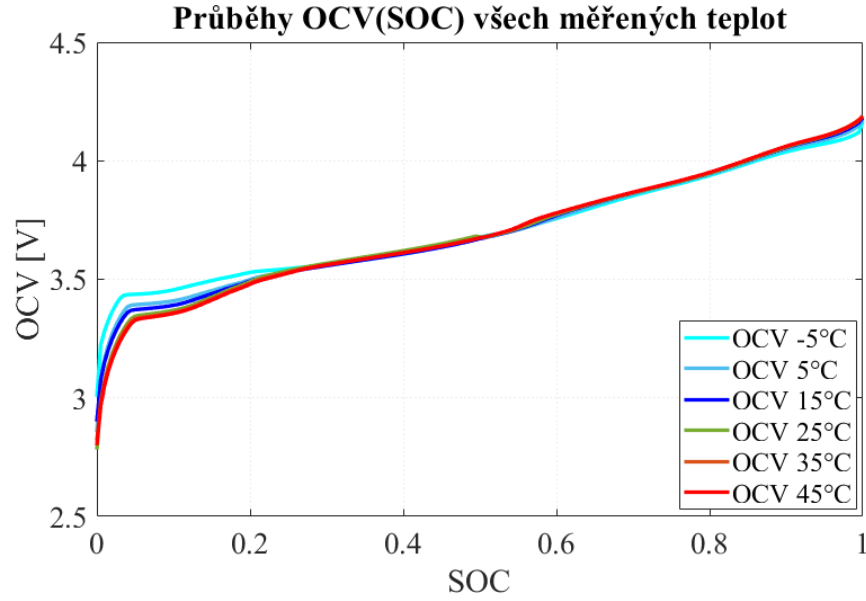
kde  $U_{nab}$  je naměřená napěťová nabíjecí křivka.

Výsledné OCV je pak složení těchto dvou křivek dohromady. Výsledné OCV při 25 °C je vyobrazeno na následujícím obrázku spolu s nabíjecí a vybíjecí křivkou.



**Obrázek 4.2:** Graf OCV(SOC) při 25 °C.

Na následujícím obrázku jsou vyobrazeny průběhy všech výsledných OCV křivek vypočtených z měření.



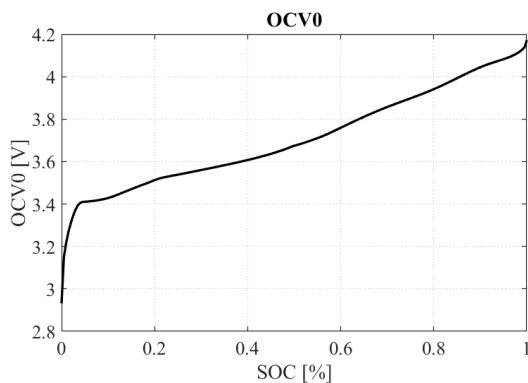
**Obrázek 4.3:** Teplotní závislost OCV(SOC) křivek.

V tento moment jsou k dispozici křivky OCV pro 6 teplot. Aplikací vztahu (2.10) dostaneme *lookup* tabulku pro  $OCV_0(SOC)$  a  $OCV_{rel}(SOC)$ :

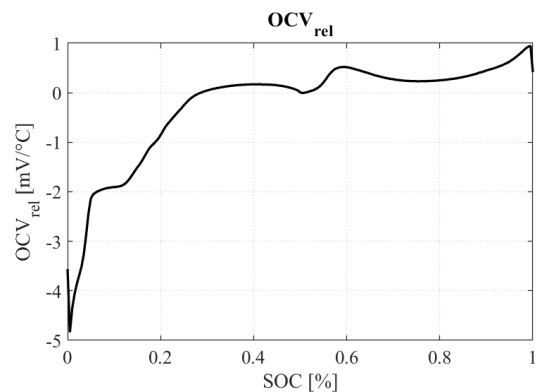
$$\begin{pmatrix} OCV(SOC)(-5^\circ \text{C}) \\ OCV(SOC)(5^\circ \text{C}) \\ OCV(SOC)(15^\circ \text{C}) \\ OCV(SOC)(25^\circ \text{C}) \\ OCV(SOC)(35^\circ \text{C}) \\ OCV(SOC)(45^\circ \text{C}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -5 \\ 1 & 5 \\ 1 & 15 \\ 1 & 25 \\ 1 & 35 \\ 1 & 45 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} OCV_0(SOC) \\ OCV_{rel}(SOC) \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Rovnice (4.8) je lineární systém, který lze vyřešit metodou nejmenších čtverců.

Řešení rovnice (4.8) je  $OCV_0(SOC)$  a  $OCV_{rel}(SOC)$ . Tyto dva vektory definují dle rovnice (2.10) výsledný OCV model.



**Obrázek 4.4:** Průběh  $OCV_0(SOC)$ .

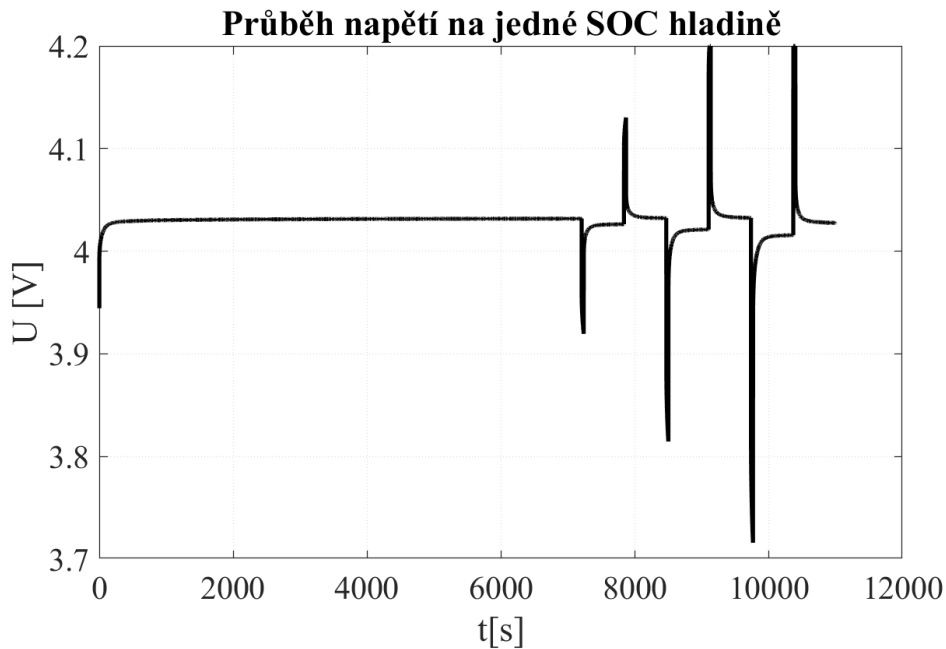


**Obrázek 4.5:** Průběh  $OCV_{rel}(SOC)$ .

Na obr.(4.4) a (4.5) jsou vyobrazeny výsledné  $OCV_0(SOC)$  a  $OCV_{rel}(SOC)$ .

## 4.2 Parametrizace $R_0$ a RC členů

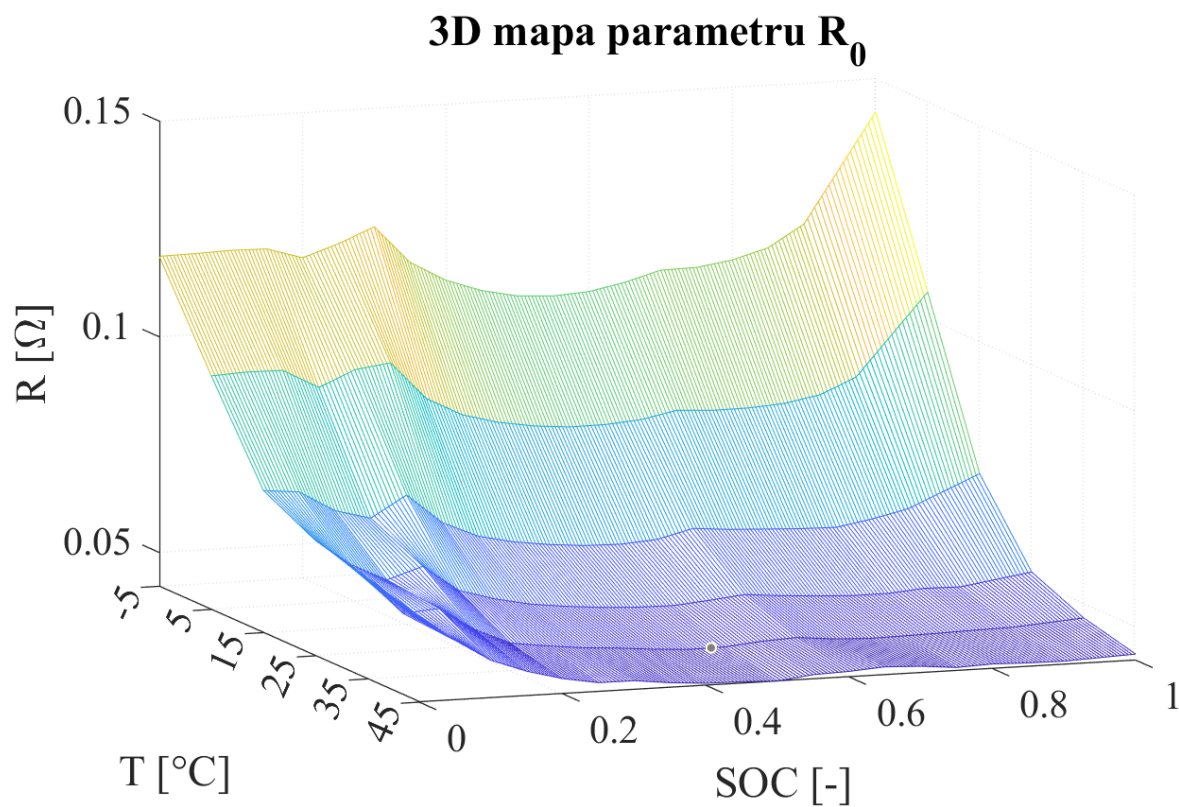
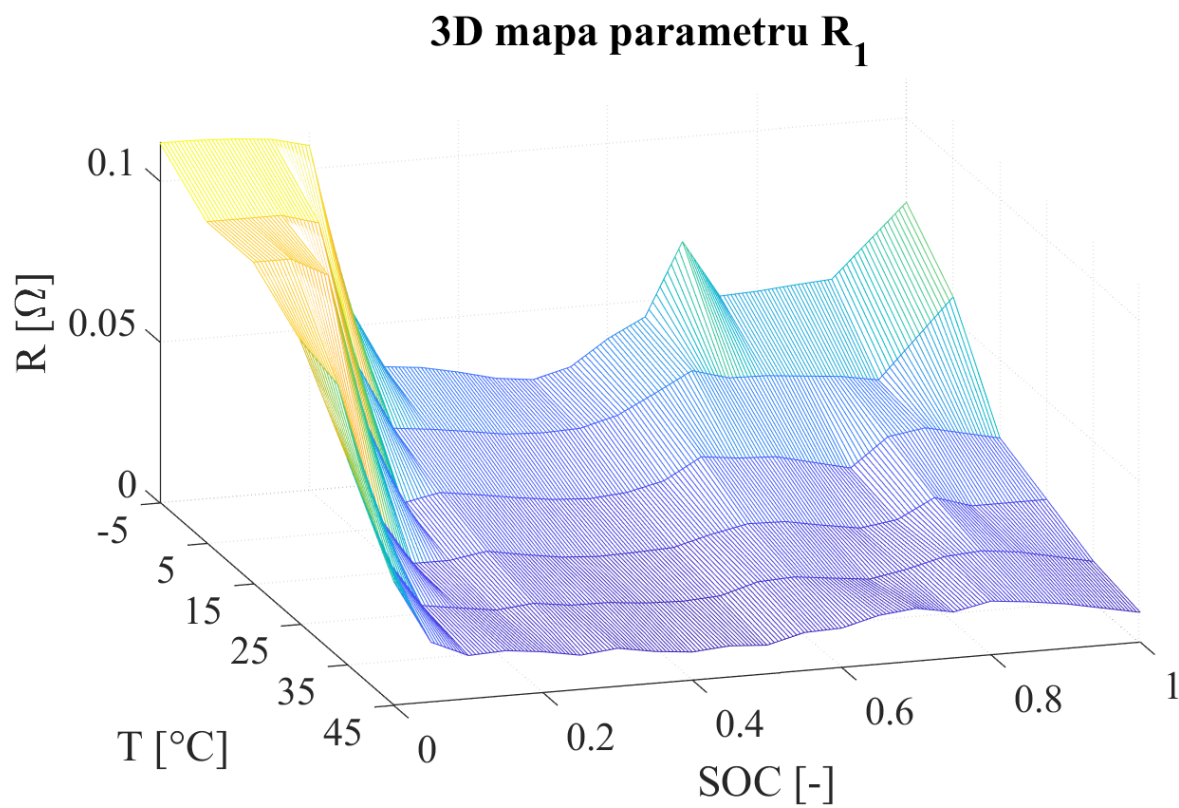
Zbývající prvky náhradního obvodu byly parametrizovány na pulzním testu popsaném v (3.4). Pro parametrizaci byla využita metoda prediction error minimization („PEM“) [38], která je implementována v Matlab v System identification toolboxu.



