

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky

## Komplexní model pulsního stabilizátoru napájeného z baterie

**Bc. Lukáš Doležel**

Vedoucí práce: Ing. Vít Záhlava, CSc.; Ing. Pavel Cejnar, Ph.D.  
Květen 2022



## Poděkování

Rád bych poděkoval svým vedoucím práce panu Ing. Vítu Záhlavovi, CSc. za odborné konzultace a zpětnou vazbu při zpracování této diplomové práce a panu Ing. Pavlu Cejnarovi, Ph.D. za odborné konzultace, zpětnou vazbu a pomoci realizace části této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat členům ERL Teamu ve firmě EATON na pracovišti v Roztokách za realizaci měření bateriových článků a odborné konzultace týkající se tématu lithiových baterií. Chtěl bych dále poděkovat panu Ing. Pavlovi Fojtíkovi, Ph.D. za odborné konzultace týkající se práce v prostředí MATLAB, Simulink a práce s mikrokontroléry C2000. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia, jak bakalářského studia, tak navazujícího magisterského studia. Na závěr bych chtěl poděkovat své přítelkyni slečně Bc. Karolíně Hruškové za plnou podporu při studiu a pomoci při korektuře této práce.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 16. května 2022

Bc. Lukáš Doležel

## Abstrakt

*Tato práce se zabývá více tématy. Prvním tématem jsou Li-Ion bateriové články a jejich možné náhradní modely. Práce se zabývá určením parametrů daného náhradního modelu. Tyto parametry jsou zpětně ověřovány na naměřených datech. Toto ověření je pak vyhodnoceno pomocí určení přesnosti a platnosti daného modelu.*

*Druhým tématem jsou pulzní stabilizátory. V práci je popsán návrh pulzního stabilizátoru, který je napájen z baterie. Samotný návrh spočívá ve výběru elektronických součástek a jejich dimenzování na hodnoty proudu a napětí. Poslední tématem je implementace řízení jednoduchého DC-DC měniče na mikrokontrolér C2000.*

**Klíčová slova:** lithium-iontová baterie, náhradní obvodové modely, DC-DC měnič, pulzní stabilizátor, mikrokontrolér C2000

**Vedoucí práce:** Ing. Vít Záhlava, CSc.; Ing. Pavel Cejnar, Ph.D.

## Abstract

*This thesis deals with several topics. First topic are Li-Ion battery cells and their possible equivalent models. This thesis deals with determining of the parameters of the chosen model. This parameters are verified on the measured data. This verification is assessed by determining of accuracy and validity of the chosen model.*

*Second topic is pulse stabilizers. In this thesis there is a description of design of pulse stabilizer that is powered from a battery. The design is based on the choice of the electronic components and dimensioning on the values of current and voltage. The last topic is an implementation of simple DC-DC converter controlling to a microcontroller C2000.*

**Keywords:** lithium-ion battery, equivalent circuit models, DC-DC converter, pulse stabilizer, microcontroller C2000

**Title translation:** Complex model of battery-powered pulse stabilizer



# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>1</b>	<b>4 Výsledky experimentů</b>	<b>53</b>
<b>Použité symboly</b>	<b>3</b>	4.1 Výsledky obvodových parametrů bateriového článku . . . . .	53
<b>1 Úvod</b>	<b>5</b>	4.2 Výsledky verifikace náhradních obvodových modelů . . . . .	56
<b>2 Baterie a její náhradní obvodové modely</b>	<b>7</b>	4.3 Výsledky simulace pro dimenzování prvků pulzního stabilizátoru . . . . .	58
2.1 Druhy bateriových článků . . . . .	7	4.4 Výsledky implementace řídicího algoritmu na mikrokontrolér C2000	61
2.2 Příčiny degradace bateriových článků . . . . .	9	<b>5 Zhodnocení a shrnutí dosažených výsledků</b>	<b>65</b>
2.3 Modely Li-Ion bateriových článků	11	5.1 Přesnost modelů bateriového článku . . . . .	65
2.4 Coulombická účinnost . . . . .	14	5.2 Dimenzování prvků pulzního stabilizátoru na základě výsledků simulace . . . . .	67
2.5 Návrh experimentu pro měření bateriových článků . . . . .	15	5.3 Vlastnosti pulzního stabilizátoru	68
2.6 Zpracování naměřených dat . . . . .	17	5.4 Zhodnocení implementace na mikrokontrolér C2000 . . . . .	69
2.6.1 Předzpracování dat . . . . .	19	<b>6 Závěr</b>	<b>71</b>
2.6.2 Určení hodnot proměnných teplota a SoC a určení veličin $Q_c$ , $Q_d$ a $Q_{eff}$ . . . . .	21	<b>Literatura</b>	<b>73</b>
2.6.3 Výpočet parametrů náhradního obvodového modelu . . . . .	22	<b>Přílohy</b>	<b>79</b>
2.6.4 Zpracování a uložení vypočítaných hodnot náhradního obvodového modelu . . . . .	26	Příloha A: Schéma zapojení pulzního stabilizátoru . . . . .	80
2.6.5 Zpracování dat z experimentů, které proběhly na více bateriových článcích stejného typu . . . . .	27	Příloha B: Schémata zapojení jednotlivých režimů pulzního stabilizátoru pro určení jeho parametrů . . . . .	82
2.7 Verifikace parametrů zvoleného obvodového modelu baterie . . . . .	28	Příloha C: Záložky programu pro určení parametrů Théveninova obvodového modelu 1. řádu . . . . .	88
<b>3 DC-DC měniče a pulzní stabilizátory</b>	<b>33</b>	Příloha D: Náповěda programu pro výpočet parametrů náhradního obvodového modelu bateriového článku . . . . .	90
3.1 Topologie vybraných DC-DC měničů . . . . .	33	Program Description . . . . .	91
3.2 Ztráty v prvcích DC-DC měničů	38	Data Processing tab . . . . .	92
3.3 Druhy modulací pro řízení DC-DC měničů . . . . .	40	Battery Type Statistics tab . . . . .	93
3.4 Návrh pulzního stabilizátoru založeného na topologii DC-DC měniče a dimenzování jeho prvků .	42	Results Viewer tab . . . . .	93
3.5 Návrh obvodu pro ověření implementace řízení na mikrokontrolér . . . . .	46	Output directories . . . . .	93
3.6 Výběr modulátoru a způsob čtení senzorů pomocí mikrokontroléru C2000 . . . . .	49	Recommendations . . . . .	95
		Příloha E: Výsledky parametrů Théveninova modelu 1. řádu pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 . . . . .	98

Příloha F: Výsledky verifikace náhradních obvodových modelů pro bateriový článek článek INR-21700, vzorek č. 1 .....	104
Příloha G: Výsledky simulace pro dimenzování prvků pulzního stabilizátoru .....	123

## Obrázky

2.1 Závislost hmotnostní hustoty energie na objemové hustotě energie jednotlivých bateriových článků [5].	8
2.2 Závislost objemové hustoty energie na hmotnostní hustotě energie jednotlivých bateriových článků [4].	9
2.3 Závislost celkové kapacity baterie v čase na různých intervalech SoC [6].	10
2.4 Model Li-ion baterie s ideálním zdrojem napětí a vnitřním odporem [8].	11
2.5 Théveninův model Li-Ion baterie 1. řádu[8].	12
2.6 Théveninův model Li-Ion baterie 2. řádu[8].	13
2.7 Možná schémata Randles modelu Li-Ion baterie (vlevo [10], vpravo [12]).	13
2.8 Testovací zařízení pro měření baterií (převzato z prezentace firmy EATON, interní zdroj firmy).	15
2.9 Příklad naměřeného průběhu z experimentu na jednom bateriovém článku a legenda naměřených veličin (Cell Request Temp – požadovaná teplota článku, Cell Temp – skutečná teplota článku, Cell Current – proud procházející článkem, Cell Voltage – napětí na svorkách článku).	18
2.10 Ideové rozdělení experimentu na části na příklady časových průběhů z jednoho experimentu.	18
2.11 Postup zpracování dat naměřených z experimentů provedených na stejném bateriovém článku a jejich vyvolání v grafickém prostředí programu.	19
2.12 Příklad záznamu průběhu proudu a napětí při nabíjení bateriového článku.	20
2.13 Příklad záznamu průběhu proudu a napětí při měření vnitřního odporu bateriového článku.	20
2.14 Příklad záznamu průběhu proudu a napětí při vybíjení bateriového článku a měření vnitřního odporu.	20
2.15 Postup zpracování dat naměřených z experimentů provedených na stejném bateriovém článku a jejich vyvolání v grafickém prostředí programu.	28
3.1 Typické obvodové zapojení step-down měniče [23].	34
3.2 Typické obvodové zapojení step-up měniče [23].	35
3.3 Typické obvodové zapojení buck-boost měniče (vlevo) [23] a flyback měniče (vpravo) [26].	37
3.4 Možnosti zapojení polovičního H-můstku (vlevo [21]) a jeho připojení k motoru se spínačem <i>Enable</i> (vpravo [32]).	37
3.5 Realizace zapojení plného H-můstku s tranzistory MOSFET se zabudovanými diodami (tzv. body diody) s připojenou zátěží [31].	38
3.6 Časový průběh napětí a proudu mezi drain a source MOSFET během jedné periody [38].	39
3.7 Časový průběh PWM [40].	40
3.8 Možná implementace PWM pro řízení step-up měniče [26].	41
3.9 Časový průběh PFM [40].	41
3.10 Možná realizace PFM pro řízení step-up měniče [26].	42
3.11 Schéma zapojení pulzního stabilizátoru s gate drivery a potřebnými senzory (bez zakreslených body diod v tranzistorech M1 – M4).	43
3.12 Modul pro řízení motoru, který byl použit v zapojení jednoduchého DC-DC měniče [43].	47
3.13 Schéma zapojení jednoduchého buck měniče pro ověření implementace řízení na mikrokontrolér C2000 (bez děliče napětí zapojeného k proudovému senzoru).	48

3.14 Fotografie výsledného zapojení (vlevo) a zatěžovací rezistor $R_z$ (vpravo).....	49	4.10 Výsledky měření při ověřování implementace algoritmu na mikrokontrolér C2000 při hodnotě vstupního napětí 16 V. ....	63
3.15 Schéma zapojení algoritmu, který je implementován na mikrokontrolér C2000 (nahore) a schémata převodu ADC hodnoty na hodnotu napětí (vlevo dole) a hodnotu proudu (vpravo dole). ....	51	6.1 Obvodové schéma zapojení pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink (tranzistory mají mezi svorkami drain a source zapojenou antiparalelně diodu (tzv. body dioda)). ....	81
4.1 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $U_0$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.....	55	6.2 Zapojení generátoru rostoucího pilovitého signálu. ....	82
4.2 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $U_0$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu.....	55	6.3 Schéma PWM modulace. ....	83
4.3 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $Q_c$ pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu. ....	56	6.4 Schéma pro nastavení hodnoty napětí na 15 V podle stavu PWM. ....	83
4.4 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_03_10_46_55_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	57	6.5 Schéma pro simulaci pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink se směrem toku výkonu do zátěže v režimu buck, rozsah napětí mezi svorkami BAT+ a BAT-48 V – 70 V. ....	84
4.5 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_03_10_46_55_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	58	6.6 Schéma pro simulaci pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink se směrem toku výkonu do zátěže v režimu buck, rozsah napětí mezi svorkami BAT+ a BAT-40 V – 48 V. ....	85
4.6 Výsledky efektivní hodnoty proudu, který prochází induktorem L.....	59	6.7 Schéma pro simulaci pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink se směrem toku výkonu ze zátěže v režimu buck, rozsah napětí mezi svorkami BAT+ a BAT-40 V – 48 V. ....	86
4.7 Výsledky efektivní hodnoty proudu, který prochází induktorem L.....	59	6.8 Schéma pro simulaci pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink se směrem toku výkonu ze zátěže v režimu boost, rozsah napětí mezi svorkami BAT+ a BAT-48 V – 70 V. ....	87
4.8 Výsledky měření při ověřování implementace algoritmu na mikrokontrolér C2000 při hodnotě vstupního napětí 8 V. ....	62	6.9 Záložka „Data Processing tab“ v programu pro určení parametrů Théveninova modelu 1. řádu bateriového článku po dokončení výpočtu.....	88
4.9 Výsledky měření při ověřování implementace algoritmu na mikrokontrolér C2000 při hodnotě vstupního napětí 12 V. ....	62		

6.10 Zálůžka „Battery Type Statistics tab“ v programu pro určení parametrů Théveninova modelu 1. řádu několika bateriových článků stejného typu. ....	89	6.20 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $C_p$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu. ....	102
6.11 Zálůžka „Results Viewer tab“ pro zobrazení výsledku jednotlivých parametrů v grafech. ....	89	6.21 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $Q_c$ pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu. ....	102
6.12 Zálůžka „Help tab“, která slouží jako nápověda k použití programu. ....	90	6.22 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $Q_d$ pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu. ....	103
6.13 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $U_0$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu. ....	98	6.23 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $Q_{eff}$ pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu. ....	103
6.14 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $R_0$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu. ....	99	6.24 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_03__10_46_55_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	105
6.15 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $R_p$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu. ....	99	6.25 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_03__10_46_55_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	105
6.16 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $C_p$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu. ....	100	6.26 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_03__10_46_55_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	106
6.17 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $U_0$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu. ....	100	6.27 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_03__10_46_55_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	106
6.18 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $R_0$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu. ....	101	6.28 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_05__09_50_03_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	107
6.19 Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr $R_p$ Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu. ....	101		

6.29 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_05__09_50_03_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	107	6.38 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_10__15_29_48_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	112
6.30 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_05__09_50_03_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	108	6.39 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_10__15_29_48_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	112
6.31 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_05__09_50_03_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	108	6.40 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_12__10_23_52_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	113
6.32 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_07__09_32_22_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	109	6.41 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_12__10_23_52_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	113
6.33 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_07__09_32_22_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	109	6.42 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_12__10_23_52_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	114
6.34 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_07__09_32_22_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	110	6.43 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_12__10_23_52_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	114
6.35 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_07__09_32_22_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	110	6.44 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_14__10_16_59_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	115
6.36 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_10__15_29_48_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	111	6.45 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_14__10_16_59_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	115
6.37 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_10__15_29_48_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	111	6.46 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_14__10_16_59_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	116

6.47 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_14__10_16_59_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	116	6.56 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_27__11_30_51_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	121
6.48 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_18__09_59_35_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	117	6.57 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_27__11_30_51_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	121
6.49 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_18__09_59_35_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	117	6.58 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_27__11_30_51_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	122
6.50 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_18__09_59_35_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	118	6.59 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_27__11_30_51_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	122
6.51 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_18__09_59_35_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	118	6.60 Graf se závislostí účinnosti na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	123
6.52 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_20__09_10_01_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	119	6.61 Závislost efektivní hodnoty proudu tekoucí kapacitorem $C_{bat}$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	124
6.53 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_20__09_10_01_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků. ....	119	6.62 Závislost zvlnění proudu tekoucí kapacitorem $C_{bat}$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	124
6.54 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_20__09_10_01_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků. ....	120	6.63 Závislost efektivní hodnoty proudu tekoucí kapacitorem $C_{48V}$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	125
6.55 Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020_11_20__09_10_01_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků. ....	120	6.64 Závislost zvlnění proudu tekoucí kapacitorem $C_{48V}$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	125
		6.65 Závislost efektivní hodnoty napětí na kapacitoru $C_{bat}$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	126



6.66	Závislost zvlnění napětí na kapacitoru $C_{bat}$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu.....	126
6.67	Závislost efektivní hodnoty napětí na kapacitoru $C_{48V}$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu.....	127
6.68	Závislost zvlnění napětí na kapacitoru $C_{48V}$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu.....	127
6.69	Závislost efektivní hodnoty proudu v induktoru $L$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu.....	128
6.70	Závislost zvlnění proudu v induktoru $L$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu.	128
6.71	Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu tranzistoru $M1$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	129
6.72	Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu tranzistoru $M2$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	129
6.73	Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu tranzistoru $M3$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	130
6.74	Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu tranzistoru $M4$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	130
6.75	Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu induktoru $L$ na poměru napětí $V_{bat}$ a $V_{load}$ podle směru toku výkonu. ....	131
6.76	Převodní charakteristika pulzního stabilizátoru podle směru toku výkonu.....	131

## Tabulky

3.1	Popis řízení tranzistorů $M1$ , $M2$ , $M3$ a $M4$ v závislosti na směru toku výkonu a hodnot napětí na kondenzátorech $C_{bat}$ a $C_{48V}$ (druhy signálů: 0 – tranzistor trvale rozepnutý, 1 – tranzistor trvale sepnutý, PWM – tranzistor řízen signálem PWM). ....	43
3.2	Určené hodnoty induktoru pro všechny režimy pulzního stabilizátoru pro proudové zvlnění $\Delta I_L = 10$ A a spínací kmitočet $f = 10$ kHz ( $L_{max}$ – nejvyšší hodnota induktoru v rámci rozsahu $D_c$ ). ....	45
3.3	Určené hodnoty induktoru pro všechny režimy pulzního stabilizátoru pro induktor s indukčností $L = 180\mu\text{H}$ a spínací kmitočet $f = 10$ kHz ( $C_{max}$ – nejvyšší hodnota kapacitoru v rámci rozsahu). ....	46
3.4	Hodnoty pasivních součástek, které byly použity v obvodu podle schématu na obrázku 3.13. ....	48



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Doležel** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **474710**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Specializace: **Elektronika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Komplexní model pulsního stabilizátoru napájeného z baterie**

Název diplomové práce anglicky:

**Complex Model of Battery-powered Pulse Stabilizer**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte teoretické posouzení parametrů běžné dostupných Li-Ion a Pb baterií. Zohledněte především náhradní parametry, kWh/l, teplotní rozsah, příčiny degradace baterie.
- 2) Navrhněte detailní numerický model Li-Ion baterie včetně vlivů úrovně nabití (SoC) a teploty baterie.
- 3) Proveďte teoreticky výběr topologie a technologie pulsního stabilizátoru 13kW/48VDC. Navrhněte vhodné zapojení a transistory. Rozeberte příčiny a rozdělení ztrát, účinnostní model pro zvolenou topologii, dimenzování pasivních prvků.
- 4) Navrhněte řízení kontrolérem C2000 - výběr modulátoru, čtení čidel a implementace do zpětnovazební smyčky.
- 5) Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PAVELKA, Prof. Ing. Jiří, DrSc. a ČEŘOVSKÝ, Prof. Ing. Zdeněk, DrSc. Výkonová elektronika [online].
- [2] LETTL, Jiří, Jiří PAVELKA a Jan BAUER. Výkonová elektronika. 4. přeprac. vyd. ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06514-3.
- [3] HELLWIG, Christian Achim. Modeling, simulation and experimental investigation of the thermal and electrochemical behavior of a LiFePO<sub>4</sub>-based lithium-ion battery [online]
- [4] MANOJ, MATHEW. Modeling and State Estimation of Lithium-Ion Battery Packs for Application in Battery Management Systems. [online]. Waterloo, Ontario, Kanada, 2018.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Vít Záhlava, CSc. katedra mikroelektroniky FEL**