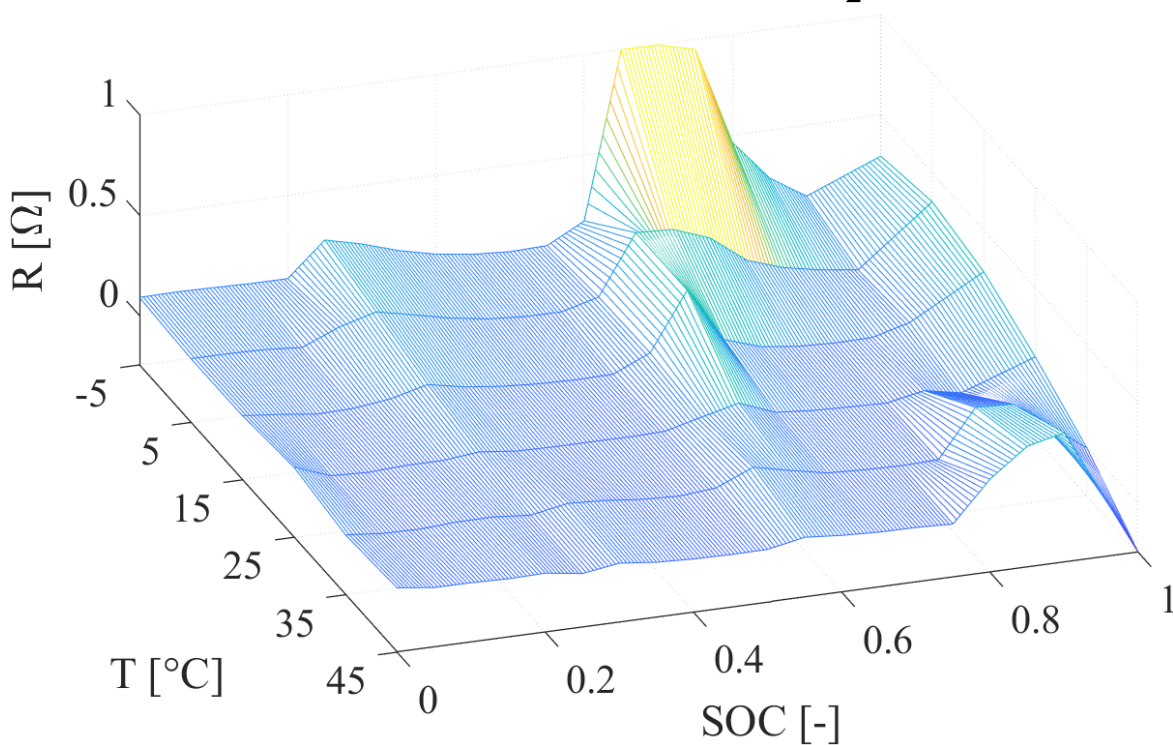
**Obrázek 4.6:** Vizuální ukázka dat pro parametrizaci.

Na obr.(4.6) jsou vyobrazena data ze kterých byla provedena parametrizace na jedné SOC hladině. Začátkem parametrizačních dat byla dvouhodinová relaxace, po které následovala série pulzů. Pro korekci bylo počítáno i se změnou SOC při pulzech. Pro dosažení SOC a teplotní závislosti jednotlivých parametrů byla identifikace provedena na 5ti procentním kroku SOC v rozmezí 95 % – 5 % SOC pro šest teplot. Následně byly data extrapolována do 100 % a 0 % SOC. Výsledkem jsou níže vyobrazené 3D mapy jednotlivých parametrů.



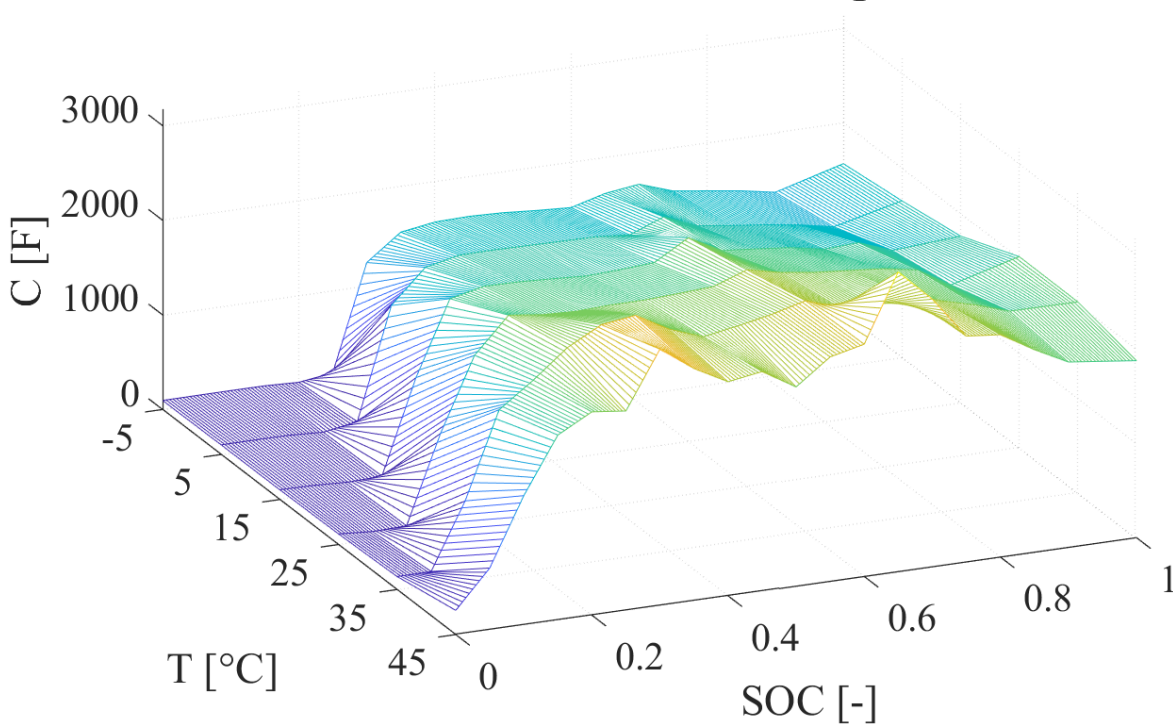
Obrázek 4.7: 3D mapa parametru  $R_0$ .Obrázek 4.8: 3D mapa parametru  $R_1$ .

### 3D mapa parametru $R_2$



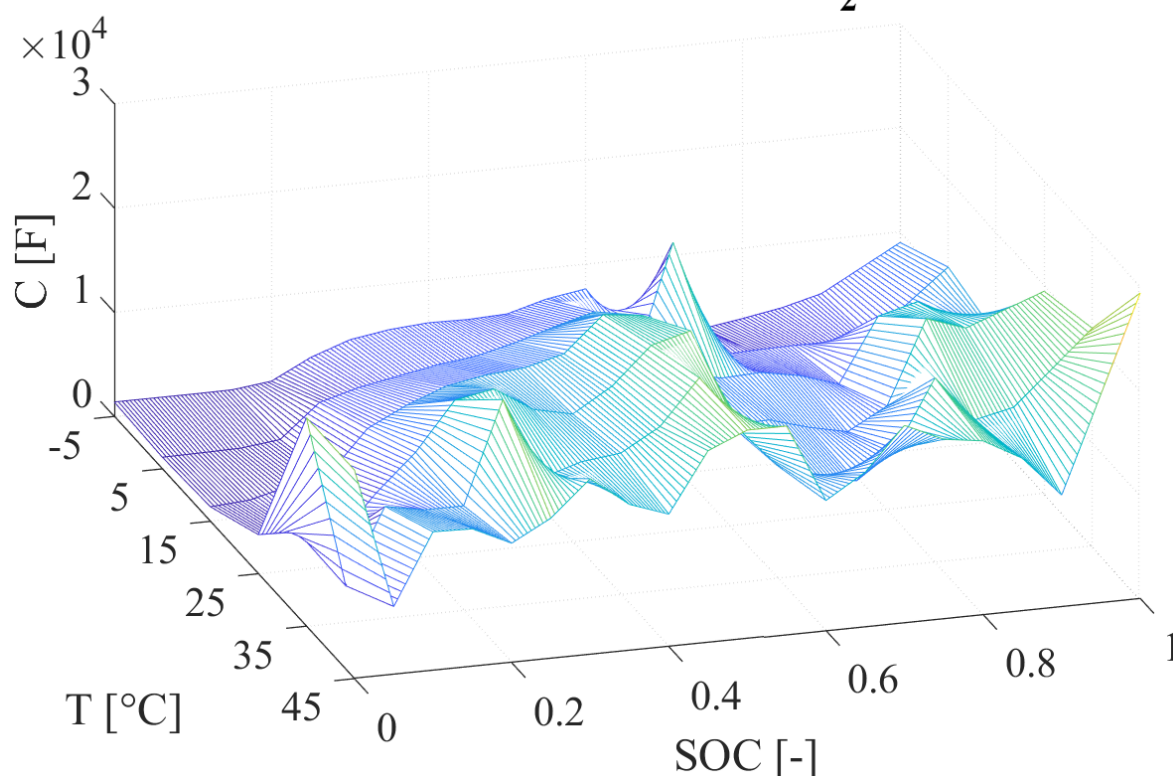
Obrázek 4.9: 3D mapa parametru  $R_2$ .

### 3D mapa parametru $C_1$



Obrázek 4.10: 3D mapa parametru  $C_1$ .

### 3D mapa parametru $C_2$



Obrázek 4.11: 3D mapa parametru  $C_2$ .

Z obrázků je patrné, že parametry  $R_0$  a  $R_1$  mají exponenciální závislost na SOC a zároveň exponenciální teplotní závislost. Oproti tomu parametr  $R_2$  tuto závislost nemá.

## 4.3 Testování a ověření navrženého elektrického modelu

Výsledný elektrický model byl testován a validován na dynamickém vybíjecím profilu a na rychlostních profilech. Vstupními daty do modelu jsou proud, teplota, časový krok. Samotná ověření pak byla provedena pomocí grafického průběhu a střední kvadratické chyby, která je v MATLABu definována jako:

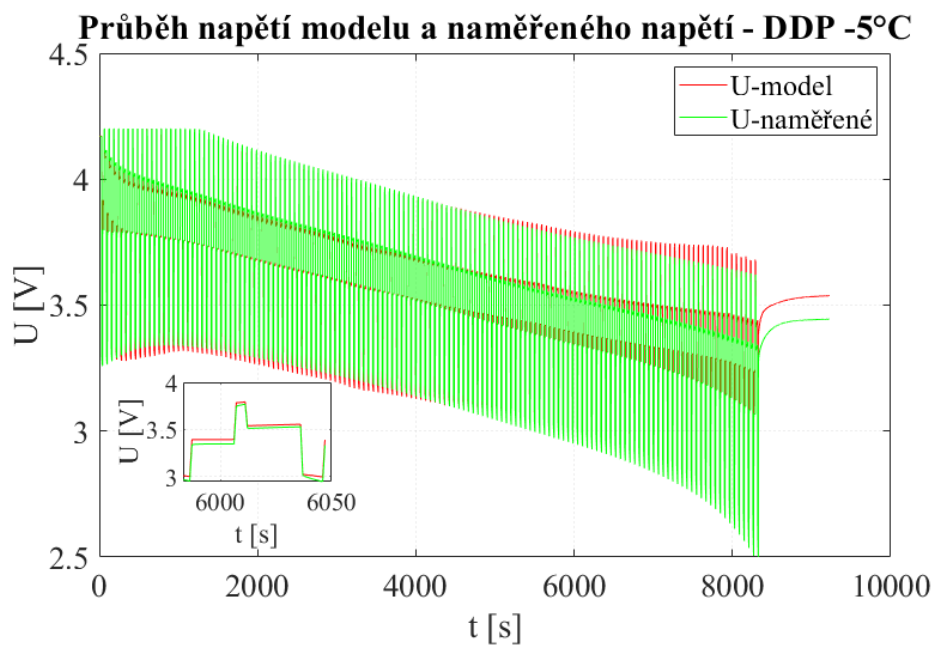
$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - F_i|^2} \quad (4.9)$$

kde  $A_i$  je reálná  $i$ -tá hodnota a  $F_i$  je  $i$ -tá předpovězená hodnota. Vstupními daty do modelu jsou vektory proudu, teploty, SOC na počátku testu a počáteční stav napětí na RC členech.

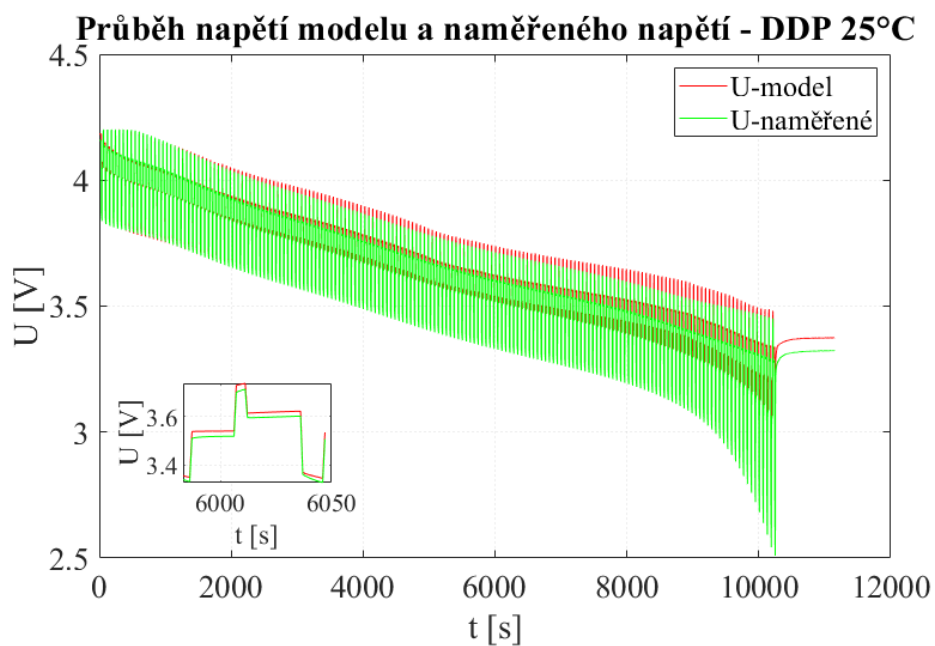
### 4.3.1 Testování a ověření na dynamickém vybíjecím testu

Testování a ověření modelu na dynamickém vybíjecím testu byla provedena na šesti teplotách  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $35\text{ }^\circ\text{C}$  a  $45\text{ }^\circ\text{C}$ . Pro přehlednost jsou uvedeny grafické průběhy při

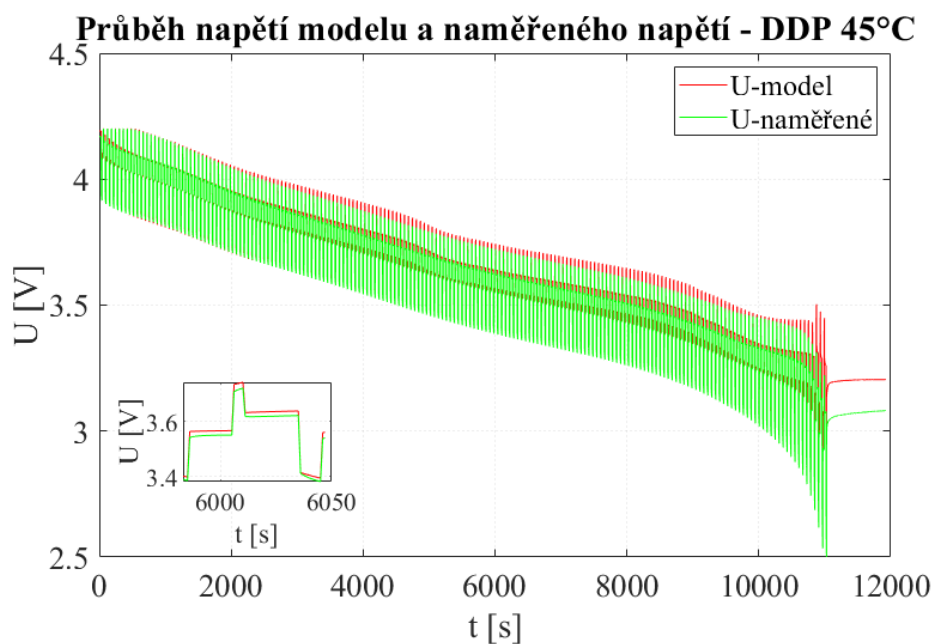
-5 °C, 25 °C a 45 °C. Střední kvadratická chyba je pak uvedena pro všechny teploty.



**Obrázek 4.12:** Ověření na DDP -5 °C.



**Obrázek 4.13:** Ověření na DDP 25 °C.



Obrázek 4.14: Ověření na DDP 45 °C.

Na obr.(4.12)-(4.14) jsou vyobrazeny napěťové průběhy dynamických vybíjecích testů při teplotách -5 °C, 25 °C a 45 °C.

#### ■ Střední kvadratické chyby - DDP

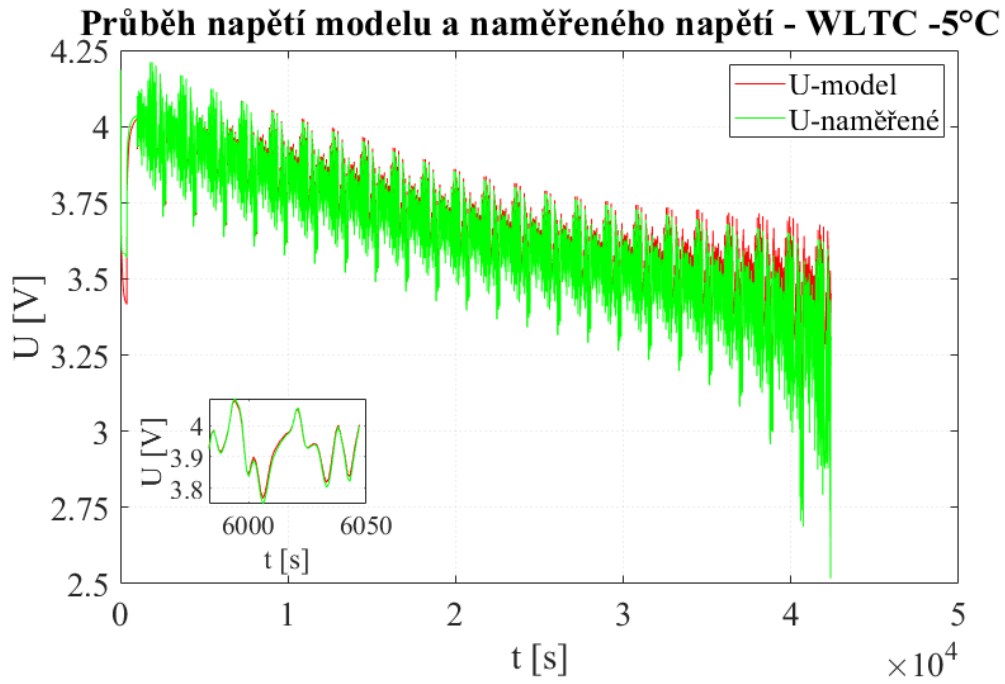
Následující tabulka uvádí střední kvadratické chyby jednotlivých validačních testů. Hodnoty jsou vypočítány dle (4.9).

Teplota [°C]	RMSE [mV]
-5	56.7
5	51.1
15	51.0
25	45.8
35	40.8
45	49.0

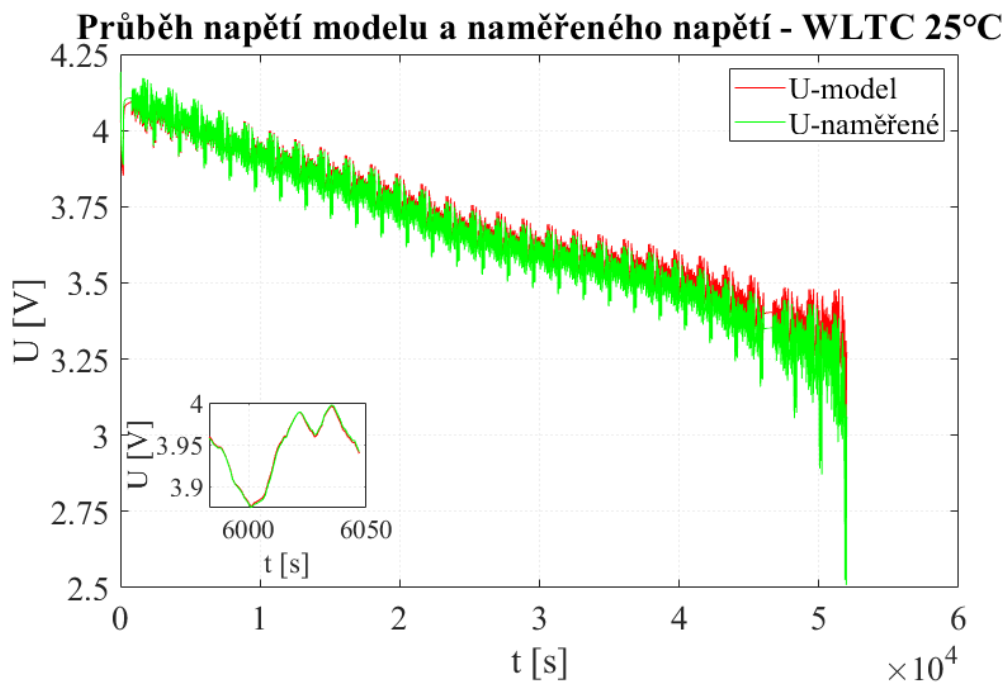
Tabulka 4.1: Tabulka středních kvadratických chyb pro DDP test.