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

**Ing. Pavel Cejnar, Ph.D. Eaton, Bořivojova 2380, Roztoky**

Datum zadání diplomové práce: **19.01.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Vít Záhlava, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
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



## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Vysvětlivka
AC	střídavý
A/D	analogově-digitální
ADC	analogue-digital converter - A/D převodník
CCM	continuous conduction mod – spojitý vodivostní mód
csv	comma separated values – typ souboru s daty
DC	stejnoseměrný
DCM	discontinuous conduction mode – nespojitý vodivostní mód
ESR	Equivalent Series Resistance - ekvivalentní sériový odpor
GND	uzemněný vodič, společný vodič
Li-Ion	Lithium-iontová
Li-Pol	Lithium-polymer
např.	například
NiCd	nikl-kadmiový
NiMH	nikl-metal hybrid
PFM	pulzně-frekvenční modulace
PWM	pulzně-šířková modulace
RC	kombinace zapojení rezistoru a kapacitoru v elektrickém obvodu
SoC	State of Charge - úroveň nabití baterie
SoH	State of Health - stáří baterie
tj.	to jest
tzv.	takzvaně



## Použité symboly

Symbol	Vysvětlivka
$t$	čas
$T$	teplota (jednotka °C) / perioda (podle kontextu)
$f$	frekvence
$SoC$	state of charge
$U_0$	napětí naprázdno
$R_0$	vnitřní odpor
$R_p, R_{p1}, R_{p2}$	polarizační odpor (RC článku číslo 1 / číslo 2)
$C_p, C_{p1}, C_{p2}$	polarizační kapacita (RC článku číslo 1 / číslo 2)
$U_p, U_{p1}, U_{p2}$	polarizační napětí (RC článku číslo 1 / číslo 2)
$u_p(t), u_{p1}(t), u_{p2}(t)$	časový průběh polarizačního napětí $U_p, U_{p1}, U_{p2}$
$u(t)$	časový průběh napětí $u$
$i(t)$	časový průběh proudu $i$
$I_d$	vybíjecí proud
$U_{bat}$	napětí na svorkách bateriového článku / baterie
$u_{bat}(t)$	časový průběh napětí $U_{bat}$
$X(k)$	posloupnost hodnot veličiny $X$ s indexem $k$
$Q_c$	elektrický náboj, který byl uložen do bateriového článku / baterie během nabíjení
$Q_d$	elektrický náboj, který byl získán z bateriového článku / baterie během vybíjení
$Q_{eff}$	coulombická účinnost
$U_{in}$	vstupní napětí
$U_{out}$	výstupní napětí
$D_c$	duty cycle - poměr doby sepnutí a periody
$V_{batt}, V_{battery}$	napětí na vstupní straně měniče
$V_{Cbat}$	napětí na kondenzátoru $C_{bat}$
$V_{C48V}$	napětí na kondenzátoru $C_{48V}$

Symbol	Vysvětlivka
$R_z$	zatěžovací odpor / rezistor
$I_L$	proud induktorem $L$
$I_C$	proud kapacitorem $C$
$U_L$	napětí na induktoru $L$
$U_C$	napětí kapacitoru $C$
$U_{ef}, U_{rms}$	efektivní hodnota napětí
$I_{ef}, I_{rms}$	efektivní hodnota proudu
$R_{DSON}$	odpor v sepnutém stavu tranzistoru MOSFET
$V_{DS}$	napětí mezi svorkami drain a source tranzistoru MOSFET
$I_D$	proud vstupující do svorky drain tranzistoru MOSFET
$P, P_v$	výkon
$P_p$	příkon
$P_{SW}$	spínací ztráty
$t_{SW}(ON)$	doba, po kterou je tranzistor sepnut
$t_{SW}(OFF)$	doba, po kterou je tranzistor rozepnut
$\eta$	účinnost
$e(t)$	časový průběh chybového signálu $e$
$y(t)$	výstupní signál $y$
$T_{PWM}$	perioda signálu PWM
$T_{BPRD}$	maximální hodnota čítače
$T_{TBCLK}$	perioda pracovního kmitočtu mikrokontroléru

# Kapitola 1

## Úvod

Baterie a akumulátory jsou běžnou součástí dnešního života. Vyskytují se v přenosné elektronice, jako jsou např. mobilní telefony, chytré hodinky a jiné. Slouží k napájení obvodů daného zařízení. Kromě této drobné elektroniky se baterie vyskytují také v elektrických vozidlech. Tato vozidla a také již zmíněná elektronika potřebují ke své činnosti mít stabilizované napájecí napětí. Pro efektivní návrh stabilizátoru napětí je nutné znát parametry použitých baterií. Položme si tedy otázky: Jaké jsou obvodové parametry baterií? Jak se dají parametry baterií využít k návrhu stabilizátoru?

Cílem práce je určit náhradní obvodový model baterie. Parametry modelu mají vycházet z reálně naměřených hodnot a parametry modelu budou závislé na teplotě a úrovni nabití baterie (SoC). Výpočet parametrů na základě naměřených dat bude zpracován samostatným programem. Dalším cílem je model validovat na naměřených datech a zjistit jeho případná omezení platnosti. Tento model je pak možné použít pro další aplikace. Jednou z aplikací a využití popisu baterií v závislosti na výše uvedených veličinách je návrh pulzního stabilizátoru, který je napájen z baterie, zejména dimenzování jeho součástek. Tento pulzní stabilizátor by měl umožňovat tok výkonu oběma směry. Dalším cílem bylo vyzkoušet si práci s mikrokontrolérem a vyzkoušet si implementaci algoritmu řízení na jednoduchém obvodu DC-DC měniče.

Motivací autora této práce je naučit se zpracování dat z experimentů a určení modelu a jeho validace. Na této aplikaci si chtěl autor práce vyzkoušet propojení prostředí MATLAB s programovacím jazykem C. Určený model pak autor chtěl použít na konkrétní aplikaci, kterou byl návrh pulzního stabilizátoru s tokem výkonu v obou směrech v prostředí MATLAB Simulink. Posledním bodem motivace je vyzkoušet si práci s mikrokontrolérem C2000 a jeho programování pomocí prostředí MATLAB Simulink, se kterým se autor chtěl naučit pracovat. Pro firmu bylo motivací mít vlastní zařízení pro měření bateriových článků a program, který z naměřených dat určí parametry náhradního obvodového modelu bateriového článku. Neméně důležitou součástí je použití navrženého pulzního stabilizátoru pro elektrifikaci vozidel.

Práce je členěná na několik kapitol. V kapitole Baterie a její náhradní obvodové modely jsou popsány druhy baterií a některé používané obvodové modely baterií a dalších veličin pojících se s popisem baterií. Dále v této kapitole je uveden návrh experimentu pro určení parametrů zvoleného obvo-

dového modelu a zpracování dat, aby bylo možné provést výpočet parametrů. Na konci kapitoly je popsán způsob verifikace daného modelu.

V kapitole DC-DC měniče a pulzní stabilizátory jsou popsány některé topologie DC-DC měničů, ze kterých vychází výsledný pulzní stabilizátor. Jsou zde popsány ztráty na jednotlivých prvcích stabilizátoru. Další sekce této kapitoly popisuje některé druhy modulací pro řízení DC-DC měničů, které se používají nejčastěji. V další sekci je uveden návrh pulzního stabilizátoru a dimenzování součástek, které pulzní stabilizátor obsahuje. Návrhem obvodu pro možnost testování řídicího algoritmu na mikrokontroléru C2000 se zabývá předposlední sekce kapitoly. Závěr této kapitoly popisuje výběr modulátoru, způsob čtení senzorů a implementace mikrokontroléru do zpětnovazební smyčky.

V kapitole Výsledky experimentů jsou uvedeny výsledky, které byly během samotné práce dosaženy. Budou zde popsány výsledky určení parametrů bateriového článku podle zvoleného modelu a výsledky verifikace daného modelu. Dále v kapitole budou uvedeny výsledky simulace pulzního stabilizátoru pro ověření předpokládaného dimenzování součástek a určení účinnosti. Poslední část kapitoly se zabývá výsledky implementace programu na mikrokontrolér C2000. V kapitole Zhodnocení a shrnutí dosažených výsledků uvádí shrnutí a diskuzi těchto dosažených výsledků popsaných v předchozí kapitole. Poslední kapitola Závěr shrnuje dosažené výsledky této práce.



## Kapitola 2

### Baterie a její náhradní obvodové modely

V této kapitole bude rozebráno téma baterií a jejich vlastností. V první sekci budou uvedeny existující druhy bateriových článků dostupných na trhu. Ve druhé sekci budou popsány možné příčiny degradace bateriových článků. Další sekce uvede popis některých obvodových modelů baterií, které jsou běžně používané a v následující sekci je popsána tzv. coulombická účinnost, která se pojí s využitím energie, která je v baterii uložena. V páté sekci bude popsán experiment, ze kterého bude možné určit parametry zvoleného modelu baterie. Určováním samotných parametrů daného náhradního obvodového modelu z naměřených dat a jejich zpracováním se zabývá následující šestá sekce. Poslední sekce se zabývá verifikací obvodového modelu baterie, která využívá naměřené časové průběhy určitých veličin.

#### 2.1 Druhy bateriových článků

Na trhu jsou k dispozici dva základní typy bateriových článků. Prvním typem bateriových článků jsou jednorázové, neboli také nazývané primární články[1]. Jak název napovídá, jedná se o články, které po vybití nelze opětovně nabít. Je to způsobeno změnou materiálů elektrod při vybíjení, jedná se tedy o nevratný proces. Jsou k dispozici v několika různých velikostech, např. AA, AAA, C, D, knoflíkové a další. Mezi primární bateriové články patří zinko-chloridové, nebo alkalické. Jejich nejčastější využití je v domácnostech v drobné elektronice.

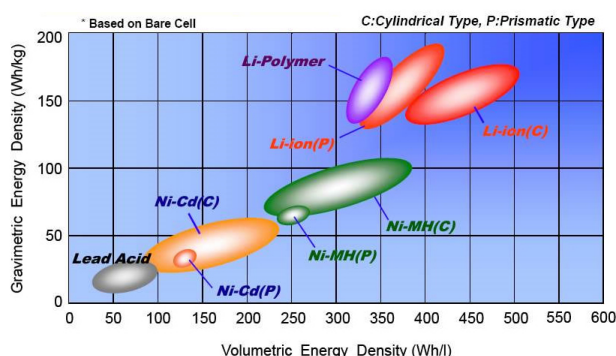
Druhým typem bateriových článků jsou sekundární články, nazývané také akumulární, akumulátory. Tyto články je možné opětovně nabíjet po jejich vybití. U těchto článků je doporučeno před použitím dobití na maximální kapacitu, neboť z výroby přichází většinou částečně nabité [2]. Velikosti těchto bateriových článků jsou různé. Některé články se vyrábí ve velikostech primárních článků. Dalšími velikostmi je např. velikost 18650. Mezi tyto druhy článků patří NiCd (nikl-kadmiové), NiMH (nikl-metal hybridové), Li-Ion, Li-Pol a olovněné elektrolytické. Jejich využití je v zejména přenosné elektronice (mobilní telefony, notebooky), dalším využití je v případě olovněných článků v automobilech a v poslední řadě jako náhrada primárních článků.

Tato práce se zabývá sekundárními bateriovými články, zejména Li-Ion články, proto zde budou uvedeny charakteristické vlastnosti výše uvedených

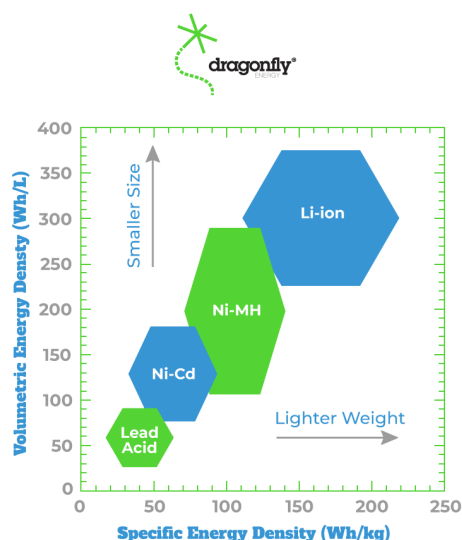
bateriových článků podle [2]. Starší NiCd a NiMH články mají nevýhodu v tzv. paměťovém efektu, kde se projevuje hloubka nabití a vybití daného článku, a tedy tento efekt zkracuje jejich životnost a snižuje jejich kapacitu. Další vlastností je jejich samovybíjení. Pokud baterie není používána delší dobu, dochází k jejímu samovolnému vybíjení. U NiMH baterií je pak další nevýhodou malý teplotní pracovní rozsah ( $-10\text{ °C} - 40\text{ °C}$ ) [1]. Životnost NiCd a NiMH článků se pohybuje v řádech nižších stovek cyklů [2]. Napětí těchto článků je 1,2 V [1]. Z toho vyplývá, že tyto články nelze vždy použít jako náhrada primárních článků, neboť primární články mají standardně napětí 1,5 V.

Bateriové články Li-Ion a Li-Pol neobsahují výše uvedené nevýhody [2]. Jejich samovybíjecí efekt má malý vliv. Články Li-Ion mění své vlastnosti v závislosti na teplotě, oproti tomu Li-Pol články lépe zachovávají své vlastnosti při změnách teploty. Li-Pol bateriové články mají pevný elektrolyt oproti Li-Ion článkům, kde je elektrolyt kapalný. Z hlediska bezpečnosti jsou bezpečnější Li-Pol články, neboť elektrolyt nemůže snadno unikat oproti Li-Ion článkům při poškození bateriového článku. Závěrem lze uvést nevýhodu Li-Pol článků oproti Li-Ion, kdy jde o jejich rychlejší stárnutí [2].

Bateriové články lze charakterizovat několika parametry. Základními parametry jsou hustota energie a hustota výkonu. Tyto veličiny jsou definovány dvěma způsoby. První způsob vztahuje energii, kterou je schopen bateriový článek uchovat, v poměru k hmotnosti daného bateriového článku [3], [4]. Tato veličina se nejčastěji uvádí v jednotkách  $Wh/kg$ . Druhým způsobem vztahuje uloženou energii vůči velikosti bateriového článku, která je uváděna v objemových jednotkách [4]. Jednotka objemové hustoty energie se uvádí ve  $Wh/l$ , lze se také setkat u baterií s násobkem této jednotky, a to  $kWh/l$ . Tyto způsoby definice platí obdobně pro vztahování výkonu k hmotnosti, případně k velikosti bateriového článku. Jednotky jsou zde definovány obdobným způsobem, hmotnostní hustota výkonu má jednotku  $W/kg$ , objemová hustota výkonu se uvádí v jednotkách  $W/l$ . Obrázky 2.1 a 2.2 zobrazují závislosti obou druhů hustoty energie s vyznačenými oblastmi hodnot, kde se pohybují jednotlivé druhy akumulčních článků.



**Obrázek 2.1:** Závislost hmotnostní hustoty energie na objemové hustotě energie jednotlivých bateriových článků [5].



**Obrázek 2.2:** Závislost objemové hustoty energie na hmotnostní hustotě energie jednotlivých bateriových článků [4].

Z těchto grafů vyplývá, že největší hodnoty objemové i hmotnostní hustoty energie mají obecně lithiové baterie. Li-Pol bateriové články mají menší hodnoty objemové hustoty energie než Li-Ion články. Na druhé straně hodnot mají nejmenší hodnoty objemové a hmotnostní hustoty energie olovené baterie, které mají přibližně třikrát menší hodnoty hmotnostní hustoty energie a čtyřikrát až pětkrát menší hodnoty objemové hustoty energie než lithiové baterie.

## 2.2 Příčiny degradace bateriových článků

V této sekci budou uvedeny různé příčiny degradace bateriových článků a jak je možné prodloužit životnost bateriových článků a baterií. Sekce se zabývá pouze akumulacími bateriovými články, neboť pouze u těchto článků lze určit degradaci. Vzhledem k povaze této práce budou uváděny příčiny zejména u lithiových baterií.

Nejdříve je nutné definovat, co je životní cyklus bateriového článku, případně baterie. Životní cyklus baterie je dvojího typu [6]. Prvním typem je tzv. životní cyklus baterie podle počtu cyklů (v anglické literatuře *cycle life* [6]). Ten uvádí životnost podle počtu provedených cyklů nabití a vybití, kdy celková kapacita baterie dosáhne 80 % původní kapacity baterie, která byla naměřena při výrobě. Druhým typem je tzv. *calendar life* [6]. Tato životnost je definována podle doby, kdy baterie není používána, od výroby baterie po pokles celkové kapacity baterie na 80 % původní kapacity. Typické hodnoty pro Li-Ion bateriové články jsou 300 až 500 cyklů a *calendar life* je 2 až 3 roky [6].

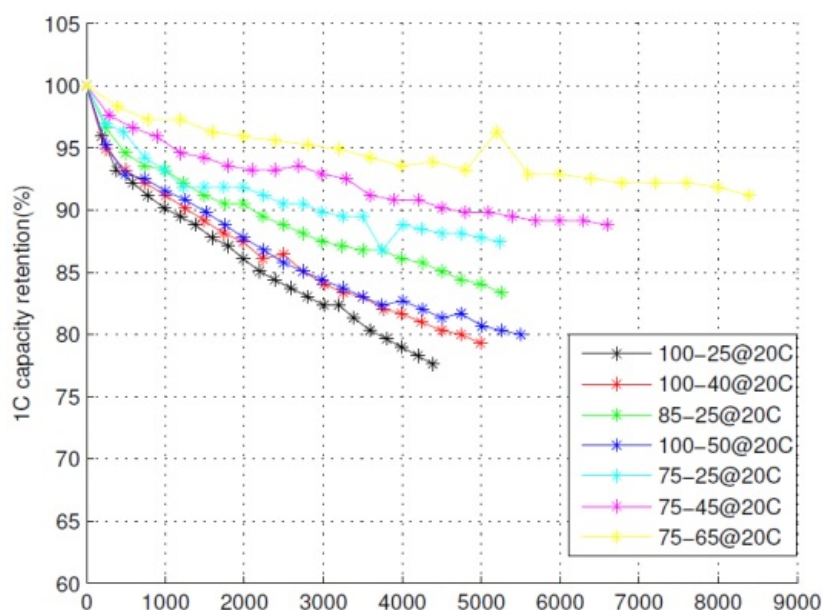
Nyní bude uvedeno několik faktorů, které jsou příčinou degradace bateriových článků a baterií. Prvním faktorem je teplota. Pokud baterii pouze skladujeme, platí, že celková kapacita baterie v čase klesá s vyšší teplotou

prostředí, ve kterém je baterie skladována [6]. Pokud je baterie používána, tak vyšší teploty zkracují její životnost [6], [7]. Naopak při nízkých teplotách díky pomalejšímu nabíjení se mohou na povrchu elektrod usazovat lithiové ionty a tím také dochází k degradaci baterie [6], [7]. Optimální pracovní teplotní rozsah baterie činí  $15\text{ }^{\circ}\text{C} - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  [7].

Druhým faktorem je veličina SoC. Tento faktor se projevuje při skladování baterie. Optimální hodnoty SoC pro skladování baterií jsou  $40\% - 60\%$ , kdy při těchto hodnotách je degradace dvakrát nižší než při plném nabití baterie (SoC = 100 %) [6].

Třetím faktorem je přebíjení a hluboké vybití baterie. V případě přebíjení se zvyšuje napětí na bateriovém článku [7]. Pokud dojde k přesáhnutí hodnoty  $4,2\text{ V}$ , může dojít k vnitřnímu zkratu článku a následně požáru [6]. V případě hlubokého vybití baterie je uvnitř baterie tlak, který může poškodit zejména zápornou elektrodu baterie, a tím se snižuje kapacita baterie a může případně dojít k poškození baterie [6].

Dalším faktorem je šířka cyklu vybití. Tato veličina je definována rozdílem hodnoty SoC při nabití baterie před vybitím a hodnoty SoC po provedení vybití a začátku nabíjení baterie [6]. Jak ukazuje graf na obrázku 2.3, nelze z grafu vyvodit obecnou závislost v závislosti na intervalu SoC při provozu baterie.



**Obrázek 2.3:** Závislost celkové kapacity baterie v čase na různých intervalech SoC [6].

Pátým faktorem degradace je nabíjecí proud. Při vyšších hodnotách proudu může dojít k vyloučení lithia na jedné z elektrod a tím dochází k snížení kapacity baterie [6]. Tento efekt je častý, pokud dochází k rychlému nabíjení baterie při nižších teplotách a vyšších hodnotách SoC.

Posledním uvedeným faktorem je koroze. Pokud se dovnitř baterie dostane voda, začne reagovat s elektrolytem [7]. Produkt vzniklý touto reakcí pak způsobuje korozi metalických materiálů uvnitř baterie.

Existuje několik způsobů, jak zvýšit životnost bateriových článků. Tyto způsoby vycházejí z výše uvedených příčin. Prvním způsobem je používat baterie v rozsahu 20 % – 80 % SoC [7]. Tento rozsah mimo jiné poskytuje optimální výkon. Dalším způsobem je omezit časté rychlé nabíjení baterií [7]. Při skladování baterií by baterie neměly být v plně nabitém stavu, nebo ve stavu hlubokého vybití. Posledním zde uvedeným způsobem je poskytnout bateriím optimální teplotní pracovní rozsah, např. nenechávat baterie na přímém slunečním záření [7].

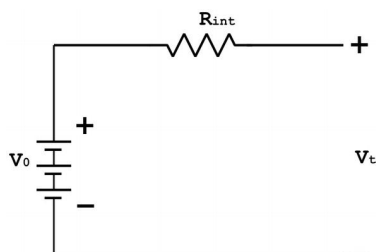
## 2.3 Modely Li-Ion bateriových článků

Většina baterií a bateriových článků (dále uváděno v této sekci pouze jako "baterie") se považuje za napěťový zdroj. V reálných zapojeních do elektrických obvodů ale nevykazují charakteristiku ideálního zdroje napětí. V této sekci je uvedeno několik ekvivalentních obvodových modelů Li-Ion baterie a u některých z modelů je uveden jejich popis na základě obvodových rovnic. Na závěr sekce jsou zmíněny další modely baterie, které nevycházejí z elektrických obvodů.

První ekvivalentní model baterie je uveden na obrázku 2.4, nazývaný rezistivní Théveninův model baterie [8]. Tento model obsahuje pouze ideální zdroj napětí a rezistor [8],[9]. Zdroj napětí je napětí baterie naprázdno (na obrázku 2.4 značen  $V_0$ ). V literatuře může být tento zdroj napětí označen také  $V_{oc}$  [9], případně  $U_{oc}$  [10], české značení může být např.  $U_0$ . Rezistor vyjadřuje vnitřní odpor baterie (na obrázku 2.4 značen  $R_{int}$ ). V literatuře může být značen také  $R_0$  [9], [10]. Pro průběh napětí na svorkách baterie  $u_{bat}$  (na obrázku 2.4 označeno veličinou  $V_t$ ) v čase při vybíjení baterie platí následujících vztah:

$$u_{bat}(t) = U_0 - R_0 \cdot i(t) \quad (2.1)$$

Veličina  $i(t)$  značí průběh proudu, který baterie dodává do zátěže. Z této rovnice vyplývá, že tento model nijak nezohledňuje charakteristiku baterie v čase, neboť neobsahuje žádný akumulací prvek, který by odrážel skutečné chování baterie, a je proto nevhodný pro dynamickou analýzu [9].



**Obrázek 2.4:** Model Li-ion baterie s ideálním zdrojem napětí a vnitřním odporem [8].

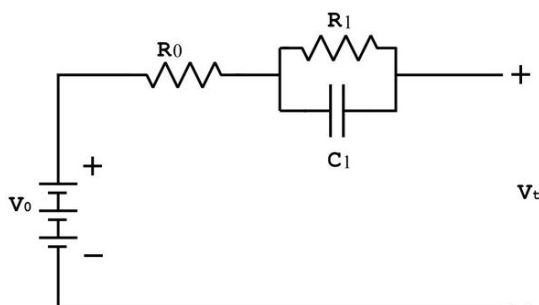
Druhý model se nazývá Théveninův model 1. řádu, který je zobrazen na obrázku 2.5. V literatuře je možné se setkat s názvem *One time constant model* [9]. Tento model se od předchozího modelu liší připojením paralelní kombinace rezistoru a kapacitoru do série k rezistoru  $R_0$ . Rezistor a kapacitor tohoto RC článku mají různá označení, kde nejčastější označení je polarizační rezistor, respektive polarizační kapacitor [10], proto je symbolické značení v literatuře různé. Na obrázku je polarizační rezistor znázorněn symbolem  $R_1$ , může být také značen  $R_p$ ; kapacitor je značen  $C_1$ , může být také značen  $C_p$  [10]. Napětí na svorkách baterie vychází z obvodových rovnic [11]. Pro průběh napětí na svorkách baterie značeném  $u_{bat}$  (na obrázku 2.5 značeno  $V_t$  mezi svorkou + a svorkou -) platí následující obecný vztah[11]:

$$u_{bat}(t) = U_0 - R_0 \cdot i(t) - u_p(t) \quad (2.2)$$

Napětí  $u_p$  zde značí napětí na polarizačním RC článku tvořeném rezistorem  $R_p$  a kapacitorem  $C_p$ . Pro napětí  $u_p$  platí následující obecný vztah daný diferenciální rovnicí [11]:

$$\frac{du_p(t)}{dt} = \frac{R_p \cdot i(t) - u_p(t)}{R_p \cdot C_p} \quad (2.3)$$

Z uvedených vztahů tedy vyplývá, že tento model dokáže aproximovat průběh napětí na svorkách baterie v čase při změně zátěže.



**Obrázek 2.5:** Théveninův model Li-Ion baterie 1. řádu[8].

Z tohoto modelu vychází další model. Obecně je možné přidat do série s rezistorem  $R_0$  více paralelních kombinací rezistoru a kapacitoru. Nejčastěji se používá model se dvěma paralelními RC články, které jsou na obrázku 2.6. Tento model se nazývá Théveninův model baterie 2. řádu, v literatuře se lze setkat s jinými označeními, např. *Two time constants model* [10]. Tento model má 6 parametrů. Oba RC články jsou většinou nazývány polarizační. Model zachycuje průběh napětí jak v krátkém čase (v řádech sekund), tak v dlouhém čase (v řádech desítek minut a více) [9]. Pro průběh napětí na svorkách baterie  $u_{bat}$  (na obrázku 2.6 není značeno, ale jedná se o napětí mezi svorkou + a svorkou -) následující obecný vztah[11]:

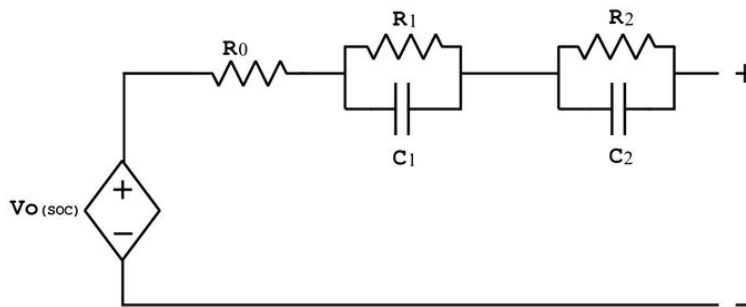
$$u_{bat}(t) = U_0 - R_0 \cdot i(t) - u_{p_1}(t) - u_{p_2}(t) \quad (2.4)$$

Napětí  $u_{p1}$  a  $u_{p2}$  jsou napětí na jednotlivých polarizačních RC člancích. Pro každé z těchto napětí platí následující vztahy dané diferenciálními rovnicemi [11]:

$$\frac{du_{p1}(t)}{dt} = \frac{R_{p1} \cdot i(t) - u_{p1}(t)}{R_{p1} \cdot C_{p1}} \quad (2.5)$$

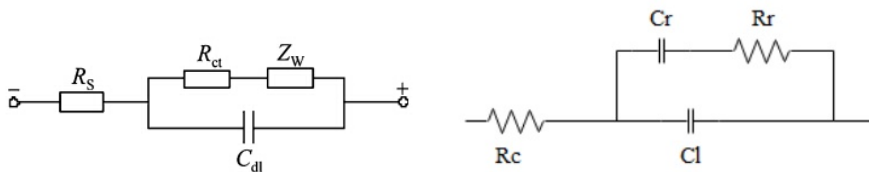
$$\frac{du_{p2}(t)}{dt} = \frac{R_{p2} \cdot i(t) - u_{p2}(t)}{R_{p2} \cdot C_{p2}} \quad (2.6)$$

Parametru  $R_{p1}$  odpovídá na obrázku 2.6 rezistor  $R_1$ , pro parametr  $R_{p2}$  odpovídá rezistor  $R_2$  a obdobně odpovídají kapacitory, pro parametr  $C_{p1}$  je to kapacitor  $C_1$  a pro kapacitor  $C_{p2}$  je to kapacitor  $C_2$ . Z výše uvedených vztahů vyplývá, že je obtížnější určit parametry tohoto modelu vzhledem k jejich počtu a možné zaměnitelnosti obou RC článků.



**Obrázek 2.6:** Théveninův model Li-Ion baterie 2. řádu[8].

Výše uvedené modely obsahují ideální zdroj napětí. Existují modely, které obsahují místo zdroje napětí ideální kondenzátor, jehož napětí se pohybuje v rozsahu napětí bateriového článku. Jedním z těchto modelů je nazýván Randles [10], [12]. Možná schémata tohoto modelu jsou zakreslena na obrázku 2.7. Kapacitor  $C_l$  na obrázku 2.7 vpravo se uplňuje ve vysokofrekvenčním modelu, neboť je hodnota kapacity nízká a může být nazývána „parazitní kapacitou“ [12]. Kapacita  $C_r$  má význam při nižších frekvencích, kde se uplatňují oba uvedené rezistory.



**Obrázek 2.7:** Možná schémata Randles modelu Li-Ion baterie (vlevo [10], vpravo [12]).

Výše uvedené modely nemají své parametry konstantní [8],[9],[10], [12]. Nejčastěji se všechny parametry daného modelu vyjadřují v závislosti na SoC. V této práci budou zvolené modely baterie mít závislost na dvou parametrech,



kterými jsou SoC a teplota, neboť jak bylo uvedeno v sekci 2.1, vlastnosti baterií se mění také s teplotou.

Existují další modely baterií než jsou pouze výše uvedené ekvivalentní obvodové modely. Další obvodové modely se zabývají závislostí parametrů baterie na veličině SoH, která vyjadřuje stárnutí baterie. V této práci se parametry použitých modelů neuvažují v závislosti na této veličině. Podrobně se touto problematikou zabývá např. disertační práce [13]. Další modely jsou elektrochemické [14]. Tyto modely jsou popsány na základě materiálů, ze kterých je baterie vyrobena. Tyto modely se zabývají elektrolytem a elektrodami z elektrochemického pohledu. Modely mohou být závislé na již výše uvedených veličinách. Modely mohou zahrnovat další parametry baterie, jako je její nábojová kapacita. O těchto parametrech baterie pojednává následující sekce.

## 2.4 Coulombická účinnost

Pojem coulombická účinnost (v anglické literatuře *coulombic efficiency*) udává, jakou část elektrického náboje z plné kapacity dodá baterie do zátěže při provení jednoho cyklu z úplného nabití do úplného vybití [15]. Z této definice vyplývá následující rovnice podle [15]:

$$Q_{eff} = \frac{Q_d}{Q_c} \quad (2.7)$$

$Q_{eff}$  značí již zmíněnou coulombickou účinnost.  $Q_d$  je náboj, který byl získán z baterie při jejím vybíjení a  $Q_c$  je náboj, který byl do baterie uložen při předchozím nabíjení [15]. Tato veličina se mění podle počtu provedených cyklů nabíjení a vybíjení a je závislá na teplotě. Z toho vyplývá, že na teplotě jsou závislé také veličiny  $Q_d$  a  $Q_c$ .

Výpočet veličin  $Q_d$  a  $Q_c$  vychází z definice pro výpočet elektrického proudu  $I$  ve vodiči pomocí elektrického náboje  $Q$  za čas  $t$  [16]:

$$I = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Z odvození, které uvádí [16] pak vyplývá následující vztah pro celkový náboj:

$$Q = \int i(t) dt \quad (2.9)$$

Tento vztah platí pro veličiny  $Q_d$  a  $Q_c$ . Jejich jednotka je coulomb (značení C, také As), ale vzhledem k tomu, že tyto veličiny vyjadřují kapacitu baterie, tak se častěji používá jednotka miliampérhodina (značení mAh), která je použita dále v této práci. Při výpočtu uvažujeme u veličiny  $Q_d$  směr proudu  $i(t)$  z baterie, při výpočtu  $Q_c$  směr proudu do baterie. Při výpočtu uvažujeme pouze absolutní hodnotu proudu, protože ve fázi nabíjení má baterie charakteristiku spotřebiče, při vybíjení je charakteristika baterie jako zdroje napětí. Hodnota veličiny  $Q_{eff}$  se nachází v intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ . Tato veličina nemá jednotku, ale může se uvádět v procentech.

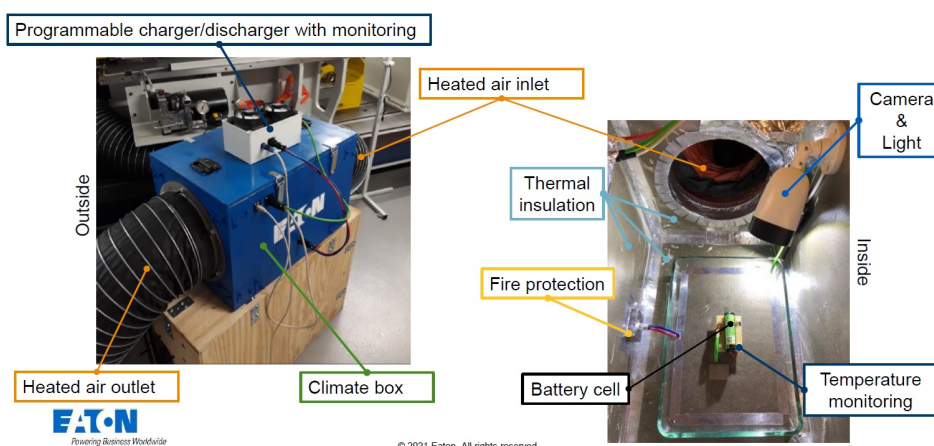


## 2.5 Návrh experimentu pro měření bateriových článků

Tato sekce se zabývá návrhem experimentu pro měření parametrů jednoho bateriového článku. Bude popsán průběh experimentu a způsob uložení naměřených dat. Poté bude popsáno testovací zařízení, do kterého je bateriový článek umístěn, a způsob programování tohoto zařízení. Autor této práce se neúčastnil konstrukce samotného zařízení pro provedení experimentů, pouze pomáhal s návrhem řízení zařízení. Zařízení konstruovali členové ERL Teamu ve firmě EATON, pracoviště Rožtoky, jehož součástí je také autor této práce.

Na obrázku 2.8 je testovací zařízení pro měření baterií, které je ve vlastnictví firmy EATON. Základ tvoří klimatická komora (Climate box), ve které je umístěna měřená baterie. Uvnitř komory se dále nachází senzor pro monitorování teploty (Temperature monitoring). Pro případ požáru je komora chráněna požární ochranou (Fire protection). Komora je tepelně izolována (Thermal insulation). Do komory vede přívod vzduchu (heated air inlet), který má určitou teplotu, a také odvod vzduchu (heated air outlet), aby bylo možné pomocí vzduchového okruhu nastavit teplotu uvnitř komory. Poslední položkou uvnitř komory je kamera s osvětlením, aby bylo možné baterii monitorovat během experimentu. Vně komory se nachází programovatelné zařízení, které monitoruje proud, napětí a teplotu baterie a řídí vybíjení a nabíjení baterie (Programmable charger/discharger with monitoring). Toto zařízení dále zaznamenává a ukládá naměřená data. Vzorkovací frekvence je přibližně 500 Hz a neobsahuje žádný antialiasingový filtr, jedná se pouze o tzv. data logger.