#### ■ 4.3.2 Testování a ověření na WLTC profilu

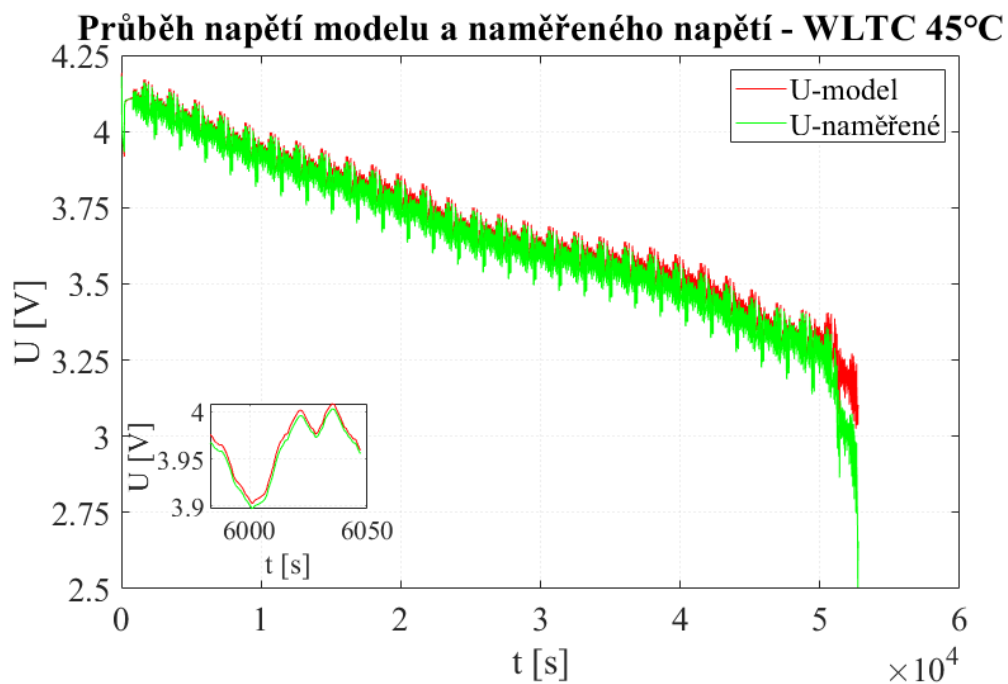
Testování a ověření na WLTC profilu byla provedena pouze na třech teplotách -5 °C, 25 °C a 45 °C. WLTC profil byl s deseti vteřinovou pauzou opakován až do poklesu napětí článku na 2.5 V. Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny jednotlivé průběhy simulace a měření na jednotlivých teplotách.



Obrázek 4.15: Ověření WLTC -5 °C.



Obrázek 4.16: Ověření WLTC 25 °C.



Obrázek 4.17: Ověření WLTC 45 °C.

Na obr.(4.15) - (4.17) jsou vyobrazeny průběhy WLTC profilu při -5 °C, 25 °C a 45 °C.

#### ■ Střední kvadratické chyby - WLTC

V následující tabulce jsou uvedeny střední kvadratické chyby jednotlivých testů dle (4.9).

Teplota [°C]	RMSE [mV]
-5	58.0
25	38.7
45	41.7

**Tabulka 4.2:** Tabulka středních kvadratických chyb pro WLTC test.

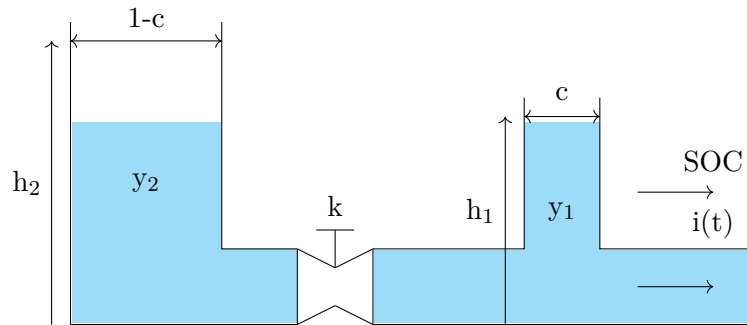




## Kapitola 5

### Kinetický model

Základně byl kinetický model zmíněn v (1.3). V této kapitole je pak podrobněji teoreticky popsán a následně vytvořen.



Obrázek 5.1: Kinetický model baterie, základní vyobrazení [17].

Pro připomenutí:  $y_1$  reprezentuje volnou kapacitu a  $y_2$  reprezentuje vázanou kapacitu článku. Výška  $h_1$  reprezentuje maximální velikost volné kapacity a  $h_2$  reprezentuje maximální velikost vázané kapacity. Celková kapacita článku  $C$  je rozložena ve vázané kapacitě a ve volné kapacitě. Tedy:

$$C_{tot} = h_2 + h_1 \quad (5.1)$$

V situaci, kdy článek dodává proud, tak tento proud je do zátěže dodáván přímo z nádoby  $y_1$  a zároveň do nádoby  $y_1$  je přečerpávána kapacita z nádoby  $y_2$  rychlostí specifikovanou prostupností vyjádřenou v obr.(5.1) jako ventil  $k$ . Zároveň součet výšek  $h_1$  a  $h_2$  udává aktuální hodnotu SOC. V momentě, kdy  $h_1$  klesne k nule, tak je volná kapacita vyčerpána a pokud chceme z článku dále čerpat, je nutné nechat článek po nějakou dobu relaxovat. Rovnice popisující kapacity  $y_1$  a  $y_2$  jsou:

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = -i(t) + k \cdot (h_2(t) - h_1(t)) \quad (5.2)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = -k \cdot (h_2(t) - h_1(t)) \quad (5.3)$$

Kde proud  $i(t)$  má kladnou hodnotu při vybíjení článku a zápornou hodnotu při nabíjení článku [16] [19].

V kontextu kinetického modelu se stav nabití SOC rozděluje na dva typy. Přechodové SOC označované  $SOC_T$ , které je svázané s volnou kapacitou a ustálené SOC, které je svázané s vázanou kapacitou článku.  $SOC_T$  se využívá k odhadování zbývajících času po který může článek dodávat určitý proud a ustálené SOC označované  $SOC_E$ , pomocí kterého se odhaduje

maximální kapacita článku. T. Kim a W. Qiao odvodili v [16] algoritmus pro odhadování  $SOC_T$ :

$$SOC_T(t) = \frac{C_a}{C_{tot}} = SOC_T(t_0) - \frac{\int i(t)dt + C_{un}(t)}{C_{tot}} \quad (5.4)$$

$$C_{un} = (1 - c) \cdot \left( \delta h(t_0) \cdot e^{-k'(t-t_0)} + \frac{i(k)}{c} \cdot \frac{1 - e^{-k'(t-t_0)}}{k'} \right), \quad (5.5)$$

kde  $t_0$  je počáteční čas odhadování  $SOC_T$ ,  $k' = k/(c \cdot (1 - c))$  je konstanta difuze,  $C_{tot}$  je celková kapacita článku,  $C_a$  je aktuálně dostupná kapacita a  $C_{un}$  je aktuálně nedostupná kapacita, tedy kapacita co v článku ještě je, ale nelze s ní momentálně pracovat.  $SOC_E$  lze vyjádřit vztahem:

$$SOC_E(t) = \frac{C_a}{C_{tot}} = SOC_E(t_0) - \frac{\int i(t)dt}{C_{tot}} \quad (5.6)$$

Změna  $SOC_T$  lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{dSOC_E(t)}{dt} = k' \cdot SOC_E - k' \cdot SOC_T - \frac{i(t)}{c \cdot C_{tot}} \quad (5.7)$$

Výsledný model lze vyjádřit rovnicemi ve spojitém čase:

$$\begin{pmatrix} \frac{dSOC_E(t)}{dt} \\ \frac{dSOC_T(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ k' & -k' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} SOC_E(t) \\ SOC_T(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-1}{C_{tot}} \\ \frac{-1}{c \cdot C_{tot}} \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

V diskrétním čase se rovnice (5.8) změní na:

$$\begin{pmatrix} SOC_E(k+1) \\ SOC_T(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k' \cdot T_s & -k \cdot T_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} SOC_E(k) \\ SOC_T(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-T_s}{C_{tot}} \\ \frac{-T_s}{c \cdot C_{tot}} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

V rovnicích (5.8), (5.9) je  $SOC_T$  reálná hodnota SOC článku v daném okamžiku. Ovšem tato definice je v případě nabíjení chybná. Model by totiž při nabíjení ukazoval vyšší hodnotu SOC, než jaká ve skutečnosti je. Proto je nutné zavést veličinu aktuální SOC ( $SOC_{act}$ ), která definuje aktuální stav SOC jako:

$$SOC_{act} = \min(SOC_E, SOC_T, 1) \quad (5.10)$$

Pomocí této definice  $SOC_{act}$  je dosaženo optimálního počítání aktuálního SOC pro jakékoliv proudové profily [19].

## 5.1 Identifikace parametrů $k$ a $c$

Parametry difuzní konstanta  $k$  a kapacitní faktor  $c$  se identifikují z testů, kde je článek vybíjen konstantním proudem, na základě aproximace dané rovnicí:

$$C_{delivered}(I) = \frac{C_{tot} \cdot k' \cdot c \cdot L(I)}{1 - e^{-k' \cdot L(I)} + c \cdot (k' \cdot L(I) - 1 + e^{-k' \cdot L(I)})} \quad (5.11)$$

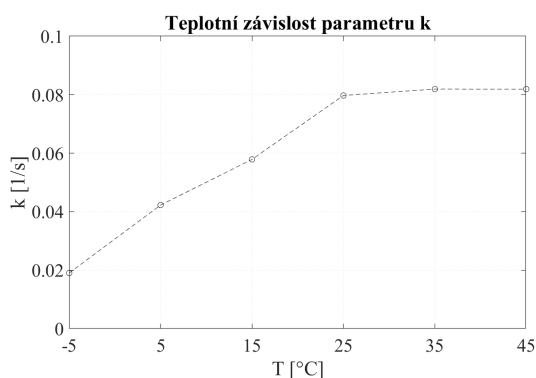
kde  $L(I)$  je vektor konečných času při vybíjení proudem  $I$ ,  $C_{delivered}(I)$  je vektor dodané kapacity daným proudem  $I$  a  $C_{tot}$  je kapacita dodaná malým vybíjecím proudem [19].

Parametry  $k$  a  $c$  byly identifikovány z kapacitních testů (3.5) pomocí nelineární metody nejmenších čtverců, která je implementována v MATLABu jako funkce `lsqnonlin` [37]. Funkce `lsqnonlin` využívá funkci

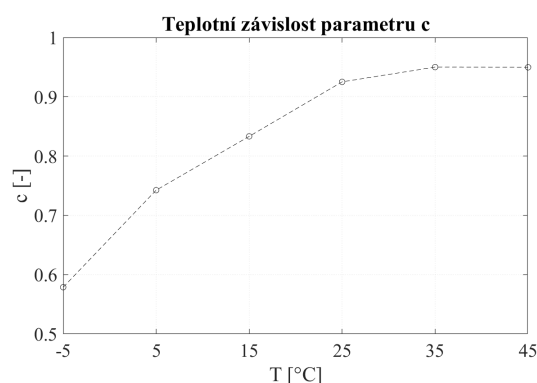
$$\min_x \|f(x)\|_2^2 = \min_x \left( f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_n(x)^2 \right) \quad (5.12)$$

pro nalezení minima zadané funkce. Funkce (5.12) vyjadřuje minimalizaci součtu druhých mocnin nelineárních funkcí  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ .  $\|f(x)\|_2^2$  představuje sumu čtverců jednotlivých složek vektoru  $f(x)$ .

Výsledné parametry  $k$  a  $c$  jsou vyneseny v grafech níže.



Obrázek 5.2: Parametr  $k$ .



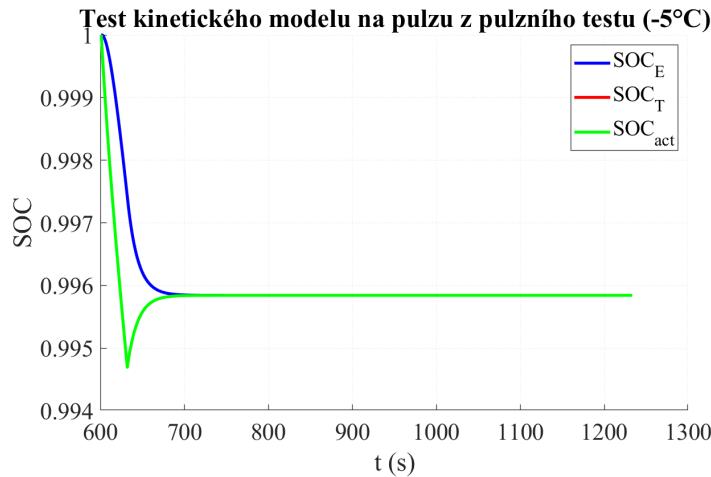
Obrázek 5.3: Parametr  $c$ .

na obr.(5.2) a obr.(5.3) jsou vyobrazeny teplotní závislosti parametrů  $k$  a  $c$ . Se zvyšující se teplotou oba parametry rostou až do teploty 25 °C. Při překročení této teploty už téměř nerostou. Z parametru  $k$  vyplývá, že čím vyšší je teplota, tím rychleji lze přeměnit vázanou kapacitu na volnou. Z parametru  $c$  vyplývá, že čím vyšší je teplota, tím větší část celkové kapacity tvoří volná kapacita.