### Battery cell testing



**Obrázek 2.8:** Testovací zařízení pro měření baterií (převzato z prezentace firmy EATON, interní zdroj firmy).

Cílem experimentu je naměřit data, ze kterých bude možné určit parametry zvoleného obvodového modelu baterie v závislosti na veličině SoC. Pokud

provedeme více experimentů se stejným bateriovým článkem při různých teplotách, je možné určit závislost zvoleného obvodového modelu na teplotě. Dalším cílem je ověřit reprodukovatelnost měření, když se změní teplota okolního prostředí a tudíž samotného bateriového článku. Z toho vyplývá, že během experimentu budou dvě různé hodnoty teploty, ale obvodové parametry budou určeny pouze pro jednu z těchto hodnot teploty. Pokud provedeme více experimentů se stejnými podmínkami, můžeme lépe odhadnout obvodové parametry daného modelu.

Průběh experimentu byl navržen tímto způsobem na základě konzultace s ERL Teamem. Experiment je rozdělen do dvou částí. V první části je prvním krokem nastavení teploty zkoumaného bateriového článku na požadovanou hodnotu. Dalším krokem je úplné vybití baterie<sup>1</sup>. Poté se bateriový článek nabije do plné kapacity a ponechá se určitou dobu v klidu, tj. bez připojení zátěže či nabíjení. Dalším krokem je provedení krátkého proudového pulzu (maximálně jednotky sekund)<sup>2</sup>. Následující krok je postupné vybíjení baterie až do úplného vybití. Toto postupné vybíjení má několik částí. Nejprve je baterie vybíjena o přibližně 10 % SoC, které je určeno z náboje, který byl do baterie při nabíjení uložen. Druhou částí postupného vybíjení je odpojení baterie od zátěže a ponechání v klidu v řádu desítek minut. Třetí částí je provedení krátkého proudového pulzu stejným způsobem jako po určité době po nabíjení baterie. Pro provedení tohoto pulzu se baterie nechá v klidu po dobu jedné minuty. Po úplném vybití baterie končí první část experimentu.

Ve druhé části experimentu je baterie nabita opět na plnou kapacitu a po uplynutí určité doby po nabití baterie je proveden krátký proudový pulz. Druhým krokem je změna teploty v klimatické komoře. V tomto kroku je baterie odpojena od zátěže a ponechána při této teplotě několik hodin. Po této době dojde ke krátkému proudovému pulzu a opětovně se nastaví teplota zpět na původní hodnotu. Po nastavení teploty a uplynutí určité doby se provede krátký proudový pulz. Nakonec je baterie vybíjena stejným způsobem jako v první části experimentu. Po úplném vybití baterie daný experiment končí. Časová náročnost experimentu je přibližně 2 dny (viz také obrázek 2.9 v sekci 2.6).

Experiment je řízen programovatelným zařízením. Toto zařízení se programuje pomocí souboru v txt formátu. V tomto souboru jsou jednotlivé příkazy, kterými je možné experiment naprogramovat. Podmínkou je, že příkazy musí být pro zařízení známé a parametry určitých příkazů musí být v patřičném rozsahu, jinak nelze tento soubor pro naprogramování použít. Dále toto zařízení monitoruje napětí baterie a její teplotu. Pokud dojde k překročení nastavených hodnot, zařízení patřičně reaguje, např. pokud při vybíjení klesne hodnota napětí baterie na svorkách pod určitou mez, je zátěž od baterie odpojena.

Výstupem tohoto experimentu jsou naměřená data. Tato data jsou uložena ve formátu *comma separated values*, zkráceně csv. Název souboru obsahuje čas zahájení daného experimentu. V souboru jsou uloženy hodnoty napětí,

<sup>1</sup>Tento krok lze vynechat, pokud je baterie vybitá.

<sup>2</sup>Význam tohoto proudového pulzu je uveden v následující sekci 2.6.

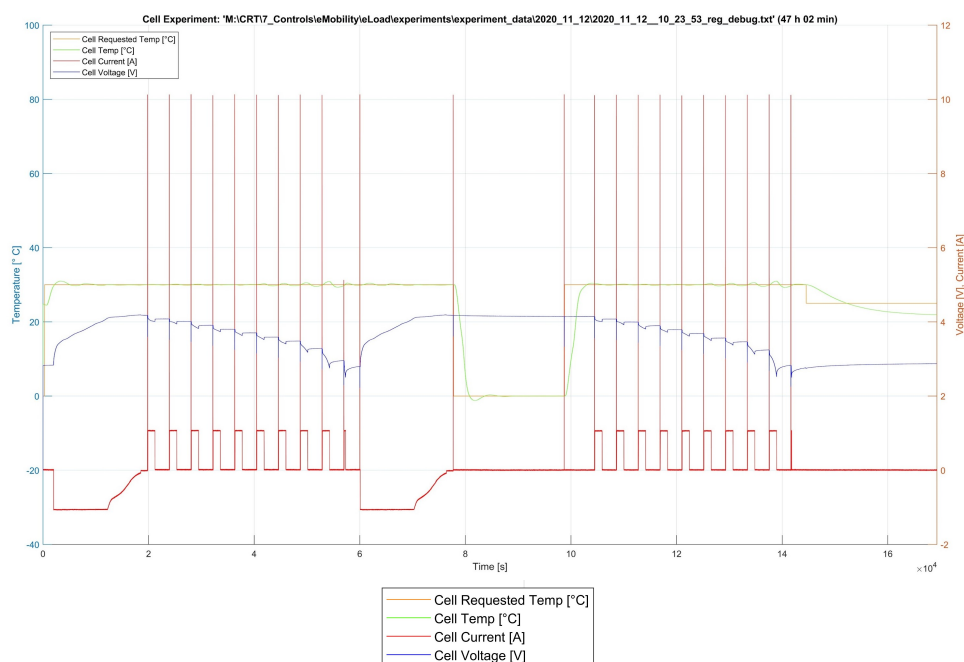
proudu, teploty, elektrického náboje v daném čase, které jsou důležité pro další zpracování. Dalšími hodnotami jsou např. prováděný příkaz a jeho parametry, indikace chyb zařízení a další. Velikost tohoto souboru je obvykle řádově vyšší jednotky GB až nižší desítky GB.

## 2.6 Zpracování naměřených dat

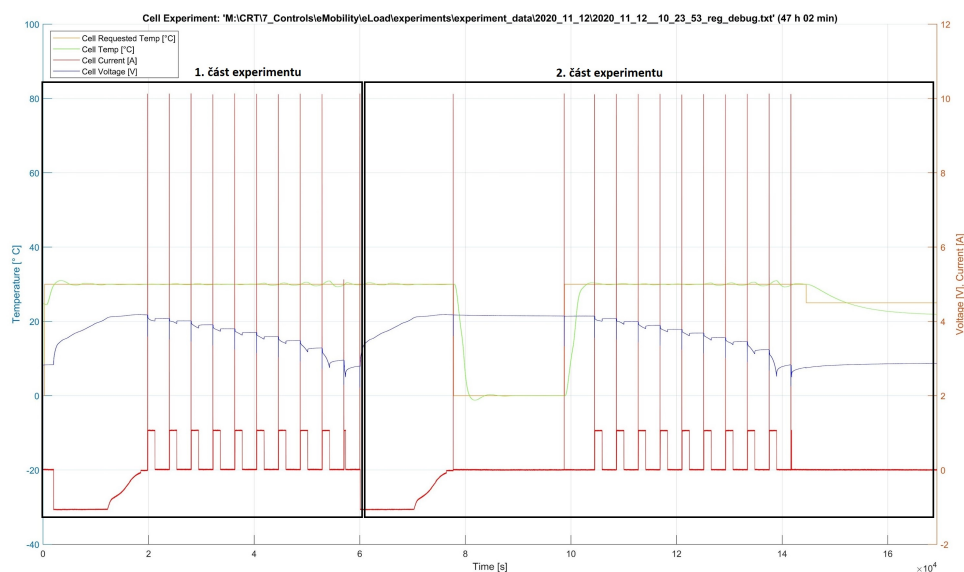
V této sekci bude popsáno zpracování naměřených dat. Nejprve bude popsáno předzpracování dat pomocí programu v jazyce C. Dalším krokem je provedení výpočtu pomocí skriptu napsaného v programu MATLAB. Budou zde uvedeny vztahy, se kterým program pracuje při určování obvodových parametrů daného modelu. Nakonec budou popsány jednotlivé výstupy z dílčích kroků a jejich další zpracování.

Vstupem pro zpracování dat jsou naměřená data z experimentů. Data musí pocházet z těch experimentů, kde byl použit stejný bateriový článek, lze použít také data pro různé bateriové články, které jsou stejného typu, např. typ bateriových článků INR-21700. Zde je v případě použití více bateriových článků doporučeno, aby na těchto článcích proběhly všechny experimenty se stejnými parametry ve stejném pořadí. Soubory z těchto experimentů je nutné připravit si do jednoho adresáře pro každý bateriový článek jednotlivě. Na obrázku 2.9 je zaznamenán průběh napětí, proudu, požadované teploty a skutečné teploty bateriového článku. Proud při měření dosahuje obou polarit, která je definována následovně: kladné hodnoty proudu znamenají, že baterie je vybíjena proudem dané hodnoty; záporné hodnoty proudu značí, že se baterie nabíjí. Na dalším obrázku 2.10 je pak zobrazeno ideové rozdělení experimentu na jeho části v rámci zaznamenaných časových průběhů.

## 2. Baterie a její náhradní obvodové modely



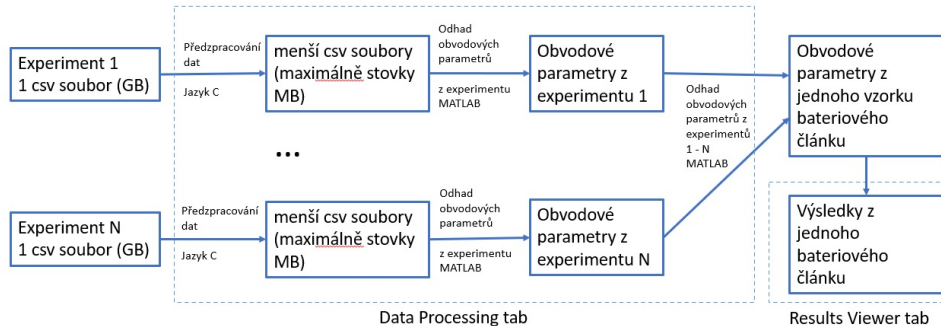
**Obrázek 2.9:** Příklad naměřeného průběhu z experimentu na jednom bateriovém článku a legenda naměřených veličin (Cell Request Temp – požadovaná teplota článku, Cell Temp – skutečná teplota článku, Cell Current – proud procházející článkem, Cell Voltage – napětí na svorkách článku).



**Obrázek 2.10:** Ideové rozdělení experimentu na části na příkladů časových průběhů z jednoho experimentu.

Na obrázku 2.11 je zobrazen způsob zpracování dat z experimentů provedených na jednom bateriovém článku. V následujících odstavcích bude popsáno zpracování dat z jednoho experimentu. Postup zpracování se neliší

napříč experimenty. Jednotlivé kroky jsou popsány v následujících sekcích. V poslední sekci 2.6.5 je popsán způsob zpracování z dat, která pocházejí z více bateriových článků stejného typu.



**Obrázek 2.11:** Postup zpracování dat naměřených z experimentů provedených na stejném bateriovém článku a jejich vyvolání v grafickém prostředí programu.

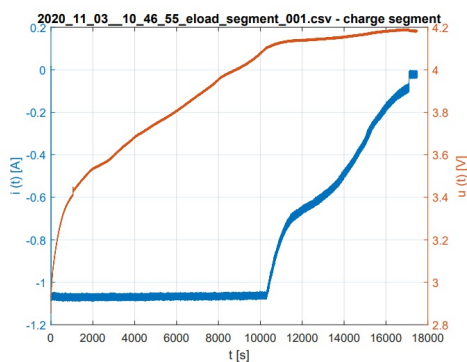
### 2.6.1 Předzpracování dat

Vzhledem k velikosti vstupních souborů je nutné data předzpracovat z důvodu doby trvání výpočtu. Toto předzpracování dat provedou funkce napsané v jazyce C. Tyto funkce jsou použity pak v samotném programu MATLAB, do kterého jsou převedeny c souborem, který konverzi umožňuje [17]. Vstupem je zmíněný adresář se soubory z experimentů. Každý soubor je zpracováván samostatně. Nejprve je soubor zkontrolován, zda neobsahuje chyby. Pokud chyby obsahuje, je proveden pokus o jejich opravení a provedena opětovná kontrola. Pokud chyby nelze opravit, soubor není dále zpracováván.

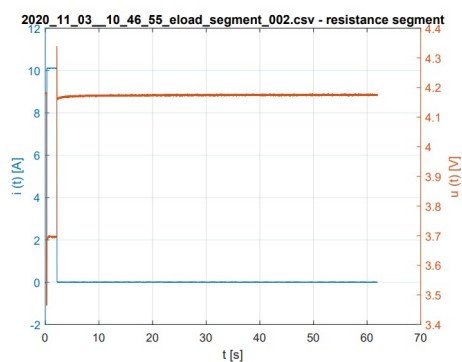
V případě, že soubor chyby neobsahuje, je vytvořen adresář pro uložení mezivýstupu. Za každý experiment je tvořen jeden adresář nesoucí jeho název. Tyto adresáře jsou uloženy ve společném adresáři nazvaném "Data\_exported", který se pak nachází ve stejném adresáři, jako jsou vstupní soubory s daty. Do adresáře, který má příslušné jméno experimentu, jsou pak uloženy menší csv soubory, které obsahují data, která jsou nutná pro další výpočet. Těmito daty jsou čas, teplota baterie, napětí, proud, hodnoty elektrického náboje a číslo vykonávaného příkazu. Tyto soubory obsahují data z těch částí experimentu, ze kterých je možné vypočítat parametry zvoleného obvodového modelu. Jmenovitě se jedná o průběh nabíjení, postupného vybíjení a krátkých proudových pulzů z obou částí experimentu. Velikosti jednotlivých souborů se liší podle délky zaznamenaného času, obecně se pohybují v řádech desítek až stovek MB. Tyto soubory se liší tím, jaká data obsahují. Celkově se jedná o 3 typy souborů:

- soubory nesoucí data z nabíjení bateriového článku
- soubory nesoucí data z měření vnitřního odporu
- soubory nesoucí data z vybíjení bateriového článku o daný krok SoC a měření vnitřního odporu

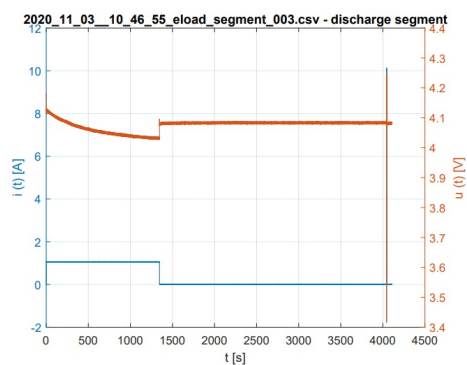
Na obrázcích 2.12, 2.13 a 2.14 se nachází příklady časových průběhů naměřených hodnot proudu a napětí podle jednotlivých druhů souborů. Z hlediska velikosti jsou obecně nejmenší soubory zaznamenávající pouze měření vnitřního odporu, naopak největší soubory jsou ze záznamu nabíjení bateriového článku.



**Obrázek 2.12:** Příklad záznamu průběhu proudu a napětí při nabíjení bateriového článku.



**Obrázek 2.13:** Příklad záznamu průběhu proudu a napětí při měření vnitřního odporu bateriového článku.



**Obrázek 2.14:** Příklad záznamu průběhu proudu a napětí při vybíjení bateriového článku a měření vnitřního odporu.

### 2.6.2 Určení hodnot proměnných teplota a SoC a určení veličin $Q_c$ , $Q_d$ a $Q_{eff}$

Jakmile jsou data předzpracována, je možné provést pokus o výpočet obvodových parametrů na základě zvoleného modelu. Výpočet i kontrola správnosti je prováděna v prostředí MATLAB. Prvním krokem výpočtu je určení hodnot proměnných, na kterých jsou obvodové parametry závislé. Určování hodnot těchto proměnných je shodné pro obě části experimentu. Těmito proměnnými jsou teplota a SoC. Teplota je určena ze všech typů souborů a jsou porovnávány střední hodnoty, které jsou počítány z naměřených průběhů. Pokud jsou hodnoty teplot v toleranci, je možné pokračovat ve výpočtu. Výsledkem je pouze jedna hodnota teploty za daný experiment a platí pro obě části experimentu. Vzhledem k přesnosti měření teploty byla zvolena tolerance teploty 2 °C.