## 5.2 Testování kinetického modelu

V předchozí části byly uvedeny teoretické rovnice pro popis kinetického modelu (5.6) - (5.10) a následně byly identifikovány parametry  $k$  a  $c$  jejichž hodnoty jsou graficky znázorněny (5.2) a (5.3).

Chování kinetického modelu bylo otestováno na vybíjecím pulzu a z pulzního testu, kde bylo otestována teoretická funkčnost modelu. Vybíjecí pulz byl proveden proudem  $I = 1.6250$  A při -5 °C, 25 °C a 45 °C. Pro ilustraci je uveden grafický výsledek pouze pro -5 °C, kde je dobře vidět rozdílný průběh jednotlivých SOC, díky nízké difuzní rychlosti.

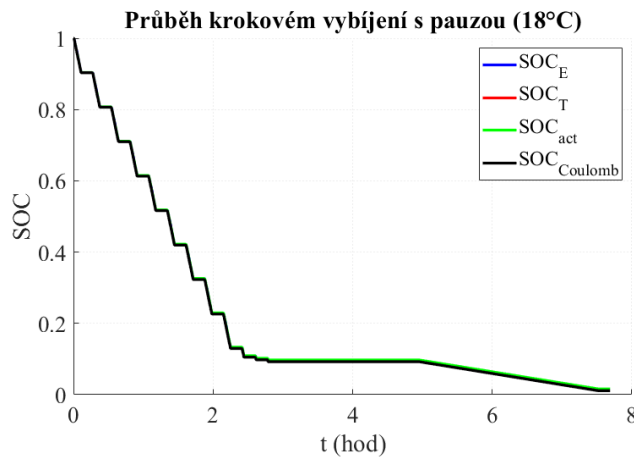


Obrázek 5.4: Test chování kinetického modelu na pulzu z pulzního testu (-5 °C).

Na obr.(5.4) je vyobrazen průběh  $SOC_E$ ,  $SOC_T$  a  $SOC_{act}$  při proudovém pulzu při teplotě -5 °C. Z výsledku je vidět rozdílný průběh jednotlivých SOC. Při vybíjení je  $SOC_{act}$  rovno  $SOC_T$  a je vidět rozdíl v průbězích a velikosti  $SOC_E$  a  $SOC_T$ . V momentě počátku relaxace článku se  $SOC_T$  začne pomalu zvyšovat díky transformaci  $SOC_E$  na  $SOC_T$ .

### 5.3 Ověření kinetického modelu

Ověření kinetického modelu proběhlo na krokovém vybíjení s pauzou při teplotě 18 °C.



Obrázek 5.5: Průběh SOC.

Na obr.(5.5) je vyobrazen průběh SOC vypočítaných kinetickým modelem a průběh koulombického SOC. Průběhy SOC se liší na celém intervalu simulace. Konečné hodnoty jsou rozdílné. Hodnota SOC vypočtená pomocí kinetického modelu je vyšší, než hodnota vypočtená pomocí koulombického SOC.

## Kapitola 6

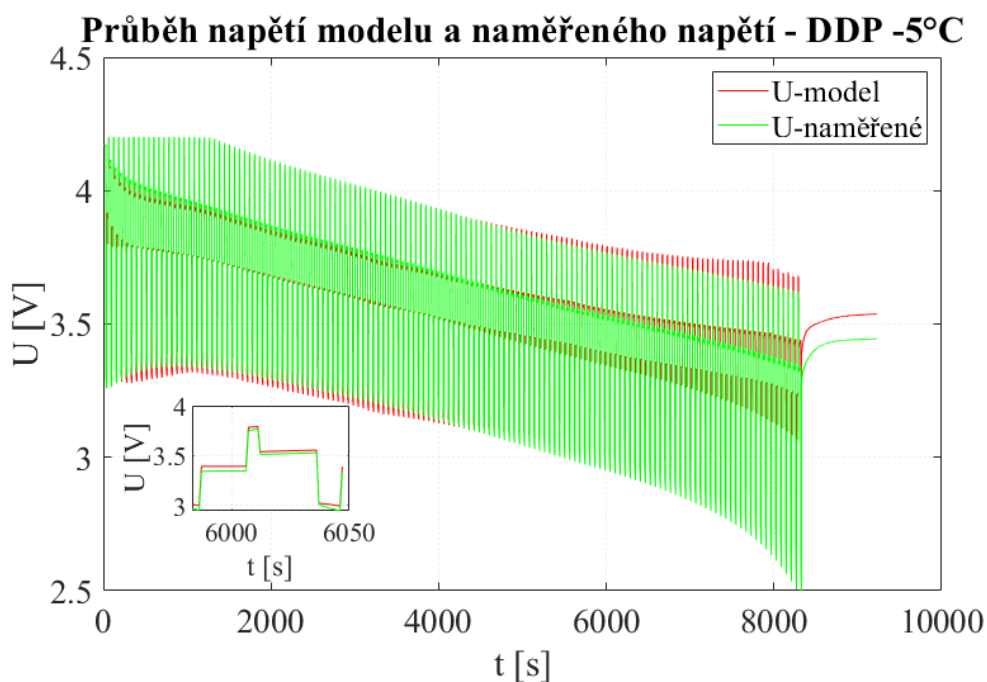
### Ověření Rozšířeného modelu

Elektrický model vytvořený v kapitole (4) dosahuje při validaci na dynamickém vybíjecím testu střední kvadratické chyby v rozmezí 40.8 - 56.7 mV (4.1 a při validaci na WLTC profilu dosahuje střední kvadratické chyby v rozmezí 38.7 - 58 mV (4.2). Rozšířením elektrického modelu a kinetický model dojde k přesnějšímu odhadování SOC, čímž by dle teorie měla klesnout celková kvadratická chyba. Rozšířený model využívá elektrický model pro odhad výstupního napětí s tím, že aktuální stav SOC je počítán kinetickým modelem.

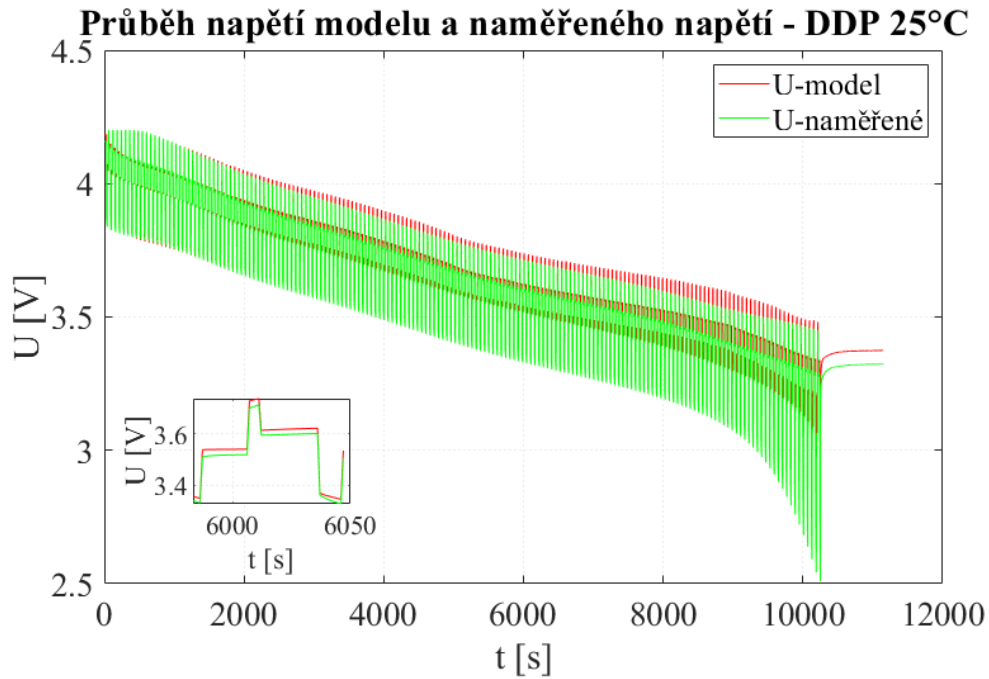
V následující části je rozšířený model validován na dynamickém vybíjecím testu a na WLTC profilu.

#### 6.1 Ověření na dynamickém vybíjecím profilu

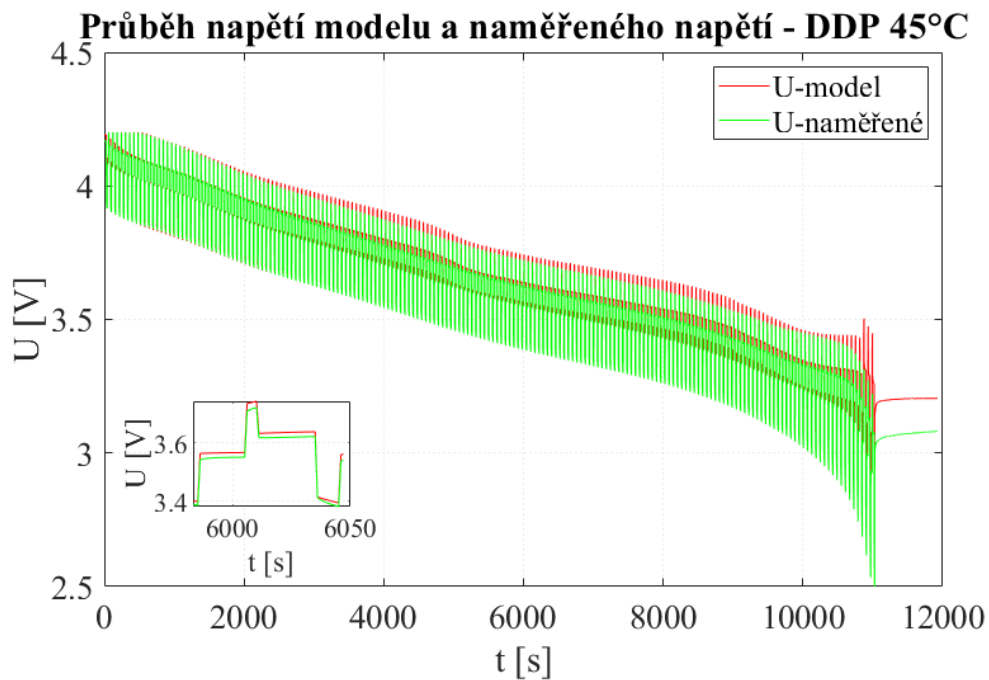
Ověření rozšířeného modelu na dynamickém vybíjecím profilu mělo stejný charakter jako ověření elektrického modelu na dynamickém vybíjecím profilu.



**Obrázek 6.1:** Ověření rozšířeného modelu na DDP -5 °C.



Obrázek 6.2: Ověření rozšířeného modelu na DDP 25 °C.



Obrázek 6.3: Ověření rozšířeného modelu na DDP 45 °C.

Na obr.(6.1)-(6.3) jsou vyobrazeny průběhy rozšířeného modelu a naměřeného napětí při validaci na dynamickém vybíjecím testu.