Výpočet proměnné SoC má tři fáze. V první fázi je určen náboj, který byl do bateriového článku uložen při nabíjení. Náboj je určen maximální hodnotou průběhu náboje z naměřených dat. V naměřených datech je náboj počítán z integrálu proudu podle času. Jako výsledná hodnota je brána střední hodnota 2000 posledních hodnot v čase, protože hodnoty proudu jsou definovány pro nabíjení v záporných hodnotách. Z této střední hodnoty je brána absolutní hodnota a tím je získána maximální hodnota náboje. Tato veličina je značena  $Q_c$  s indexem 1 a 2 podle části, ze kterých byla daná hodnota určena. Zároveň je určena její směrodatná odchylka  $\sigma(Q_c)$ , která je počítána z posledních 2000 hodnot. Druhou fází je výpočet náboje  $Q_d$  ze souborů, které obsahují data z vybíjení baterie, nebo ze souborů s měřením vnitřního odporu. Při záznamu dat je při každém začátku vybíjení (včetně měření vnitřního odporu) hodnota náboje nulována, takže za každý segment dostaneme příslušnou hodnotu náboje  $Q_d$ , která je střední hodnotou hodnot, které se vyskytují v okamžiku mezi odpojením od zátěže a následujícím připojením zátěže. Zároveň je určena směrodatná odchylka  $\sigma(Q_d)$ , která je brána z těchto hodnot. Tato hodnota náboje je brána z části s průběhem z vybíjení, tak z části z měření odporu, protože vzhledem k počtu pulzů během vybíjení a náboje, který je vybit z baterie během měření odporu nelze tuto hodnotu náboje zanedbat. V poslední fázi výpočtu SoC jsou vypočítány hodnoty této veličiny. Výpočet hodnot SoC je dán vztahem:

$$SoC_N = \left(1 - \sum_{n=1}^N \frac{Q_{d_n}}{Q_c}\right) \cdot 100\% \quad (2.10)$$

Index  $N$  značí pořadí každého segmentu obsahující vybíjení baterie, nebo měření vnitřního odporu. Do výpočtu jsou zahrnuty takové hodnoty  $Q_{d_n}$  a  $Q_c$ , které pocházejí ze stejné části experimentu. Po výpočtu je provedena kontrola, zda všechny hodnoty SoC jsou v intervalu  $\langle 0\%; 100\% \rangle$ . Pokud je nalezena alespoň jedna hodnota, která tuto podmínku nesplňuje, nelze dále pokračovat ve výpočtu parametrů a s daty z tohoto experimentu se dále nepracuje. Pokud jsou všechny hodnoty SoC v uvedeném intervalu, je určena veličina  $Q_d$  za příslušnou část experimentu vztahem, ve kterém veličina  $N$



představuje celkový počet veličin  $Q_{d_n}$ :

$$Q_d = \sum_{n=1}^N Q_{d_n} \quad (2.11)$$

Směrodatná odchylka veličiny  $Q_d$  je dána vztahem:

$$\sigma(Q_d) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\sigma(Q_{d_n}))^2} \quad (2.12)$$

Dalším krokem je určení velikosti coulombické efektivity za každou část experimentu. Její velikost je dána vztahem 2.7 uvedeným v sekci 2.4. Pro směrodatnou odchylku  $\sigma(Q_{eff})$  platí vztah podle zákona o šíření chyb [18]:

$$\sigma(Q_{eff}) = \sqrt{\left(\frac{\sigma(Q_d)}{Q_c}\right)^2 + \left(-\frac{Q_d}{Q_c^2} \cdot \sigma(Q_c)\right)^2} \quad (2.13)$$

### 2.6.3 Výpočet parametrů náhradního obvodového modelu

Po ověření obou proměnných je možné určit parametry zvoleného obvodového modelu. Těmito modely jsou buď Théveninův model 1. řádu, nebo Théveninův model 2. řádu. Důvod pro zvolení těchto modelů byl v případě Théveninova modelu 1. řádu jeho jednoduchost a zároveň možnost popsat s určitou přesností průběh napětí na svorkách, když je od baterie odpojována zátěž. V případě Théveninova modelu 2. řádu byl tento model zvolen na porovnání s výše uvedeným, zda bude tento model přesnější, či nikoliv. Výpočet je možné paralelizovat, protože výpočet obvodových parametrů při daných hodnotách teploty a SoC je možné určit pouze z jednoho souboru. Pro obě části jsou použity soubory, které odpovídají pořadí jeden segment s měřením vnitřního odporu a 10 segmentů se záznamem vybíjení baterie. Pro výpočet nejsou tedy použity segmenty s měřením odporu, kdy jeden následuje po 2. nabití baterie a druhý probíhá při jiné teplotě. Všechny ostatní segmenty jsou rozděleny podle příslušnosti k určité části experimentu.

Inspirací pro výpočet byl článek [11]. Nyní si definujeme značení jednotlivých parametrů obou modelů. Pro Théveninův model 1. řádu jsou to veličiny  $U_0$  (napětí baterie naprázdno),  $R_0$  (vnitřní odpor baterie),  $R_p$  (polarizační odpor baterie) a  $C_p$  (polarizační kapacita baterie); pro Théveninův model 2. řádu jsou to veličiny  $U_0$  (napětí baterie naprázdno),  $R_0$  (vnitřní odpor baterie),  $R_{p1}$  (polarizační odpor baterie 1. RC článku),  $C_{p1}$  (polarizační kapacita baterie 1. RC článku),  $R_{p2}$  (polarizační odpor baterie 2. RC článku) a  $C_{p2}$  (polarizační kapacita baterie 2. RC článku). Parametry  $U_0$  a  $R_0$  se u obou modelů určují shodně. V případě zbývajících parametrů Théveninova modelu 2. řádu je možné tyto články zaměnit. Pro další zpracování a odlišení obou polarizačních článků bude kritériem, že bude platit vždy  $R_{p1} \leq R_{p2}$ . Pro každý obvodový parametr je určena střední hodnota a směrodatná odchylka.

Při změně proudu jsou v datech napětí zaznamenány překmity. Tyto překmity musí být odstraněny ze zpracování, neboť tyto předkmity neodpovídají zvolenému modelu, v reálném obvodu je přítomna parazitní indukčnost



vodičů. Všechny parametry obou modelů jsou závislé na teplotě  $T$  a SoC. Vzhledem k tomu, že se během jednoho experimentu při vybíjení nemění teplota, není třeba uvažovat tuto závislost.

Výpočet parametrů  $U_0$  a  $R_0$  je shodný pro oba modely, jak bylo napsáno výše. Pro výpočet jsou použity segmenty z měření vnitřního odporu, nebo segmenty z vybíjení baterie, neboť obsahují průběh krátkého proudového pulzu. Při určování tohoto parametru platí, že se neprojeví vlastnosti polarizačních RC článků vzhledem k délce proudového pulzu. Vzhledem k tomu, že se při měření mění hodnota SoC, jsou výsledkem parametru  $U_0$  dvě hodnoty pro příslušné hodnoty SoC. Pro ostatní parametry obou modelů budeme brát jejich hodnoty pouze před tímto krátkým proudovým pulzem, neboť SoC se při odpojení zátěže od baterie nemění a v tomto bodě jsou určeny zbývající parametry uvedených modelů (viz níže). Parametr  $U_0$  se určuje v krátkém časovém okamžiku před tímto proudovým pulzem a v časovém okamžiku po proudovém pulzu, neboť je zde proud nulový, takže se na svorkách baterie objeví napětí naprázdno. Z naměřených dat v těchto časových okamžicích určí jako střední hodnota vzorků v daném časovém okamžiku. Směrodatná odchylka se určí ze stejných vzorků v příslušném časovém okamžiku. Před proudovým pulzem je to časový úsek mezi změnou příkazu a provedením proudového pulzu. V případě hodnoty po tomto proudovém pulzu se směrodatná odchylka  $\sigma(U_0)$  určí z posledních 100 vzorků. Parametr  $R_0$  se určí z časového okamžiku před proudovým pulzem a z dat, které odpovídají době trvání proudového pulzu. Tento parametr je dán tedy následující rovnicí [11]:

$$R_0 = \frac{U_0 - U_r}{I_r - I_0} \quad (2.14)$$

Veličina  $U_r$  je napětí při provedení proudového pulzu,  $I_0$  je proud před proudovým pulzem a  $I_r$  je proud během proudového pulzu. Tyto tři parametry jsou určeny obdobným způsobem jako veličina  $U_0$  včetně jejich směrodatných odchylek. Proud  $I_0$  by měl být ideálně roven 0, vzhledem k přítomnosti šumu během měření bude toto číslo nízké, ale nikoliv rovno 0. Pro výpočet směrodatné odchylky parametru  $R_0$  je použit následující vztah podle zákona o šíření chyb [18]:

$$\sigma(R_0) = \sqrt{\left(\frac{\sigma(U_0)}{I_r - I_0}\right)^2 + \left(\frac{-\sigma(U_r)}{I_r - I_0}\right)^2 + \left(\frac{U_r - U_0}{(I_r - I_0)^2} \cdot \sigma(I_r)\right)^2 + \left(\frac{U_0 - U_r}{(I_r - I_0)^2} \cdot \sigma(I_0)\right)^2} \quad (2.15)$$

Další krokem je určení zbývajících parametrů zvoleného modelu. Pro jejich určení je nutné vzít soubory, které obsahují vybíjení baterie. Pro každý soubor jsou parametry počítány z toho časového záznamu, který je mezi úsekem vybíjení baterie a krátkým proudovým pulzem, protože v tomto časovém úseku jsou parametry nezávislé na veličině SoC a teplotě, protože teplota je shodná po celý cyklus vybíjení. Nejdříve bude popsán výpočet parametrů Théveninova modelu 1. řádu. Hledanými parametry jsou parametry polarizačního RC článku, jsou to  $R_p$  a  $C_p$ . Vyjděme z obecného vztahu popsáný rovnicí 2.3. Předpokládejme, že proud  $i(t)$  je v tomto časovém úseku blízký 0,

takže se neprojeví člen  $R_0 \cdot i(t)$ . Dále známe hodnotu napětí  $U_0$  z předchozích výpočtů. Upravená rovnice tedy je:

$$u_{bat}(t) = U_0 - u_p(t) \quad (2.16)$$

Zavedme časovou konstantu  $\tau_p = R_p \cdot C_p$ . Vztah pro  $u_p(t)$  je po dosazení do vztahu 2.3  $i(t) = 0$ :

$$\frac{du_p(t)}{dt} = \frac{-u_p(t)}{\tau_p} \quad (2.17)$$

Z této diferenciální rovnice lze určit vztah pro  $u_p(t)$ :

$$u_p(t) = U_p \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (2.18)$$

Veličina  $U_p$  je napětí, které bylo na RC článku v ustáleném stavu před odpojením zátěže. V ustáleném stavu kapacitorem  $C_p$  neprochází žádný proud, takže všude proud prochází rezistorem  $R_p$ . Označme si střední hodnotu vybíjecího proudu  $I_d$ . Výsledné napětí  $U_p$  je tedy dáno vztahem:

$$U_p = R_p \cdot I_d \quad (2.19)$$

Z výše uvedených vztahů lze dopočítat parametry  $R_p$  a  $C_p$  následujícími vztahy:

$$R_p = \frac{U_p}{I_d} \quad (2.20)$$

$$C_p = \frac{\tau_p}{R_p} \quad (2.21)$$

Směrodatné odchylky parametrů  $R_p$  a  $C_p$  jsou dány následujícími vztahy podle zákona o šíření chyb [18]:

$$\sigma(R_p) = \sqrt{\left(\frac{\sigma(U_p)}{I_d}\right)^2 + \left(-\frac{U_p}{I_d^2} \cdot \sigma(I_d)\right)^2} \quad (2.22)$$

$$\sigma(C_p) = \sqrt{\left(\frac{\sigma(\tau_p)}{R_p}\right)^2 + \left(-\frac{\tau_p}{R_p^2} \cdot \sigma(R_p)\right)^2} \quad (2.23)$$

Pro Théveninův model 2. řádu jsou vztahy obdobné. Pro časový okamžik po odpojení zátěže se vztah 2.4 změní ze stejných důvodů jako bylo uvedeno výše pro Théveninův model 1. řádu. Vztah tedy je:

$$u_{bat}(t) = U_0 - u_{p1}(t) - u_{p2}(t) \quad (2.24)$$

Vztahy 2.3, 2.5 a 2.6 jsou pro jednotlivé polarizační RC články podobné. Odvození napětí  $u_{p1}$  a  $u_{p2}$  je obdobné jako pro napětí  $u_p$  Théveninova modelu 1. řádu. Výsledné vztahy tedy jsou:

$$u_{p1}(t) = U_{p1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{p1}}} \quad (2.25)$$

$$u_{p2}(t) = U_{p2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{p2}}} \quad (2.26)$$

Napětí  $U_{p1}$  a  $U_{p2}$  jsou napětí na 1., respektive 2. polarizačním RC v ustáleném stavu. Veličiny  $\tau_{p1}$  a  $\tau_{p2}$  jsou časové konstanty jednotlivých RC článků. Pro parametry  $R_{p1}$ ,  $C_{p1}$ ,  $R_{p2}$  a  $C_{p2}$  platí následující vztahy, kde veličina  $I_d$  je střední hodnota vybíjecího proudu:

$$R_{p1} = \frac{U_{p1}}{I_d} \quad (2.27)$$

$$C_{p1} = \frac{\tau_{p1}}{R_{p1}} \quad (2.28)$$

$$R_{p2} = \frac{U_{p2}}{I_d} \quad (2.29)$$

$$C_{p2} = \frac{\tau_{p2}}{R_{p2}} \quad (2.30)$$

Směrodatné odchylky parametrů  $R_{p1}$ ,  $C_{p1}$ ,  $R_{p2}$  a  $C_{p2}$  jsou dány vztahy podle zákona o šíření chyb [18]:

$$\sigma(R_{p1}) = \sqrt{\left(\frac{\sigma(U_{p1})}{I_d}\right)^2 + \left(-\frac{U_{p1}}{I_d^2} \cdot \sigma(I_d)\right)^2} \quad (2.31)$$

$$\sigma(C_{p1}) = \sqrt{\left(\frac{\sigma(\tau_{p1})}{R_{p1}}\right)^2 + \left(-\frac{\tau_{p1}}{R_{p1}^2} \cdot \sigma(R_{p1})\right)^2} \quad (2.32)$$

$$\sigma(R_{p2}) = \sqrt{\left(\frac{\sigma(U_{p2})}{I_d}\right)^2 + \left(-\frac{U_{p2}}{I_d^2} \cdot \sigma(I_d)\right)^2} \quad (2.33)$$

$$\sigma(C_{p2}) = \sqrt{\left(\frac{\sigma(\tau_{p2})}{R_{p2}}\right)^2 + \left(-\frac{\tau_{p2}}{R_{p2}^2} \cdot \sigma(R_{p2})\right)^2} \quad (2.34)$$

Nyní bude popsáno určování parametrů těchto modelů v prostředí MATLAB. Nejprve jsou naměřená data upravena tak, aby počátek časové osy, kdy byla odpojena zátěž, byl v 0. Naměřená data jsou převedena následujícími vztahy pomocí vztahů 2.16 pro Théveninův model 1. řádu, respektive 2.24 pro Théveninův model 2. řádu pro usnadnění výpočtu:

$$u_p(t) = U_0 - u_{bat}(t) \quad (2.35)$$

$$u_{p1}(t) + u_{p2}(t) = U_0 - u_{bat}(t) \quad (2.36)$$

Program se pokusí data proložit modelovací křivkou. Pro Théveninův model 1. řádu je tato křivka dána vztahem 2.18, takže program se snaží najít optimální hodnoty parametrů  $U_p$  a  $\tau_p$ . Pro Théveninův model 2. řádu je křivka dána levou stranou vztahu 2.36, kde za napětí  $u_{p1}$  a  $u_{p2}$  jsou dosazeny vyjádření veličin  $u_{p1}(t)$  a  $u_{p2}(t)$ , která jsou dána vztahy 2.25 a 2.26. Hledanými parametry jsou tedy veličiny  $U_{p1}$ ,  $\tau_{p1}$ ,  $U_{p2}$  a  $\tau_{p2}$ . Pro určení parametrů je v obou případech použita funkce *fitnlm*, která slouží k proložení modelu nelineární regrese pomocí získaných vstupních dat [19].

### 2.6.4 Zpracování a uložení vypočítaných hodnot náhradního obvodového modelu

Jakmile jsou parametry ze všech souborů příslušného modelu vypočítány, dochází k jejich uložení. Před uložením těchto parametrů je nutné definovat parametry polarizačního RC článku, respektive polarizačních RC článků, pro případ nejvyšší hodnoty SoC za danou část experimentu. Vzhledem k průběhu experimentu nelze určit tyto parametry pro nejvyšší hodnotu SoC. Z tohoto důvodu jsou polarizační parametry obou modelů prohlášeny za shodné pro hodnotu celkové nejvyšší SoC hodnoty dané části experimentu a nejvyšší hodnoty SoC, pro kterou byly polarizační parametry určeny. Hodnota teploty je zaokrouhlena na nejbližší násobek 5, neboť jsme zvolili krok v závislosti na teplotě 5 °C vzhledem k toleranci v měření teploty, která je rovna 2 °C. Hodnoty parametrů jsou uloženy do mat souborů podle názvu parametru daného modelu a části experimentu. V datech je vždy soubor označující experiment, teplota, při které byly parametry určeny, hodnoty SoC, hodnoty parametrů a jejich směrodatné odchylky. Do dalších souborů jsou uloženy hodnoty veličin  $Q_c$ ,  $Q_d$  a  $Q_{eff}$  a jejich směrodatné odchylky, také tyto veličiny jsou uloženy do souborů stejným způsobem jako výše uvedené parametry. Parametry nejsou do souboru uloženy, pokud v příslušném mat souboru existují již vypočtené hodnoty za tento experiment. Všechny výsledky jsou uloženy ve stejném adresáři.

Pokud máme všechny výsledky za jednotlivé experimenty, které byly provedeny na stejném vzorku bateriového článku, je možné data dále zpracovávat. Výsledné parametry daného modelu a nábojové veličiny  $Q_c$ ,  $Q_d$  a  $Q_{eff}$  jsou průměrovány za obě části a zároveň jsou ponechány průměrné hodnoty pro každou část. V případě nábojových veličin máme závislost pouze na teplotě. Průměrovány jsou tedy vždy takové hodnoty veličin, které byly vypočítány pro shodnou hodnotu teploty. Směrodatné odchylky jsou počítány jako odmocnina ze součtu jejich druhých mocnin a druhé mocniny směrodatné odchylky hodnot, které byly pro danou hodnotu teploty průměrovány, podle zákona o šíření chyb [18]. Tyto výsledky jsou uloženy podle názvu parametru v novém adresáři. Data jsou uložena ve sloupcích. Řádky pak obsahují tento význam (bráno od prvního řádku nejvýše v tabulce):

- hodnota teploty ve °C
- hodnota parametru
- směrodatná odchylka parametru
- počet hodnot použitých pro výpočet hodnoty parametru v dané teplotě
- část experimentu vyjádřena číselnou hodnotou (1 - první část, 2 - druhá část, 12 - hodnota vypočítaná za obě části experimentu)

Pro parametry daného modelu je použit následující postup. Nejprve je nutné zarovnat hodnoty parametrů pomocí lineární aproximace na určité hodnoty SoC. Hodnoty SoC se liší intervalem. V intervalu 0 % – 30 % je

volen krok SoC 5 %, v intervalu 30 % – 100 % je tento krok roven 10 % SoC. Menší krok byl zvolen z důvodu, že v reálných experimentech mohlo dojít při nízkých hodnotách SoC k dosažení minimálního napětí baterie, takže skutečný pokles SoC mohl být velmi nízký. Po zarovnání hodnot dochází k průměrování hodnot, které mají shodné hodnoty SoC a teploty. Zároveň jsou dopočítány hodnoty časových konstant, které jsou následně průměrovány stejným způsobem. Výsledky jsou uloženy dvěma způsoby. První způsob je obdobný výše uvedenému způsobu pro nábojové veličiny. Zde mají řádky následující popis:

- hodnota teploty ve °C
- hodnota SoC v %
- hodnota parametru
- směrodatná odchylka parametru
- počet hodnot použitých pro výpočet hodnoty parametru v dané teplotě
- část experimentu vyjádřena číselnou hodnotou (1 - první část, 2 - druhá část, 12 - hodnota vypočítaná za obě části experimentu)

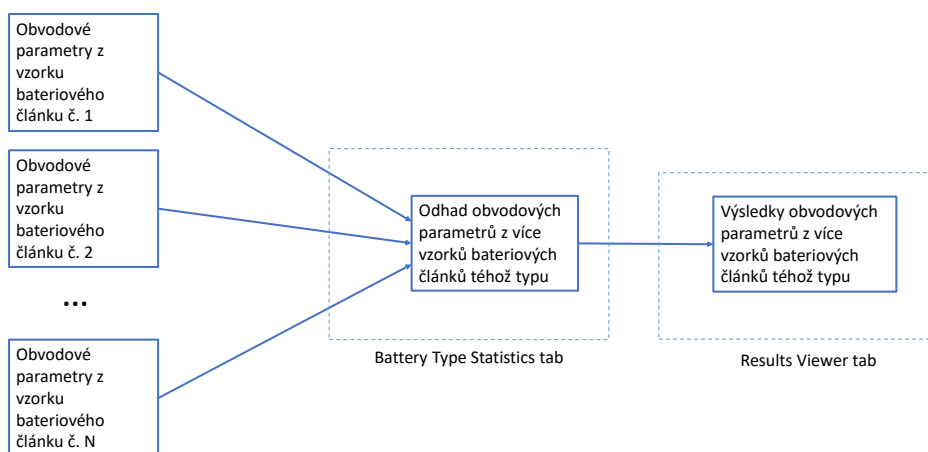
Tyto soubory jsou uloženy do stejného adresáře jako nábojové parametry. Druhým způsobem jsou uloženy pouze základní parametry. V případě modelu Théveninova 1. řádu se jedná o parametry  $U_0$ ,  $R_0$ ,  $R_p$ ,  $C_p$  a  $\tau_p$ , který je součinem parametrů  $R_p$  a  $C_p$  (jedná se o časovou konstantu RC článku tvořeném rezistorem  $R_p$  a kapacitorem  $C_p$ ); v případě modelu Théveninova 2. řádu jsou to parametry  $U_0$ ,  $R_0$ ,  $R_{p1}$ ,  $C_{p1}$ ,  $R_{p2}$ ,  $C_{p2}$  a parametry  $\tau_{p1}$  a  $\tau_{p2}$ , které jsou časové konstanty jednotlivých RC článků. Data jsou uložena do tabulky. V prvním řádku této tabulky jsou hodnoty SoC, které jsou vyjádřeny desetinným číslem v intervalu  $(0; 1)$ . V prvním sloupci tabulky jsou hodnoty teploty ve °C. Zbytek tabulky jsou pak spočítané střední hodnoty parametrů, směrodatné odchylky se v tomto případě neuvádí. V dalších tabulce jsou uloženy obdobným způsobem uloženy počty hodnot použitých pro výpočet. Výsledné hodnoty jsou v tomto případě počítány za obě části experimentu. Tato výsledná data jsou uložena do jiného adresáře, než v případě prvního způsobu uložení dat.

### ■ 2.6.5 Zpracování dat z experimentů, které proběhly na více bateriových článcích stejného typu

Pokud máme vypočítané hodnoty parametrů z více bateriových článků stejného typu, je možné určit statistiku napříč bateriovými články. Na obrázku 2.15 je uvedeno myšlenkové schéma výpočtu. Tato část funguje samostatně a je možné ji použít, máme-li vypočítané obvodové parametry dané modelu alespoň ze dvou bateriových článků<sup>3</sup>. Data jsou ukládána ve stejné formě, jak bylo popsáno v předchozích sekci. Při výpočtu středních hodnot

<sup>3</sup>Experimenty byly provedeny na každém bateriovém článku samostatně.

a směrodatných odchylek je bráno v potaz, z kolika hodnot byla původní hodnota počítána v dané teplotě při dané hodnotě SoC u konkrétního bateriového článku. Po tomto výpočtu máme obvodové parametry určené z více bateriových článků stejného typu.



**Obrázek 2.15:** Postup zpracování dat naměřených z experimentů provedených na stejném bateriovém článku a jejich vyvolání v grafickém prostředí programu.

## 2.7 Verifikace parametrů zvoleného obvodového modelu baterie

V této sekci bude popsán způsob verifikace obvodových parametrů daného modelu. Tento krok je samostatný a program během výpočtu žádnou verifikaci neprovádí. Konkrétní výsledky verifikace je možné nalézt v kapitole 4 v sekci 4.2.

Princip verifikace spočívá v porovnání simulovaných hodnot napětí, které vychází z příslušného náhradního obvodového modelu, jehož parametry jsou závislé na teplotě a SoC, s hodnotami napětí, které byly v příslušné části experimentu naměřeny. Pro verifikaci jsou použita data, která byla naměřena během vybíjení baterie včetně krátkých proudových pulzů, které jsou určeny pro měření vnitřního odporu bateriového článku. Verifikace je provedena pro každou část experimentu samostatně.

Vstupem pro výpočet simulovaných hodnot jsou data, která jsou uložena v souborech představující segmenty původního souboru, do nějž byl daný experiment zaznamenán. Druhým vstupem je adresář s výsledky parametrů daného modelu.

Před provedením verifikace je nutné odstranit vzorky dat, které odpovídají překmitům<sup>4</sup>. Druhým krokem před provedením verifikace je snížení množství

<sup>4</sup>Viz sekci 2.6, podsekce 2.6.3.

dat tím, že jsou brány pouze některé vzorky, např. každý desátý. Tyto vzorky jsou brány pouze ze souvislých úseků, tj. v místě, kde byly odebrány vzorky kvůli překmitům, které byly naměřeny, jsou vzorky zachovány na této hranici. Důvod pro odebrání množství vzorků je, že při zachování všech platných vzorků by byl výpočetní čas verifikace velmi dlouhý. Zároveň by nemělo být odebráno příliš mnoho vzorků, aby bylo možné zachytit změny veličin, které jsou příliš velké, např. proudový pulz při měření vnitřního odporu. Tento decimální faktor by měl být maximálně 25 vzhledem ke vzorkovací frekvenci, která je přibližně 500 Hz. Data při záznamu nejsou omezena pomocí antialiasingového filtru, takže z tohoto důvodu není použit tento typ filtru ani v tomto případě.

Po tomto předzpracování následuje prvním krok verifikace, který je určení proměnných teploty a SoC, jejichž hodnoty se v experimentu skutečně objevily. Teplota se určuje stejným způsobem jako bylo popsáno v sekci 2.6 v podsekcí 2.6.2. Po získání hodnoty teploty jsou brány výsledky parametrů daného modelu podle této hodnoty. Naopak SoC se v průběhu experimentu mění. Nejprve je z příslušného segmentu části experimentu určen náboj  $Q_c$ , jehož výpočet se neliší při výpočtu při určování parametrů náhradního modelu bateriového článku. Druhým krokem je samotný výpočet SoC. Ze vstupních souborů segmentů (kromě segmentu se záznamem nabíjení baterie) jsou použita data, která odpovídají sloupci s hodnotami elektrického náboje. Výpočet probíhá podle pořadí segmentů. Vzhledem k tomu, že tento sloupec má nulovou hodnotu ve chvíli, kdy přichází nový proudový pulz, je nutné přičítat k těmto hodnotám hodnotu náboje, který byl před tímto proudovým pulzem. Tento výpočet náboje odpovídá vztahu 2.11 uvedeném v podsekcí 2.6.2 s rozdílem, že  $N$  je rovno počtu hodnot  $Q_{d_n}$ , které byly vypočítány před danou konkrétní hodnotou a přičtena aktuální hodnota, aby po seřazení všech dat z těchto segmentů podle pořadí segmentu, ve kterých se data nachází, měli rostoucí posloupnost dat. Výpočet SoC je pak proveden pomocí následujícího vztahu, který vychází ze vztahu 2.10, a pro  $i$ -tou hodnotu SoC v posloupnosti platí:

$$SoC_i = 1 - \frac{Q_{d_i}}{Q_c} \quad (2.37)$$

Z tohoto vztahu dostaneme posloupnost SoC, která je klesající, platí, že pro každé  $i > j$  platí, že  $SoC_i \leq SoC_j$ . Hodnoty této posloupnosti jsou zaokrouhleny na 0,1 % SoC.

Jakmile máme určené hodnoty proměnných teploty a SoC, je možné určit hodnoty parametrů daného náhradního modelu podle těchto proměnných. Z výsledků, které odpovídají dané hodnotě teploty, je nutné určit hodnoty parametrů podle získané posloupnosti hodnot SoC. Vzhledem k tomu, že výsledky jsou vztaženy pouze k určitým hodnotám SoC, je pro zbývající hodnoty SoC použita lineární aproximace mezi 2 sousedními body určených hodnot parametrů. Po tomhle kroku dostaneme posloupnost hodnot daného parametru náhradního modelu podle posloupnosti SoC. Obě tyto posloupnosti pak odpovídají posloupnosti dat v čase při provádění experimentu.

Tyto posloupnosti pak doplňuje posloupnost hodnot proudu, který byl



během experimentu naměřen. Nyní vyjděme ze vztahů 2.2 a 2.3 pro Théveninův model 1. řádu. Řešení diferenciální rovnice 2.3 je obecně integrál. Vzhledem k tomu, že máme data v diskrétním čase, navíc v integrálu bychom měli integrál veličiny  $i(t)$ , použijeme pro výpočet integrálu Eulerovu metodu [20]. Budeme určovat posloupnost dat pro napětí  $u_p(t)$ , kterou označíme  $U_p$ . Zavedme pro tento případ indexaci veličiny  $X$  následujícím způsobem:  $X(k)$ <sup>5</sup>. V čase  $t = 0$  s bude platit, že  $U_p(1) = 0$ . Pro další hodnoty veličiny  $U_p$  platí vztah za pomoci dosazení ze vztahu 2.3:

$$U_p(k) = U_p(k-1) + \Delta t \cdot \frac{du_p(t)}{dt} \quad (2.38)$$

Veličina  $\Delta t$  je pak časový krok. Pro index  $k$  platí, že  $k \geq 2$ . Po dosazení podle vztahu 2.3 je pak výsledný vztah:

$$U_p(k) = U_p(k-1) + (t(k) - t(k-1)) \cdot \frac{R_p(\text{SoC}(k-1)) \cdot i(t(k-1)) - U_p(k-1)}{R_p(\text{SoC}(k-1)) \cdot C_p(\text{SoC}(k-1))} \quad (2.39)$$

Tuto posloupnost pak můžeme dosadit do vztahu 2.2. Pro členy posloupnosti simulovaného napětí značeném  $U_{bat}$  pak platí pro všechny indexy  $k$  vztah:

$$U_{bat}(k) = U_0(\text{SoC}(k)) - R_0(\text{SoC}(k)) \cdot i(t(k)) - U_p(k) \quad (2.40)$$

Pro Théveninův model 2. řádu platí obdobná úvaha. Vycházíme zde ze vztahů 2.4, 2.5 a 2.6. Pro výpočet integrálů byla použita Eulerova metoda. Pro posloupnosti napětí  $u_{p1}$  a  $u_{p2}$  zavedme podobné označení jako výše, tj.  $U_{p1}$ , respektive  $U_{p2}$ . Indexace těchto posloupností bude zapsána stejným způsobem jako výše u Théveninova modelu 1. řádu. Pro čas  $t = 0$  s bude platit, že  $U_{p1}(1) = 0$  a  $U_{p2}(1) = 0$ . Pro další hodnoty pak platí následující vztahy pro index  $k \geq 2$ :

$$U_{p1}(k) = U_{p1}(k-1) + (t(k) - t(k-1)) \cdot \frac{R_{p1}(\text{SoC}(k-1)) \cdot i(t(k-1)) - U_{p1}(k-1)}{R_{p1}(\text{SoC}(k-1)) \cdot C_{p1}(\text{SoC}(k-1))} \quad (2.41)$$

$$U_{p2}(k) = U_{p2}(k-1) + (t(k) - t(k-1)) \cdot \frac{R_{p2}(\text{SoC}(k-1)) \cdot i(t(k-1)) - U_{p2}(k-1)}{R_{p2}(\text{SoC}(k-1)) \cdot C_{p2}(\text{SoC}(k-1))} \quad (2.42)$$

Tyto posloupnosti je pak možné dosadit podle vztahu 2.4. Pro posloupnost  $U_{bat}$  bude v tomto případě platit následující vztah pro každé  $k \geq 1$ :

$$U_{bat}(k) = U_0(\text{SoC}(k)) - R_0(\text{SoC}(k)) \cdot i(t(k)) - U_{p1}(k) - U_{p2}(k) \quad (2.43)$$

Ve všech případech je posloupnost indexů  $k$  konečná posloupnost, protože máme k dispozici konečný počet dat.

Jakmile je vypočítán průběh simulovaného napětí, je tento průběh porovnán s naměřeným průběhem. Porovnání je provedeno dvěma způsoby, a to absolutní chybou (v práci dále nazývána „absolutní offset“) a relativní chybou

<sup>5</sup>Aby veličina  $U_p$  nebyla zaměňována s veličinami modelu Théveninova 2. řádu, budou indexu členů posloupnosti uvedeny v závorce.



(v práci dále nazývána „relativní offset“). Absolutní offset daný posloupností  $U_{offset}$  se počítá pro každé  $k \geq 1$ :

$$U_{offset}(k) = U_{bat_{sim}}(k) - U_{bat_{meas}}(k) \quad (2.44)$$

Posloupnost  $U_{bat_{sim}}$  je posloupnost s daty, které byly určeny podle zvoleného náhradního modelu (Théveninův model 1. řádu, nebo Théveninův model 2. řádu) a posloupnost  $U_{bat_{meas}}$  je posloupnost s naměřeným průběhem napětí během experimentu, který byl sestaven z dat z jednotlivých segmentů (kromě segmentu s průběhem nabíjení baterie). Pro relativní offset pak platí vztah, který byl v rámci konzultace doporučen vedoucím práce:

$$U_{offset_{rel}}(k) = \frac{U_{offset}(k)}{U_{bat_{meas}}(k)} \quad (2.45)$$

Tyto offsety jsou pro každou část experimentu zobrazeny do grafů. Tyto výsledky je možné posoudit a na základě tohoto určit přesnost daného modelu. Konkrétní výsledky a jejich posouzení je uvedeno v kapitole 4 v sekci 4.2 a v kapitole 5 v rámci diskuze v sekci 5.1.



## Kapitola 3

### DC-DC měniče a pulzní stabilizátory

Tato kapitola se zabývá topologiemi některých DC-DC měničů a pulzními stabilizátory, které jsou z těchto měničů odvozeny. V první sekci jsou popsány topologie některých DC-DC měničů, které jsou využity v této práci. Na topologie měničů navazuje popis ztrát v měničích v jeho prvcích. Třetí sekce se zabývá druhy modulací, které mohou být použity pro řízení DC-DC měničů. Čtvrtá sekce se zabývá návrhem pulzního stabilizátoru, který je odvozen z topologie DC-DC měniče. Předposlední sekce se zabývá návrhem obvodu, který slouží pro otestování implementace řídicího algoritmu v mikrokontroléru C2000 a samotným způsobem implementace. Poslední sekce se zabývá výběrem modulátoru a čtením senzorů pro řízení pulzního stabilizátoru.

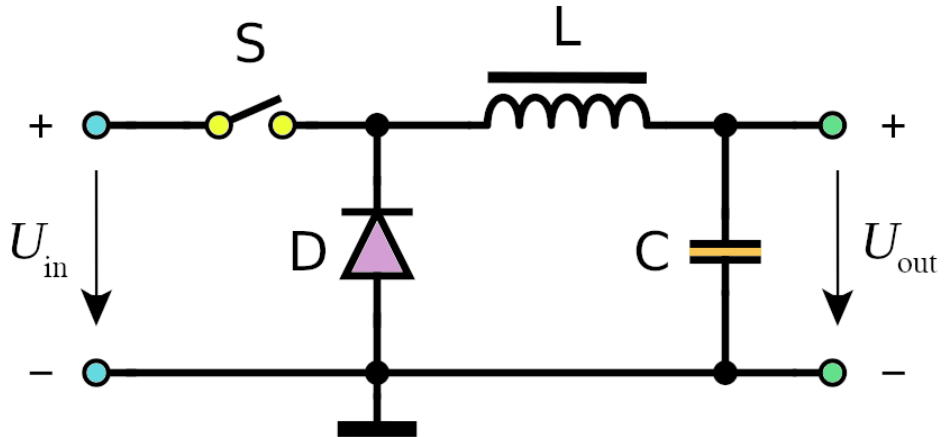
#### 3.1 Topologie vybraných DC-DC měničů

V této sekci budou popsány některé topologie DC-DC měničů. Tyto topologie měničů jsou dále použity v samotné práci.

DC-DC měniče jsou obvody, které slouží ke stejnosměrné přeměně energie [21], [22]. Vstupem těchto měničů je stejnosměrné napětí a stejnosměrný proud, výstupem je také stejnosměrné napětí a stejnosměrný proud obvykle o jiných hodnotách, než jsou hodnoty vstupních veličin. DC-DC měniče se také nazývají napěťové regulátory [23]. Tyto měniče mohou napětí zvyšovat, tak i snižovat. Podle [23] existují dva druhy měničů, a to lineární a spínané. Lineární měniče mají obvykle nižší účinnost než spínané, oproti tomu mají nižší hodnoty šumu. Vzhledem k tématu této práce budou dále rozebírány pouze některé topologie spínaných měničů.