### 6.1.1 Střední kvadratické chyby - DDP

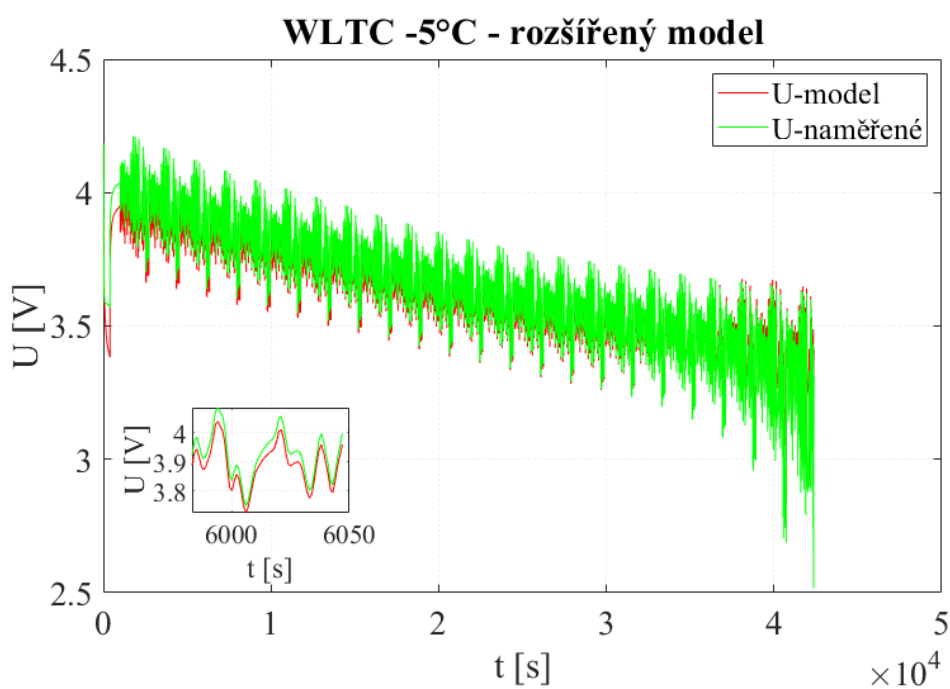
V následující tabulce jsou uvedeny střední kvadratické chyby rozšířeného modelu dle (4.9).

Teplota [°C]	RMSE [mV]
-5	49.5
5	50.4
15	50.4
25	31.7
35	40.2
45	50.9

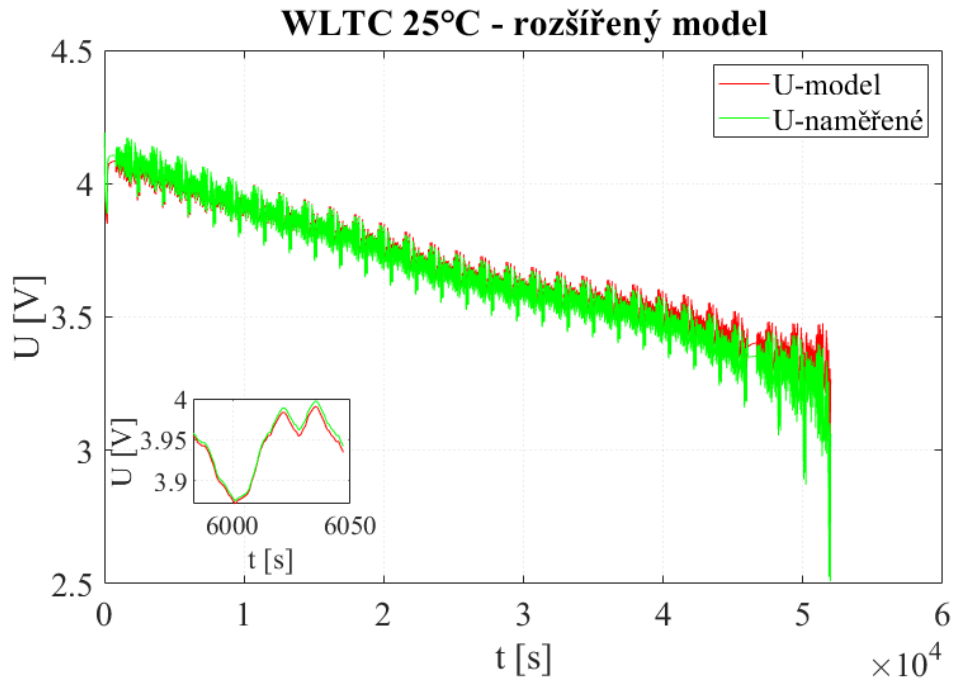
**Tabulka 6.1:** Tabulka středních kvadratických chyb rozšířeného modelu – DDP.

## 6.2 Ověření na WLTC profilu

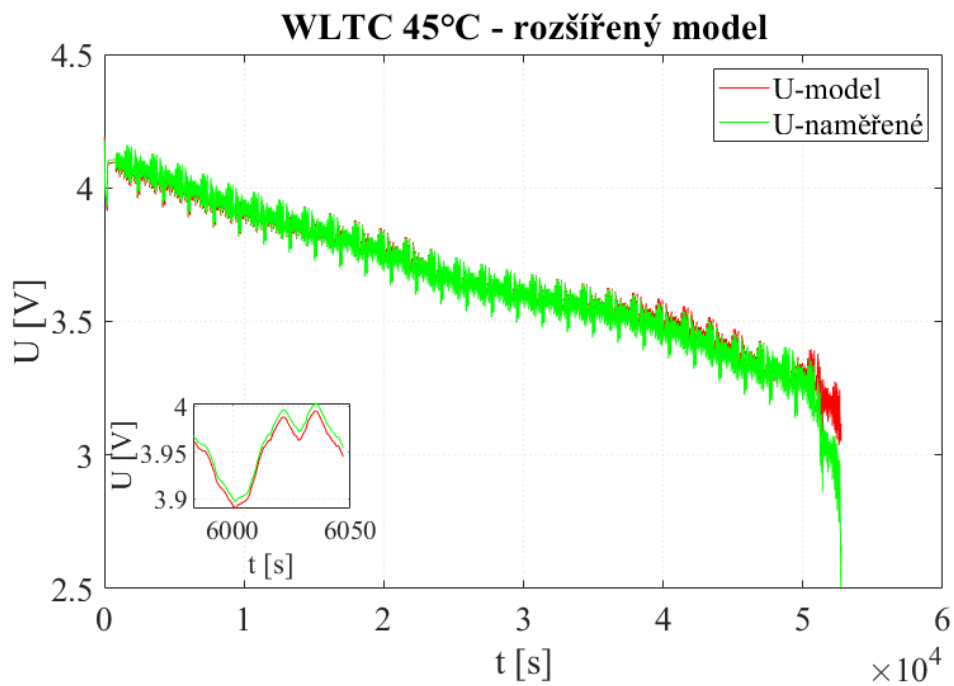
Ověření rozšířeného modelu na WLTC profilu byla provedena stejně jako ověření elektrického modelu na WLTC profilu, tzn. pouze na třech teplotách a WLTC profil byl opakován až do minimální hodnoty hodnoty napětí 2.5 V.



**Obrázek 6.4:** Ověření rozšířeného modelu na WLTC -5 °C.



**Obrázek 6.5:** Ověření rozšířeného modelu na WLTC 25 °C.



**Obrázek 6.6:** Ověření rozšířeného modelu na WLTC 45 °C.

Na obr.(6.4)-(6.6) jsou vyobrazeny průběhy rozšířeného modelu při ověření na WLTC profilu.



### 6.2.1 Střední kvadratické chyby - WLTC

V následující tabulce jsou uvedeny střední kvadratické chyby rozšířeného modelu dle (4.9).

Teplota [°C]	RMSE [mV]
-5	52.0
25	36.3
45	38.8

**Tabulka 6.2:** Tabulka středních kvadratických chyb rozšířeného modelu - WLTC.

## 6.3 Porovnání výsledků ověření elektrického a rozšířeného modelu

V této části jsou porovnány výsledky ověření elektrického a rozšířeného modelu.

Dynamický vybíjecí test		
Teplota [°C]	Elektrický model RMSE [mV]	Rozšířený model RMSE [mV]
-5	56.7	49.5
5	51.1	50.4
15	51.0	50.4
25	45.8	31.7
35	40.8	40.2
45	49.0	50.9
WLTC profil		
-5	58.0	52.0
25	38.7	35.3
45	41.7	38.8

**Tabulka 6.3:** Tabulka porovnání středních kvadratických chyb.

V tabulce (6.3) jsou výsledné hodnoty středních kvadratických chyb z ověření modelů na dynamickém vybíjecím testu a WLTC profilu. Z výsledných hodnot je patrné, že rozšířený model má kromě dynamického vybíjecího testu při 45 °C nižší chybovost.



# Kapitola 7

## Závěr

Obsahem této práce je vytvoření elektrického a kinetického modelu lithium-iontového článku. V úvodu byly popsány modely užívané pro modelování lithium-iontových článků. Následoval popis elektrického modelu z pohledu jednotlivých komponent a možností jejich parametrizování. Dále byly v práci popsány testy pro parametrizaci a ověření elektrického a kinetického modelu. Následně proběhlo vytvoření, otestování a ověření modelů. Konečným výsledkem práce je elektrický model rozšířený o model kinetický pro lepší odhadování SOC.

Vlastnosti elektrického modelu byly ověřeny na dvou typech testů a při rozdílných teplotách. Nejprve byl ověřen na dynamickém vybíjecím testu při teplotách  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Výsledná střední kvadratická chyba se pohybuje v rozmezí 40.8 - 56.7 mV. Model vykazuje největší chybovou hodnotu při teplotě  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kde dosahuje 56.7 mV, neboli 9 % z celkového testu. Naopak nejmenší chybovou hodnotu vykazuje model při teplotě  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a to 40.8 mV, neboli 6.9 %.

Validace na WLTC profilu byla provedena při třech teplotách  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Výsledná střední kvadratická chyba je v rozmezí 41.0 - 58 mV. Největší chybová hodnota je 58mV, což odpovídá 9.8 %, které model dosahuje opět při teplotě  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Naopak při teplotě  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  dosahuje nejnižší chybové hodnoty, odpovídající 38.7 mV, neboli 6.5 %.

Při nízkých hodnotách SOC jsou u modelu graficky pozorovány větší odchylky od reálných hodnot, což je způsobeno extrapolací parametrů v rozmezí 5 – 0 % SOC. Současně roste nelinearita článku a tím klesá schopnost modelu ji zachytit.

Vlastnosti kinetického modelu byly úspěšně otestovány na vybrané části pulzního testu. Následně byl model ověřen na pulzním krokovém testu, kde bylo dosaženo lepšího výpočtu SOC než při použití pouze koulombické metody.

Pro získání lepších výsledků byl do elektrického modelu implementován kinetický model, odhadující SOC. Jeho následné ověření bylo provedeno na stejných testech, jako u elektrického modelu. Výsledná střední chyba na dynamickém testu se pohybovala v rozmezí 31.7 - 50.9 mV. Nejvyšší hodnota chyby je při  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ověření na WLTC profilu opět prokázalo nižší chybovost, kde se střední kvadratická chyba pohybuje v rozmezí 38.8 - 52.0 mV. Kombinovaný model dosahuje obecně lepších výsledků, než samotný elektrický model.

## ■ 7.1 Navazující kroky na tuto práci

Výsledný model lze rozšířit o hysterezi, což by mohlo vést k lepšímu chování modelu. Dále je možné model implementovat do kalmanova filtru pro odhadování SOC, kde by nahradil klasický elektrický model. Implementovaný model je možné rozšířit o stárnoucí efekt článku, díky čemuž by byl schopen simulovat i stárnutí článku. Kinetický model by bylo možné parametrizovat za pomoci dat z většího množství měření.

# Příloha A

## Datasheet článku NCA - Panasonic ncr18650

**Panasonic**  
ideas for life

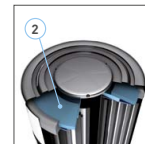
**NCR-18650B**

### LITHIUM-ION / NNP + HRL TECHNOLOGY

A perfect combination of high energy density (e.g. NNP technology), safety (e.g. PSS and HRL technology) and long-life shows what is possible with Lithium-Ion battery technology from Panasonic. Excellent battery safety on one hand, and superior battery performance on the other: this is what Panasonic stands for.