DC-DC měniče pracují v jednom z režimů, které jsou definovány podle průběhu proudu v induktoru u těchto měničů, které induktor obsahují [24]. Tyto režimy se nazývají *continuous conduction mode* (v literatuře značen zkratkou CCM) a *discontinuous conduction mode* (v literatuře značen zkratkou DCM) [24], [25]. Někdy se uvádí třetí režim, který se nazývá *critical conduction mode*, který je na hranici mezi výše zmíněnými režimy [25]. Ve režimu CCM průběh proudu induktorem neklesá k nule za periodu spínání, naproti tomu v režimu DCM je proud induktorem v určité části spínací periody roven nule. V režimu *critical conduction mode* proud induktorem je roven 0 A v čase, který je roven násobku periody spínání.

První topologií DC-DC měniče je tzv. step-down měnič, jehož typické obvodové zapojení je na obrázku 3.1. V literatuře je tento měnič také označován *buck* [23],[26]. Jedná se o napěťový měnič, který snižuje hodnotu vstupního napětí  $U_{in}$  na hodnotu výstupního napětí  $U_{out}$ . Spínač S je řízen, na obrázku 3.1 se jedná o ideální spínač. V realizaci je tento spínač tvořen výkonovým tranzistorem. Dioda D je v zapojení nutná, aby proud mohl procházet induktorem L v případě, že je spínač S rozepnut.



**Obrázek 3.1:** Typické obvodové zapojení step-down měniče [23].

Následující vzorce platí v případě, že uvažujeme, že spínač S je ideální, zanedbáváme úbytek napětí na diodě D a máme ideální induktor L a kapacitor C. Dále uvažujeme, že na výstupní stranu měniče je připojen rezistor  $R_z$ , kterým je měnič zatěžován. V režimu CCM platí následující vztah mezi vstupním napětím  $U_{in}$  a výstupním napětím  $U_{out}$  [24], [25]:

$$U_{out} = U_{in} \cdot D_c \quad (3.1)$$

Ve vztahu veličina  $D_c$  (v anglické literatuře uváděna jako *duty cycle*) uvádí poměrnou dobu zapnutí spínače S ( $t_{on}$ ) k celé periodě  $T$ , jak uvádí následující vztahy, kde veličina  $t_{off}$  uvádí dobu vypnutí spínače S:

$$D_c = \frac{t_{on}}{T}, T = t_{on} + t_{off} \quad (3.2)$$

V režimu DCM jsou vzorce složitější. Výstupní napětí je zde závislé na hodnotě indukčnosti zvoleného induktoru  $L$ , délky spínací periody  $T$  (případně její převrácené hodnoty, kterou je pak spínací frekvence  $f$ ) a hodnotě odporu zátěže  $R_z$ . Pro velikost výstupního napětí  $U_{out}$  platí následující vztah [25], [27]:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot k}{D_c^2}}}, k = \frac{2 \cdot L}{R_z \cdot T} \quad (3.3)$$

Induktor je volen podle zvlnění proudu, který induktorem prochází, když je DC-DC měnič v ustáleném stavu. Pro zvlnění proudu v induktoru platí

následující vztah za předpokladu, že se měnič nachází v CCM režimu [28]:

$$\Delta I_L = \frac{U_{in} - U_{out}}{L} \cdot D_c \cdot T \quad (3.4)$$

Z tohoto vztahu platí pro induktor:

$$L = \frac{U_{in} - U_{out}}{\Delta I_L} \cdot D_c \cdot T \quad (3.5)$$

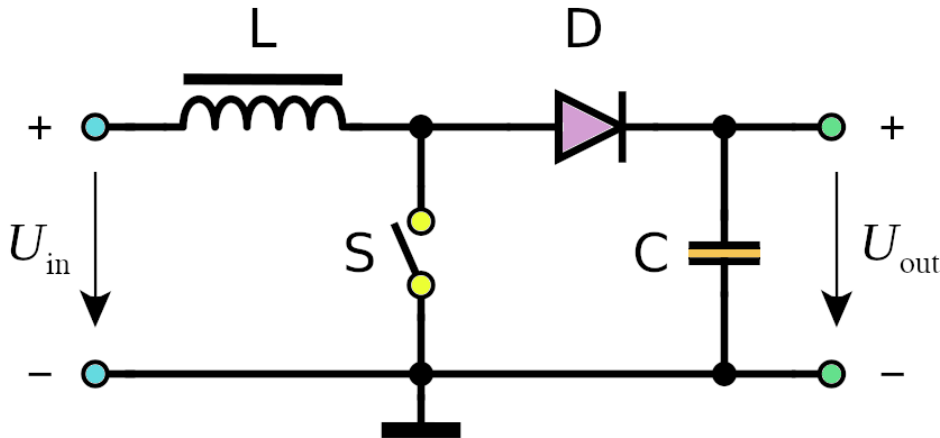
Další důležitou veličinou obecně u DC-DC měničů je zvlnění výstupního napětí  $\Delta U_{out}$ . Tato veličina uvádí, jaký je rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou výstupního napětí. Pro step-down měnič je definována tímto vztahem [28]<sup>1</sup>:

$$\Delta U_{out} = \frac{D_c \cdot (1 - D_c) \cdot U_{in}}{8 \cdot L \cdot C} \cdot T^2 \quad (3.6)$$

Z tohoto vztahu lze pro danou hodnotu zvlnění výstupního napětí dopočítat hodnotu výstupního kondenzátoru:

$$C = \frac{D_c \cdot (1 - D_c) \cdot U_{in}}{8 \cdot L \cdot \Delta U_{out}} \cdot T^2 \quad (3.7)$$

Druhou topologií DC-DC měniče je tzv. step-up měnič, jehož typické obvodové zapojení je na obrázku 3.2. V literatuře je tento měnič nazýván *boost* [23],[26]. Tento měnič zvyšuje hodnotu vstupního napětí  $U_{in}$  na hodnotu výstupního napětí  $U_{out}$ . Spínač S je řízen a v realizaci se jedná o výkonový tranzistor. Při sepnutí spínače se energie akumuluje v induktoru L. Při rozepnutí spínače S je tato energie společně se vstupní energií dodávána přes diodu D na výstup.



**Obrázek 3.2:** Typické obvodové zapojení step-up měniče [23].

Pro následující vztahy platí předpoklad, že spínač S je ideální, zanedbáváme úbytek napětí na diodě D a v obvodu jsou zapojeny ideální induktor L

<sup>1</sup>Většina literatury uvádí tento vztah pouze pro CCM režim měniče, pro DCM režim měniče nebývá vztah uveden.

a kapacitor  $C$ . Dále na výstupní straně měniče je připojena zátěž v podobě rezistoru  $R_z$ . Pokud je měnič v CCM režimu, tak pro výstupní napětí  $U_{out}$  platí vztah [28]:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{1}{1 - D_c} \quad (3.8)$$

Značení uvedených veličin je shodné jako u step-down měniče. Pro režim DCM je vzorec složitější. Výstupní napětí je závislé na hodnotě indukčnosti použitého induktoru  $L$ , spínací periodě  $T$  a odporem připojené zátěže  $R_z$ . Pro výstupní napětí  $U_{out}$  v režimu DCM tedy platí následující vztah [29]:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot D_c^2}{k}}}{2}, k = \frac{2 \cdot L}{R_z \cdot T} \quad (3.9)$$

Pro hodnotu induktoru musíme vyjít ze zvolené hodnoty zvlnění proudu, který induktorem prochází. Pro zvlnění proudu induktorem platí vztah za předpokladu, že se měnič nachází v CCM režimu: [28]:

$$\Delta I_L = \frac{U_{in}}{L} \cdot D_c \cdot T \quad (3.10)$$

Z tohoto vztahu je možné určit hodnotu induktoru:

$$L = \frac{U_{in}}{\Delta I_L} \cdot D_c \cdot T \quad (3.11)$$

Dalším vztahem je výpočet zvlnění výstupního napětí  $\Delta U_{out}$ . Tato veličina je dána následujícími vztahy [28]<sup>2</sup>:

$$\Delta U_{out} = D_c \cdot T \cdot \frac{U_{out}}{R_z \cdot C} \quad (3.12)$$

$$\Delta U_{out} = \frac{D_c \cdot T \cdot U_{in}}{(1 - D_c) \cdot R_z \cdot C} \quad (3.13)$$

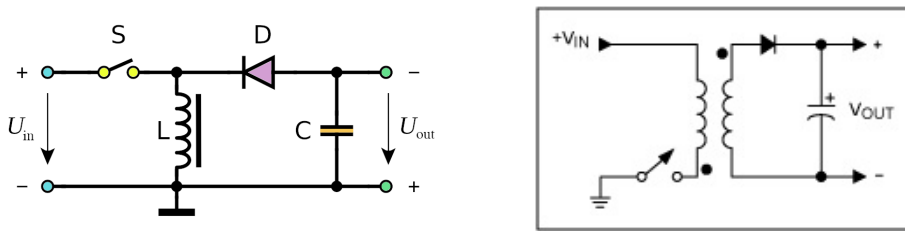
Z těchto vztahů pak je možné dopočítat hodnotu výstupního kondenzátoru:

$$C = D_c \cdot T \cdot \frac{U_{out}}{R_z \cdot \Delta U_{out}} \quad (3.14)$$

$$C = \frac{D_c \cdot T \cdot U_{in}}{(1 - D_c) \cdot R_z \cdot \Delta U_{out}} \quad (3.15)$$

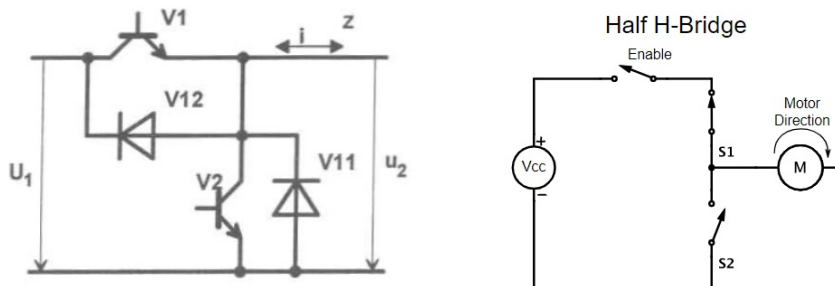
Výše uvedené DC-DC měniče patří mezi tzv. neizolované, protože vstup a výstup těchto měničů není od sebe izolován. Mezi další neizolované DC-DC měniče patří např. zapojení buck-boost, které dovoluje hodnotu vstupního napětí zvyšovat i snižovat, ale hodnota výstupního napětí je invertována. Naproti tomu izolované DC-DC měniče obvykle obsahují transformátor. Tento transformátor obvykle plní zároveň roli induktoru, neboť tyto topologie jsou odvozeny od neizolovaných zapojení. Mezi izolované DC-DC měniče patří např. flyback. Na obrázku 3.3 jsou uvedeny topologie buck-boost a flyback. Další topologie DC-DC měničů uvádí např. [23], [26].

<sup>2</sup>Většina literatury uvádí tento vztah pouze pro CCM režim měniče, pro DCM režim měniče nebývá vztah uveden.



**Obrázek 3.3:** Typické obvodové zapojení buck-boost měniče (vlevo) [23] a flyback měniče (vpravo) [26].

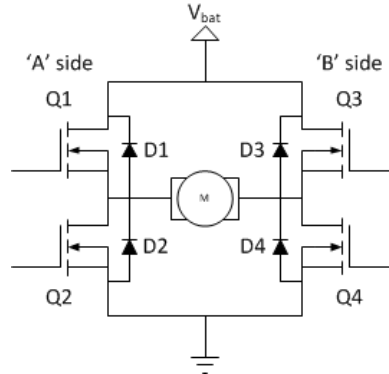
Uvedené měniče pracují z hlediska výstupní strany pouze v jednom kvadrantu. Existují další měniče, které pracují ve více kvadrantech. Těmito měniči jsou poloviční H-můstek a úplný H-můstek [21], [22], [30], [31], [32]. Možnost realizace zapojení polovičního H-můstku se nachází na obrázku 3.4. Jedná se o zapojení, které propouští obě polarity proudu [21]. Spínače mohou být tvořeny nejen tranzistory bipolárními, tak také IGBT tranzistory [30], případně tranzistory MOSFET [31]. Pokud je sepnut tranzistor V1 a tranzistor V2 rozepnut (obrázek 3.4 vlevo), proud  $i$  prochází ve směru zleva doprava (od napětí  $U_1$  k napětí  $U_2$ ). Pokud je sepnut tranzistor V2 a tranzistor V1 rozepnut, proud  $i$  má opačný směr. Pokud jsou sepnuty oba tranzistory V1 a V2, proud  $i$  je nulový a dochází ke zkratování vstupního napětí  $U_1$ . Diody V11 a V12 mají ochrannou funkci v případě, že je na výstupní straně znázorněná napětím  $U_2$  připojena indukční zátěž jako např. v případě znázorněném na obrázku 3.4 vpravo (indukční zátěž je zde znázorněna elektromotorem).



**Obrázek 3.4:** Možnosti zapojení polovičního H-můstku (vlevo [21]) a jeho připojení k motoru se spínačem *Enable* (vpravo [32]).

Na obrázku 3.5 je realizace zapojení plného H-můstku. Je tvořen čtyřmi spínači, které jsou zde tvořeny tranzistory MOSFET. Toto zapojení se také řadí mezi jednofázové střídače [21], [22]. Zátěží tvořenou elektromotorem M může procházet proud obou polarit. Pokud jsou sepnuty tranzistory Q1 a Q4, přičemž jsou tranzistory Q2 a Q3 jsou rozepnuty, proud prochází elektromotorem M ve směru zleva doprava [31]. Pokud jsou sepnuty tranzistory Q2 a Q3 a tranzistory Q1 a Q4 jsou rozepnuty, proud prochází zátěží opačné polarity. V ostatních případech proud zátěží neprochází. Pokud je sepnuta jedna strana tranzistorů (na obrázku 3.5 jsou značeny 'A' side a 'B' side),

dochází k přetěžování těchto tranzistorů a může dojít ke zničení součástek. Diody D1 – D4 slouží k ochraně tranzistorů před překmity, které vznikají na indukčním prvku (zde je to elektromotor M).



**Obrázek 3.5:** Realizace zapojení plného H-můstku s tranzistory MOSFET se zabudovanými diodami (tzv. body diody) s připojenou zátěží [31].

### 3.2 Ztráty v prvcích DC-DC měničů

V předchozí kapitole 3.1 jsme předpokládali ideální spínací prvky a ideální indukty a kapacitory. Reálné prvky vykazují v obvodech výkonové ztráty. Obecně pro ztrátový výkon platí vztah [33]:

$$P = U \cdot I \quad (3.16)$$

Reálné indukty a kapacitory mají parazitní vlastnosti. Na činných ztrátách se v obou případech podílí zejména nežádoucí sériový odpor  $R_s$  (v anglické literatuře bývá značen ESR - Equivalent Series Resistance) [33]. Pro výkonové ztráty tedy platí vztah, který využívá hodnotu tohoto odporu [34], [35]:

$$P = R_s \cdot I_{ef}^2 \quad (3.17)$$

Veličina  $I_{ef}$  je efektivní hodnota proudu, která kapacitorem, nebo induktorem, prochází a  $R_s$  je sériový parazitní odpor (ESR).

Ztráty reálných spínacích prvků se dělí na statické a dynamické. Statické ztráty jsou obecně definovány obecně vztahem 3.16. Pro diody zapojené v propustném směru je ztrátový výkon roven součinu propustného napětí na diodě a proudu procházejícího diodou, tedy tento vztah odpovídá výše uvedenému vztahu 3.16. V případě bipolárních tranzistorů jsou výkonové ztráty definovány vztahem [33]:

$$P = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B \quad (3.18)$$

Vzhledem k hodnotám proudu  $I_B$  vůči hodnotě proudu  $I_C$  a srovnatelným hodnotám napětí lze zanedbat v rovnici 3.18 součin týkající se přechodu báze-emitor. Pro MOSFET platí následující vztah pro statické ztráty [36]:

$$P = R_{DS} \cdot I_D^2 \quad (3.19)$$



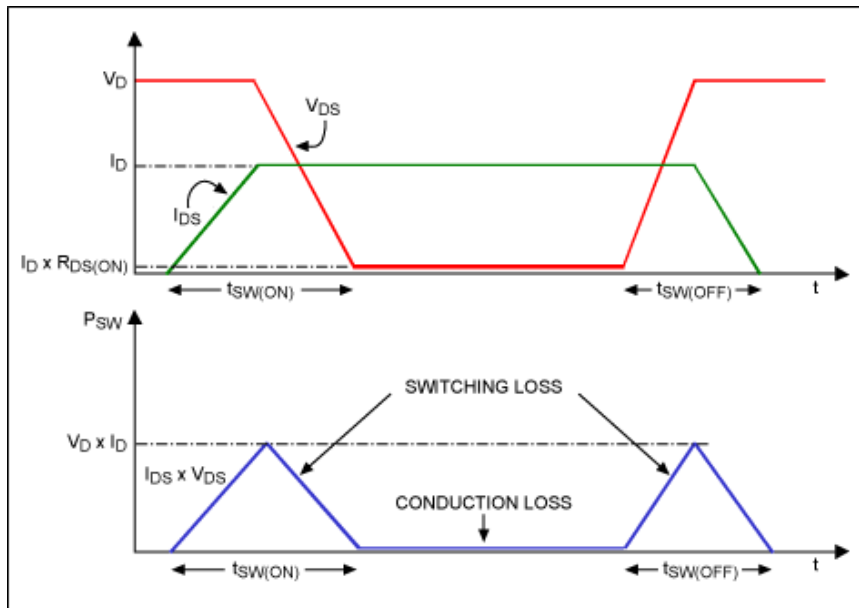
Dynamické ztráty vychází z časového průběhu proudu a napětí ve spínacím prvku. Obecně jsou energetické vypínací ztráty při změně stavu součástky (sepnuto / rozepnuto) definovány [37]:

$$E = \int_{t_a}^{t_b} u(t) \cdot i(t) dt \quad (3.20)$$

Časový interval je dán hodnotami  $t_a$  a  $t_b$ , kde  $t_a$  značí začátek změny stavu součástky a  $t_b$  značí konec změny stavu. Pokud chceme výkonové ztráty, tak hodnotu energetických ztrát dělíme periodou spínání součástky. Pro výkonový MOSFET jsou charakteristické spínací ztráty. Na obrázku 3.6 je zobrazen průběh napětí mezi drain a source (veličina  $V_{DS}$ ) a proudu procházející drain a source (veličina  $I_{DS}$ ) při zapínání a vypínání MOSFET. Podle průběhů těchto veličin je patrné, že ztráty rostou po dobu, kdy se mění jedna z uvedených veličin, zatímco druhá z veličin zůstává konstantní. Doba zapínání MOSFET je značena veličinou  $t_{SW}(ON)$ , doba vypínání tranzistoru je značena  $t_{SW}(OFF)$ . Spínací ztráty MOSFET značené  $P_{SW}$  jsou dány vztahem [38]:

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \cdot V_D \cdot I_D \cdot (t_{SW}(ON) + t_{SW}(OFF)) \cdot f_s \quad (3.21)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že výkonové ztráty rostou se spínací frekvencí  $f_s$ .