#### LI-ION + 3D ILLUSTRATION

- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 1 Positive pole                                 | 5 Insulator                       |
| 2 Positive Temperature Coefficient Device (PTC) | 6 Cathode                         |
| 3 Gasket  | 7 Anode                           |
| 4 Collector                                     | 8 Negative pole (cell can)        |
|   | 9 Separator                       |
|   | 10 Current Interrupt Device (CID) |
|   | 11 Exhaust gas hole               |

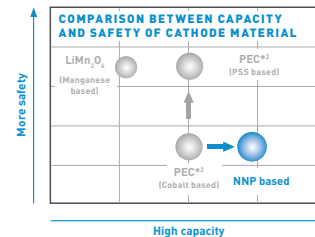


#### Nickel Oxide Based New Platform (NNP)

This new Lithium-Ion battery technology contains on one side a unique high capacity Nickel based positive electrode and on the other side a material and processing technology. The latter prevents deformation of the Alloy-based negative electrode when subjected to repeated charge and discharge. This is what our Nickel Oxide Based New Platform (NNP) stands for.\*1

#### Characteristics of the Panasonic NNP technology:

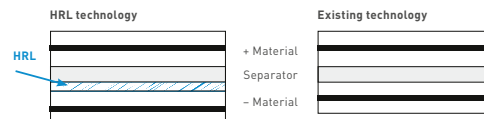
- Good cycle life performance
- High energy density
- The new Nickel positive electrode excels in durability in actual use and charge retention
- Low self-discharge
- Long storage reliability through reduced metal elution



#### Heat Resistance Layer (HRL)

Nowadays all electronic devices getting more powerful, sophisticated and feature-laden and therefore require more robust and safer batteries. Increasing energy-density, however, raises the risk of overheating and ignition due to internal short-circuiting. Panasonic deploys the Heat Resistance Layer (HRL) technology to improve the safety of Lithium-Ion batteries significantly. This heat resistance layer consists of an insulating metal oxide on the surface of the electrodes which prevents the battery from overheating if an internal short-circuit occurs.

Safety is the base for everything. Higher energy can be established based on safety technology.



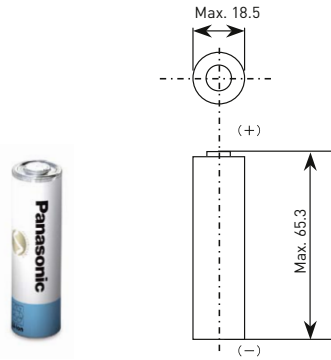
\*1 Panasonic Lithium-Ion cells must always be equipped with a safety unit.  
\*2 PEC: Panasonic Energy Company.

**Panasonic BATTERIES**  
Quality is our Business.

# NCR-18650B

## LITHIUM-ION / NNP + HRL TECHNOLOGY

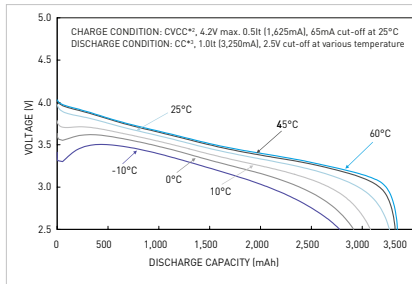
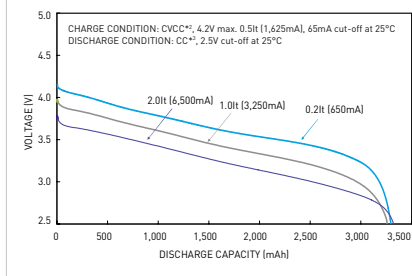
### DIMENSIONS (MM)



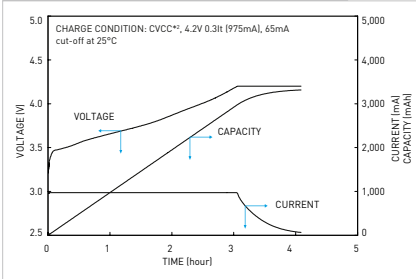
### SPECIFICATIONS

Model number	NCR-18650B
Nominal voltage (V)	3.6
Nominal capacity*1 - Minimum (mAh)	3,250
Nominal capacity*1 - Typical (mAh)	3,350
Dimensions - Diameter (mm)	18.5
Dimensions - Height (mm)	65.3
Approx. weight (g)	47.5

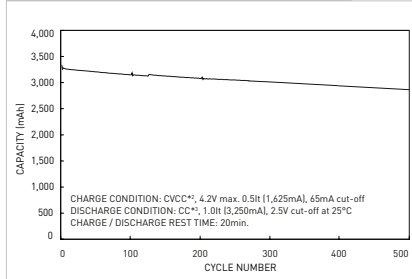
### TYPICAL DISCHARGE CHARACTERISTICS



### TYPICAL CHARGE CHARACTERISTICS



### TYPICAL CYCLE CHARACTERISTICS



\*1 Charge: Constant Voltage / Constant Current, 4.2V, max. 1,625mA, 65mA cut-off; Discharge: Constant Current, 650mA, 2.5V cut-off; Temperature: 25°C  
\*2 CVCC: Constant Voltage / Constant Current \*3 CC: Constant Current

### Notice to Readers

We are unable to support single cell business or accept orders from consumers. We design Lithium-Ion battery packs including a suitable safety unit device based on the technical specification of the customer. Due to the need for careful review when selecting Lithium-Ion battery solutions please contact your local Panasonic Sales Office. In order to avoid a lack of supply please check the battery availability with your Panasonic sales team before design-in.

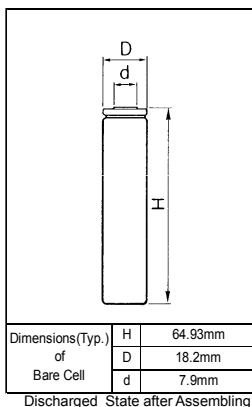


Panasonic Industrial Devices Sales Europe | Winsbergring 15 | 22525 Hamburg | Website: <http://industrial.panasonic.com/eu>

Lithium ion  
Rechargeable battery

Cell Type NCR18650B

Specifications



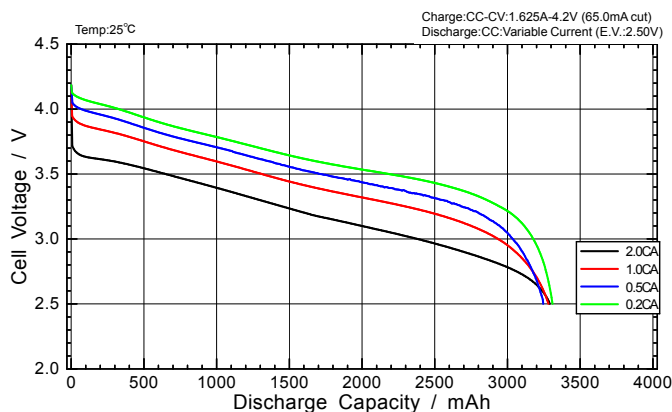
Rated Capacity (at 20°C)	Mn.3200mAh	
Nominal Capacity (at 25°C)	Mn.3250mAh	
	Typ.3350mAh	
Nominal Voltage	3.6V	
Charging Method	Constant Current -Constant Voltage	
Charging Voltage	4.2V	
Charging Current	Std.1625mA	
Charging Time	4.0hrs.	
Ambient Temperature	Charge	+10~+45°C
	Discharge	-20~+60°C
	Storage	-20~+50°C
Weight (Max.)	47.5g	
Dimensions (Max.) Maximum size without tube	(D)	18.25mm
	(H)	65.10mm
Volumetric Energy Density	676Wh/l	
Gravimetric Energy Density	243Wh/kg	

2G23X0KYKU

Panasonic Ideas for life

Lithium ion  
Rechargeable battery

Discharge Rate Characteristics for NCR18650B

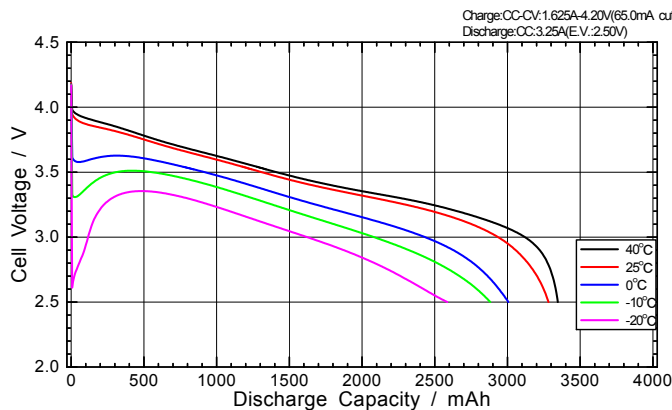


2G23X0KYKU

Panasonic Ideas for life

Lithium ion  
Rechargeable battery

Discharge Temperature Characteristics for NCR18650B



2G23X0KYKU

Panasonic Ideas for life





## Příloha B

### Seznam použitých symbolů

- $\tau$  - Časová konstanta přechodového děje [s]
- $\rho$  - Hustota materiálu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\eta$  - Coulombická účinnost [%]
- $\hat{y}(t)$  - Výstupní data z modelu
- $\lambda$  - Tepelná vodivost [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]
- $A$  - Empirická konstanta - Shepherdův model [V]
- $B$  - Empirická konstanta - Shepherdův model [ $1/\text{Ah}$ ]
- $C_1$  - Kapacita krátkého přechodového jevu [F]
- $C_2$  - Kapacita dlouhého přechodového jevu [F]
- $C_a$  - Volná kapacita [Ah]
- $C_{delivered}$  - Vektor dodané kapacity
- $C_{un}$  - Nedostupná kapacita [Ah]
- $E_0$  - Napětí naprázdno - Shepherdův model
- $I$  - Proud protékající článkem [A]
- $I_{R_1}$  - Proud protékající odporem  $R_1$  [A]
- $I_{R_2}$  - Proud protékající odporem  $R_2$  [A]
- $I_{batt}$  - Proud protékající článkem [A] - schéma el. modelu
- $I_{max}$  - Maximální proud [A]
- $K$  - Polarizační odporový koeficient - Shepherdův model [ $\Omega$ ]
- $L(I)$  - Konečné časy při vybíjení konstantním proudem
- $N_p$  - Počet paralelně zapojených článků
- $N_s$  - Počet sériově zapojených článků
- $OCV$  - Napětí naprázdno [V]
- $OCV_0$  - Napětí naprázdno při  $0^\circ\text{C}$  [V]

- $OCV_{rel}$  - Lineární teplotní korekční faktor napětí naprázdno [mV/°C]
- $Q$  - Kapacita článku [Ah]
- $Q_{gen}$  - Zdroj tepla [W/m<sup>3</sup>]
- $Q_{tot}$  - Maximální kapacita článku [Ah]
- $R_0$  - Sériový odpor [Ω]
- $R_1$  - Odpor krátkého přechodového jevu [Ω]
- $R_2$  - Odpor dlouhého přechodového jevu [Ω]
- $R_{amb}$  - Tepelný odpor okolí [Ω]
- $R_{in}$  - Tepelný odpor článku [Ω]
- $R_p$  - Paralelní odpor [Ω]
- $RMSE$  - Střední kvadratická chyba [mV]
- $SOC$  - Stav nabití článku [%]
- $SOC_E$  - Ustálené SOC článku
- $SOC_T$  - Přechodové SOC článku
- $SOC_{act}$  - Aktuální SOC článku
- $SOH$  - Stav života [%]
- $T$  - Teplota [K]
- $T_{amb}$  - Teplota okolí článku [K]
- $T_{in}$  - Vnitřní teplota článku [K]
- $U_C$  - Napětí na kondenzátoru RC členu [V]
- $U_N$  - Jmenovité napětí článku [V]
- $U_R$  - Napětí na sériovém rezistoru [V]
- $U_{batt}$  - Napětí článku [V]
- $V$  - Napětí článku - Shepherdův model
- *WLTC* - *Worldwide harmonized light duty driving cycle*
- $c$  - Kapacitní faktor - distribuce celkové kapacity
- $c_p$  - Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [J/kg · K]
- $e(t)$  - Chyba modelu
- $h_1$  - Maximální velikost volné kapacity [Ah]
- $h_2$  - Maximální velikost vázané kapacity [Ah]

- $i$  - Proud článku - Shepherdův model
- $k$  - Konstanta rychlosti difúze
- $k'$  - Upravená konstanta difuze [1/s]
- $q$  - Zdroj tepla [W/m<sup>3</sup>]
- $t$  - Čas
- $y(t)$  - Naměřená výstupní data
- $y_1$  - Dostupná kapacita
- $y_2$  - Vázaná kapacita



# Příloha C

## Literatura

- [1] Z. Khalik, M. Donkers, and H. Bergveld, “Model simplifications and their impact on computational complexity for an electrochemistry-based battery modeling toolbox,” *Journal of Power Sources*, vol. 488, p. 229427, 03 2021.
- [2] R. Klein, N. A. Chaturvedi, J. Christensen, J. Ahmed, R. Findeisen, and A. Kojic, “Electrochemical model based observer design for a lithium-ion battery,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 289–301, 2013.
- [3] S. Park, D. Zhang, and S. Moura, “Hybrid electrochemical modeling with recurrent neural networks for li-ion batteries,” 05 2017.
- [4] O. Tremblay and L.-A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 3, p. 289, 2009.
- [5] H. Hemi, N. K. M’Sirdi, and A. Naamane, “A new proposed shepherd model of a li-ion open circuit battery based on data fitting,” in *IMAACA 2019*, (Lisbon, Portugal), September 2019. fhal-02471659f.
- [6] B. Enache, E. Lefter, and C. Stoica, “Comparative study for generic battery models used for electric vehicles,” in *Proceedings of the 2013 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, (Bucharest, Romania), pp. 1–6, May 23–25 2013.
- [7] N. Campagna, V. Castiglia, R. Miceli, R. A. Mastromauro, C. Spataro, M. Trapanese, and F. Viola, “Battery models for battery powered applications: A comparative study,” *Journal Name: World Electr. Veh. J.*, vol. 13, 2020.
- [8] S. Li, H. He, C. Su, and P. Zhao, “Data driven battery modeling and management method with aging phenomenon considered,” *Applied Energy*, vol. 275, p. 115340, 2020.
- [9] G. Dong, F. Yang, Z. Wei, J. Wei, and K.-L. Tsui, “Data-driven battery health prognosis using adaptive brownian motion model,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4736–4746, 2020.
- [10] X. Hu, Y. Che, X. Lin, and Z. Deng, “Health prognosis for electric vehicle battery packs: A data-driven approach,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 6, pp. 2622–2632, 2020.
- [11] Y. Li, K. Liu, A. M. Foley, A. Zülke, M. Berecibar, E. Nanini-Maury, J. Van Mierlo, and H. E. Hoster, “Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, p. 109254, 2019.
- [12] G. L. Plett, *Battery Modeling*. Artech House, 1. ed., 2015.

- [13] V. Knap and D.-I. Stroe, “Effects of open-circuit voltage tests and models on state-of-charge estimation for batteries in highly variable temperature environments: Study case nano-satellites,” *Journal of Power Sources*, vol. 498, p. 229913, 2021.
- [14] M. Chen and G. Rincon-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504–511, 2006.
- [15] R. C. Kroeze and P. T. Krein, “Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations,” in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1336–1342, 2008.
- [16] T. Kim and W. Qiao, “A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, pp. 1172–1180, Dec. 2011.
- [17] Q. Zhang, Y. Shang, N. Cui, Y. Li, and C. Zhang, “A fractional-order kibam of lithium-ion batteries with capacity nonlinearity,” in *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 4995–5000, 2017.
- [18] Y. Zhao, Y. Li, F. Zhou, Z. Zhou, and Y. Chen, “An iterative learning approach to identify fractional order kibam model,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 2, pp. 322–331, 2017.
- [19] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu, “An enhanced hybrid battery model,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, no. TEC-01004-2018, 2019.
- [20] E. Paccha-Herrera, W. R. Calderón-Muñoz, M. Orchard, F. Jaramillo, and K. Medjaher, “Thermal modeling approaches for a licoo2 lithium-ion battery—a comparative study with experimental validation,” *Batteries*, vol. 6, no. 3, 2020.
- [21] S. Hoelle *et al.*, “3d thermal simulation of lithium-ion battery thermal runaway in autoclave calorimetry: Development and comparison of modeling approaches,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 170, p. 010509, 2023.
- [22] S. Tamilselvi, G. Selvaraj, K. Natarajan, A. R. Kaladgi, M. Saranathan, V. Nagarajan, T. Sathish, M. Z. Shamim, A. Saleel C, and A. Afzal, “A review on battery modelling techniques,” *Sustainability*, vol. 13, p. 10042, 09 2021.
- [23] S. Chib, “Chapter 57 - markov chain monte carlo methods: Computation and inference,” vol. 5 of *Handbook of Econometrics*, pp. 3569–3649, Elsevier, 2001.
- [24] J. S. Richman, D. E. Lake, and J. Moorman, “Sample entropy,” in *Numerical Computer Methods, Part E*, vol. 384 of *Methods in Enzymology*, pp. 172–184, Academic Press, 2004.
- [25] S. Khaleghi, Y. Firouz, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche, “Developing a real-time data-driven battery health diagnosis method, using time and frequency domain condition indicators,” *Applied Energy*, vol. 255, p. 113813, 2019.
- [26] X. Liu, K. Li, J. Wu, Y. He, and X. Liu, “An extended kalman filter based data-driven method for state of charge estimation of li-ion batteries,” *Journal of Energy Storage*, vol. 40, p. 102655, 2021.

- [27] D. N. T. How, M. A. Hannan, M. S. Hossain Lipu, and P. J. Ker, “State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 136116–136136, 2019.
- [28] W. Liu and J. Zhao, “An online estimation method of state of health for lithium-ion batteries based on constant current charging curve,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 169, p. 050514, may 2022.
- [29] E. Paccha-Herrera, W. R. Calderón-Muñoz, M. Orchard, F. Jaramillo, and K. Medjaher, “Thermal modeling approaches for a licoo2 lithium-ion battery—a comparative study with experimental validation,” *Batteries*, vol. 6, no. 3, 2020.
- [30] M. N. Richard and J. R. Dahn, “Accelerating rate calorimetry study on the thermal stability of lithium intercalated graphite in electrolyte. ii. modeling the results and predicting differential scanning calorimeter curves,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 146, p. 2078, jun 1999.
- [31] C. Chiasserini and R. Rao, “A model for battery pulsed discharge with recovery effect,” in *WCNC. 1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (Cat. No.99TH8466)*, vol. 2, pp. 636–639 vol.2, 1999.
- [32] H.-G. Schweiger, O. Obeidi, O. Komesker, A. Raschke, M. Schiemann, C. Zehner, M. Gehnen, M. Keller, and P. Birke, “Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells,” *Sensors*, vol. 2010, no. 10(6), pp. 5605–5625, 2010.
- [33] D. Dees, E. Gunen, D. Abraham, A. Jansen, and J. Pakash, “Electrochemical modeling of lithium-ion positive electrodes during hybrid pulse power characterization tests,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 2008, pp. 603–613, 2008.
- [34] T. Reichl and P. Hrzina, “Impulse diagnostic test of battery and load influence,” *ECS Transactions*, vol. 74, p. 9, dec 2016.
- [35] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2 ed., 1999.
- [36] T. Söderström and P. Stoica, *System Identification*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1989.
- [37] The MathWorks, Inc., *MATLAB Documentation*. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, 2024.
- [38] K. Propp, M. Marinescu, D. J. Auger, L. O’Neill, A. Fotouhi, K. Somasundaram, G. J. Offer, G. Minton, S. Longo, M. Wild, and V. Knap, “Multi-temperature state-dependent equivalent circuit discharge model for lithium-sulfur batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 328, pp. 289–299, 2016.
- [39] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942–1948, 1995.
- [40] M. Clerc and J. Kennedy, “The particle swarm: Explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58–73, 2002.

- [41] E. G. Giakoumis and A. T. Zachiotis, “Investigation of a diesel-engined vehicle’s performance and emissions during the wltc driving cycle—comparison with the nedc,” *Energies*, vol. 10, no. 2, p. 240, 2017.



# Příloha D

## Obrázky

1.1 Elektrický model na bázi Theveninova náhradního obvodu.....	3
1.2 Kinetický model baterie, základní vyobrazení [17]. ....	5
1.3 Schematický obrázek <i>single particle modelu</i> . Převzato z [3].....	6
1.4 Ilustrativní obrázek datově řízeného modelu pro prognózu stavu života baterie. Převzato z [28]. ....	7
1.5 Zjednodušený tepelný obvod. Převzato z [20]. ....	8
2.1 Elektrický model s dvěma RC členy.....	9
2.2 Ukázka průběhu napětí při proudovém pulzu. ....	12
2.3 Ilustrace závislosti napětí naprázdno na stavu nabití z Kvazi-OCV testu.....	15
2.4 Proudový pulz pro odhad $R_s$ . ....	16
3.1 Měřicí pracoviště. ....	19
3.2 Cellpod pro měření. ....	19
3.3 Cellpody použité pro měření. ....	20
3.4 Článek zapojený v Cellpodu. ....	20
3.5 Průběh napětí všech článků při „pre-conditioning testu“. ....	21
3.6 Průběh proudů všech článků při „pre-conditioning testu“. ....	21
3.7 Kvazi-OCV vybíjecí test, teplotní závislost. ....	23
3.8 Kvazi-OCV nabíjecí test, teplotní závislost ....	23
3.9 Průběh napětí – vybíjecí pulzní test.....	25

3.10 Průběh proudu – vybíjecí pulzní test. ....	25
3.11 Průběh napětí – nabíjecí pulzní test. ....	26
3.12 Průběh proudu – nabíjecí pulzní test. ....	26
3.13 Průběhy jednotlivých vybíjecích kapacitních testů. ....	28
3.14 Závislost vybité kapacity na teplotě. ....	29
3.15 Dynamický vybíjecí test – průběh napětí. ....	30
3.16 Rychlostní profil WLTC. ....	31
3.17 Proudový profil WLTC. ....	32
3.18 Průběh napětí krokového vybíjení s pauzou. ....	34
3.19 Průběh naměřené vybité kapacity krokového vybíjení s pauzou. ....	34
4.1 Zvolený elektrický model. ....	35
4.2 Graf OCV(SOC) při 25 °C. ....	36
4.3 Teplotní závislost OCV(SOC) křivek. ....	37
4.4 Průběh OCV <sub>0</sub> (SOC). ....	37
4.5 Průběh OCV <sub>rel</sub> (SOC). ....	37
4.6 Vizuální ukázka dat pro parametrizaci. ....	38
4.7 3D mapa parametru R <sub>0</sub> . ....	39
4.8 3D mapa parametru R <sub>1</sub> . ....	39
4.9 3D mapa parametru R <sub>2</sub> . ....	40
4.10 3D mapa parametru C <sub>1</sub> . ....	40
4.11 3D mapa parametru C <sub>2</sub> . ....	41
4.12 Ověření na DDP -5 °C. ....	42
4.13 Ověření na DDP 25 °C. ....	42
4.14 Ověření na DDP 45 °C. ....	43
4.15 Ověření WLTC -5 °C. ....	44

4.16	Ověření WLTC 25 °C. ....	44
4.17	Ověření WLTC 45 °C. ....	45
5.1	Kinetický model baterie, základní vyobrazení [17]. ....	47
5.2	Parametr k. ....	49
5.3	Parametr c. ....	49
5.4	Test chování kinetického modelu na pulzu z pulzního testu (-5 °C). ....	50
5.5	Průběh SOC. ....	50
6.1	Ověření rozšířeného modelu na DDP -5 °C. ....	51
6.2	Ověření rozšířeného modelu na DDP 25 °C. ....	52
6.3	Ověření rozšířeného modelu na DDP 45 °C. ....	52
6.4	Ověření rozšířeného modelu na WLTC -5 °C. ....	53
6.5	Ověření rozšířeného modelu na WLTC 25 °C. ....	54
6.6	Ověření rozšířeného modelu na WLTC 45 °C. ....	54



# Příloha E

## Tabulky

3.1 Tabulka sekvence proudů ve vybíjecím pulzním testu. ....	27
3.2 Tabulka sekvence proudů v nabíjecím pulzním testu. ....	27
3.3 Dynamický vybíjecí test - tabulka proudových pulzů. ....	29
3.4 Tabulka parametrů baterie pro fyzikální model automobilu. ....	31
4.1 Tabulka středních kvadratických chyb pro DDP test. ....	43
4.2 Tabulka středních kvadratických chyb pro WLTC test. ....	45
6.1 Tabulka středních kvadratických chyb rozšířeného modelu – DDP. ....	53
6.2 Tabulka středních kvadratických chyb rozšířeného modelu - WLTC. ....	55
6.3 Tabulka porovnání středních kvadratických chyb. ....	55