**Obrázek 3.6:** Časový průběh napětí a proudu mezi drain a source MOSFET během jedné periody [38].

U diod je dalším důležitým parametrem doba závěrného zotavení [33]. Během této doby diodou prochází proud v závěrném směru do doby, než se dioda stane nevodivou a začne blokovat průchod proudu. Díky tomuto jevu dochází v diodě k dalším výkonovým ztrátám.

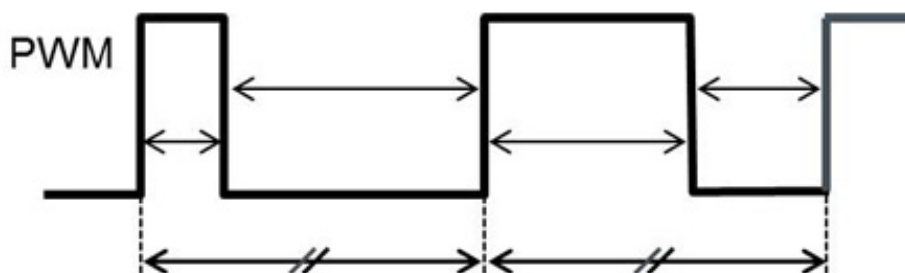
Pokud chceme určit celkové výkonové ztráty dané součástky, musíme znát hodnoty statických ztrát, tak dynamických ztrát. Celkové výkonové ztráty jsou obecně dány součtem statických výkonových ztrát a dynamických výkonových ztrát.

### 3.3 Druhy modulací pro řízení DC-DC měničů

Tato sekce pojednává o dvou nejčastěji používaných technikách modulace pro řízení DC-DC měničů. Těmito modulacemi jsou pulzně-šířková modulace (PWM) a pulzně-frekvenční modulace (PFM).

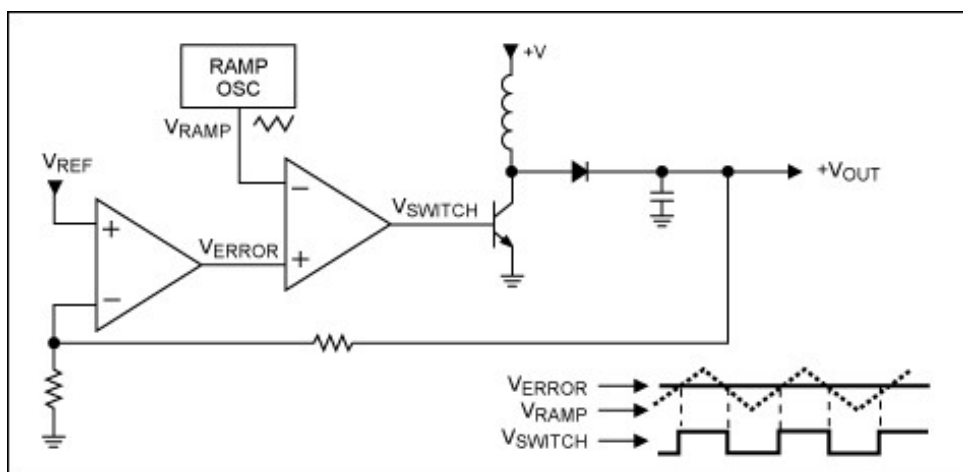
Spínací tranzistory mohou být řízeny několika způsoby. Vstupem tohoto řízení je hodnota poměrného sepnutí tranzistoru  $D_c$ . Tato hodnota je modulována podle dané metody.

Prvním uvedeným způsobem modulace je použití PWM. Spínací tranzistor je spínán obdélníkovým signálem, který má konstantní periodu, ale mění se délka trvání pulsu (jinými slovy šířka pulzu) [39]. Odsud vznikl název pulzně-šířková modulace (v anglické literatuře *pulse width modulation*). Na obrázku 3.7 je zobrazen časový průběh signálu vzniklý PWM modulací. Možná realizace je zobrazena na obrázku 3.8. Zde je PWM modulátor realizován pomocí generátoru pilovitého signálu (RAMP OSC) a komparátoru, jehož druhým vstupem je chybový signál a výstup je připojen na výkonový tranzistor.



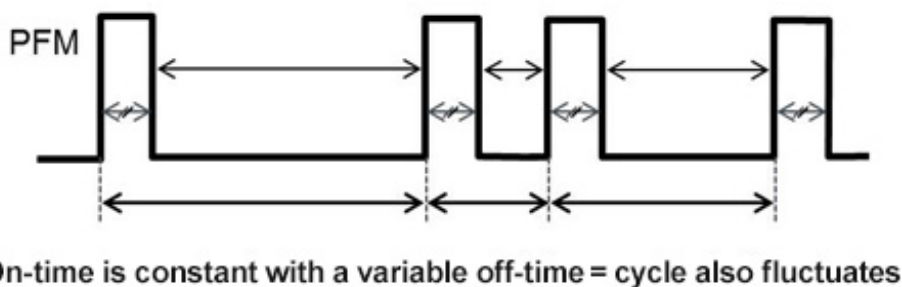
The cycle remains constant with a variable on/off time ratio

Obrázek 3.7: Časový průběh PWM [40].

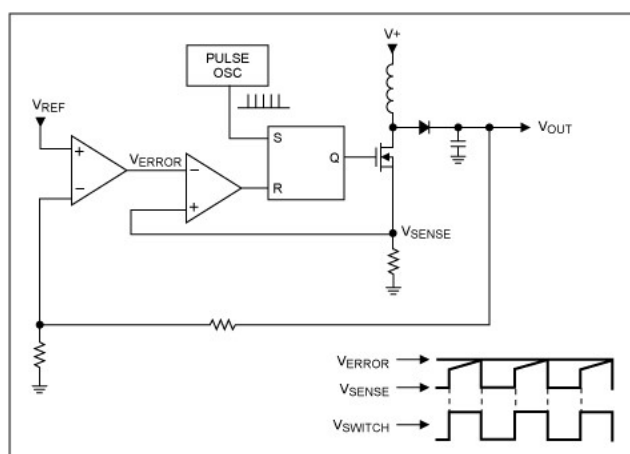


Obrázek 3.8: Možná implementace PWM pro řízení step-up měniče [26].

Druhým uvedeným způsobem modulace je použití PFM. Spínací tranzistor je taktéž spínán obdélníkovým signálem, ale délka trvání pulzu je konstantní [40]. Mění se zde doba trvání, kdy je tranzistor rozepnut. Tím se mění délka periody signálu, odsud vznikl název pulzně-frekvenční modulace (v anglické literatuře *pulse frequency modulation*). Na obrázku 3.9 je zobrazen časový signálu vzniklého pomocí PFM. Možná realizace PFM modulátoru je zobrazen na obrázku 3.10. Zde je modulátor tvořen generátorem obdélníkového signálu o určité frekvence a konstantní střídě a RS klopným obvodem, jehož resetovacím vstupem je zpracovaný chybový signál. Výstup tohoto obvodu řídí výkonový tranzistor.



Obrázek 3.9: Časový průběh PFM [40].



Obrázek 3.10: Možná realizace PFM pro řízení step-up měniče [26].

### 3.4 Návrh pulzního stabilizátoru založeného na topologii DC-DC měniče a dimenzování jeho prvků

Tato sekce pojednává o návrhu pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink. Sekce se zabývá obvodovým zapojením stabilizátoru. Je zde pojednáváno o dimenzování pasivních součástek a tranzistorů podle požadavků na stabilizátor. V sekci a dále budou pro obvod pulzního stabilizátoru používány jako pojem „pulzní stabilizátor“, tak „DC-DC měnič“.

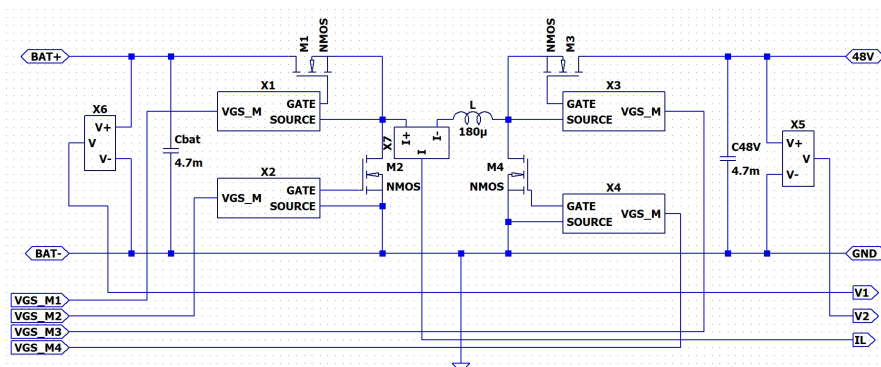
Podle zadání má pulzní stabilizátor na bázi DC-DC měniče mít následující vlastnosti:

- výstupní napětí 48 V stejnosměrných, maximální výkon 13 kW
- vstupní napětí v rozmezí 40 V – 70 V
- umožňovat oboustranný tok výkonu

Z výše uvedených požadavků vyplývá, že měnič musí napětí zvyšovat i snižovat. Vzhledem k tomu, že obě napětí jsou kladná, tak nelze vycházet z topologie buck-boost, protože tento měnič napětí invertuje a dále nebylo by možné nahradit diodu tranzistorem, aby bylo možné řídit tok výkonu oběma směry. Z toho vyplývá, že je nutné vyjít z topologií step-down a step-up měniče. Tyto topologie je možné spojit do výsledného schématu, které je uvedeno v příloze A na obrázku 6.1<sup>3</sup>, a na obrázku 3.11. Základem této topologie je H-můstek, jehož obě strany nemají společné napětí oproti H-můstku na obrázku 3.5, pouze mají společnou zem. Toto zapojení umožňuje tok výkonu oběma směry a zároveň zvyšovat i snižovat napětí. Z toho vyplývá, že máme celkem 4 možné režimy, ve kterých se může stabilizátor nacházet. V modelu tranzistorů je zabudovaná tzv. body dioda, která není ve schématech zakreslena u příslušného

<sup>3</sup>V této příloze je zakresleno kompletní schéma se všemi senzory.

tranzistoru [41]. Připojení svorek BAT+, BAT-, 48V a GND bude uvedeno v kapitole 4 v sekci 4.3 pro každý režim pulzního stabilizátoru.



**Obrázek 3.11:** Schéma zapojení pulzního stabilizátoru s gate driversy a potřebnými senzory (bez zakreslených body diod v tranzistorech M1 – M4).

Ze schématu uvedeném v příloze A jsou dále vyvedeny veličiny vstupního proudu  $I_1$ , vstupního napětí  $V_1$ , proudu procházející induktorem  $I_L$ , výstupního napětí  $V_2$  a výstupního proudu  $I_2$ . U těchto veličin je zařazen blok zpoždění, který symbolizuje dobu převodu měřené veličiny na číslo. Toto zpoždění je rovno  $1 \mu\text{s}$ , což řádově odpovídá době převodu běžných A/D převodníků. Další senzory slouží k zaznamenání veličin, které budou dále uvedeny a jsou použity pro dimenzování součástek měniče.

Gate každého z tranzistorů je řízen zdrojem napětím, jehož druhý konektor je připojen k source příslušného tranzistoru. Tento zdroj napětí je řízen pomocí signálu, který vstupuje prostřednictvím příslušného signálu VGS\_M1, VGS\_M2, VGS\_M3 a VGS\_M4. Tímto signálem je hodnota ve voltech, která má být připojena mezi gate a source. Jsou možné pouze dvě hodnoty napětí, kterými jsou  $0 \text{ V}$  a  $15 \text{ V}$ , což odpovídá logickým signálům logická 0 pro  $0 \text{ V}$  a logická 1 pro  $15 \text{ V}$ . V tabulce 3.1 jsou uvedeny řídicí signály tranzistorů pro daný režim měniče podle směru toku výkonu a hodnot napětí na kondenzátorech  $C_{bat}$  a  $C_{48V}$ . Rezistory  $R_{G1}$ ,  $R_{G2}$ ,  $R_{G3}$  a  $R_{G4}$  symbolizují odpor gate tranzistoru, protože tento odpor není možné nastavit v modelu tranzistoru [41].

Směr toku výkonu	Vztah mezi napětími $U_{C_{bat}}$ a $U_{C_{48V}}$	Řídicí signál tranzistoru			
		M1	M2	M3	M4
BAT+ → 48V	$U_{C_{bat}} > U_{C_{48V}}$	PWM	0	0	0
BAT+ → 48V	$U_{C_{bat}} \leq U_{C_{48V}}$	1	0	0	PWM
48V → BAT+	$U_{C_{bat}} > U_{C_{48V}}$	0	PWM	1	0
48V → BAT+	$U_{C_{bat}} \leq U_{C_{48V}}$	0	0	PWM	0

**Tabulka 3.1:** Popis řízení tranzistorů M1, M2, M3 a M4 v závislosti na směru toku výkonu a hodnot napětí na kondenzátorech  $C_{bat}$  a  $C_{48V}$  (druhy signálů: 0 – tranzistor trvale rozeptutý, 1 – tranzistor trvale sepnutý, PWM – tranzistor řízen signálem PWM).

Nyní je možné přejít k dimenzování prvků tohoto stabilizátoru. Maximální hodnota proudu do zatěže je dána maximálním výkonem a požadovaným napětím. Ze zadání pro požadavky na maximální výkon  $P_{max} = 13 \text{ kW}$  a hodnotu napětí  $U_{out} = 48 \text{ V}$  dostaneme hodnotu maximálního proudu:

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_{out}} = \frac{13000}{48} \doteq 270,83 \text{ A}$$

Pro tuto hodnotu proudu je měnič dále navrhován a od této hodnoty proudu se dále odvíjí další výpočty. Pokud předpokládáme stoprocentní účinnost měniče, je možné určit hodnoty vstupního proudu. Platí, že příkon je v tomto případě roven výkonu. Tento předpoklad platí pro oba směry toku výkonu. Pro rozsah napětí  $40 \text{ V} - 70 \text{ V}$  dostáváme tento rozsah proudu:

$$I = \frac{P_{max}}{U}$$

$$I_{40V} = \frac{13000}{40} = 325 \text{ A}$$

$$I_{70V} = \frac{13000}{70} \doteq 185,71 \text{ A}$$

Z výsledného rozsahu proudu  $185 \text{ A} - 325 \text{ A}$  dostáváme požadavek na tranzistory a induktor. Tyto prvky by měly být dimenzovány na maximální hodnotu tohoto rozsahu, která je zvýšena o zvlnění proudu v induktoru. Zvlnění proudu induktorem bylo zvoleno o hodnotě  $\Delta I_L = 10 \text{ A}$ . Z toho vyplývá, že tranzistory a induktor by měly být dimenzovány na proud  $335 \text{ A}$ . V praxi je lepší mít tuto hodnotu vyšší. Odhad dimenzování těchto součástí na hodnoty proudu byl stanoven na minimálně  $350 \text{ A}$ .

Tranzistory by dále měly být dimenzovány na maximální hodnotu napětí, které se v obvodu vyskytuje, což je  $70 \text{ V}$ . V praxi je lepší volit rezervu, aby součástky nebyly provozovány na mezních hodnotách, tedy byla zvolena hodnota napětí  $80 \text{ V}$ . Na tuto hodnotu napětí by zároveň měly být dimenzovány oba kondenzátory. Tyto kondenzátory jsou navrhovány se shodnými hodnotami kapacity. Pro proudové dimenzování těchto kapacitorů jsou použity simulace obvodu. Prvním odhadem dimenzování by mohlo být proudové dimenzování tranzistorů, tedy požadavek na proud je minimálně  $350 \text{ A}$ . Všechny tyto předpoklady budou pomocí simulace ověřeny.

Dané podmínky splňuje tranzistor IXFK420N10T [42]. Maximální ztrátový výkon je  $1,67 \text{ kW}$ . Pro tuto hodnota maximálního ztrátového výkonu je nutné zpětné ověření po provedení simulací. Tento tranzistor má nízký odpor v sepnutém stavu ( $R_{DS(ON)} = 2,6 \text{ m}\Omega$ ). Vlastnosti tohoto tranzistoru budou použity v simulacích. Tento tranzistor je možné řídit napětím  $15 \text{ V}$ .

Nyní určíme hodnoty induktoru  $L$  a kondenzátorů  $C_{bat}$  a  $C_{48V}$ . Pulzní stabilizátor navrhujeme v CCM režimu. Pro výpočet hodnoty induktoru  $L$  vycházíme ze vztahů 3.5 a 3.11, které se týkají step-down, respektive step-up měniče. Tento výpočet musíme provést pro všechny 4 režimy stabilizátoru. Pro jejich výpočet potřebuje také vztahy pro poměr sepnutí tranzistoru 3.1

### 3.4. Návrh pulzního stabilizátoru založeného na topologii DC-DC měniče a dimenzování jeho prvků

a 3.8, ze kterých vyjádříme veličinu  $D_c$ . Upravené rovnice tedy jsou pro buck režim:

$$D_c = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (3.22)$$

a pro boost režim:

$$D_c = 1 - \frac{U_{in}}{U_{out}} \quad (3.23)$$

Po použití uvedených vztahů dostaneme celkem 4 hodnoty pro induktor  $L$ . Z těchto hodnot musíme vzít tu nejvyšší z nich. V tabulce 3.2 jsou uvedeny hodnoty induktoru pro každý režim stabilizátoru. Hodnoty induktory jsou počítány pro zvlnění proudu v induktoru  $\Delta I_L = 10$  A a spínací kmitočet  $f = 10$  kHz. Z tabulky vyplývá, že pro dané zvlnění proudu je nutné zvolit induktor o minimální hodnotě  $151 \mu\text{H}$ . Pokud započítáme desetiprocentní toleraci, zvolíme induktor s hodnotou indukčnosti  $180 \mu\text{H}$ . V simulacích bude uvažován také ESR induktoru, který bude roven  $1 \text{ m}\Omega$ .

Směr toku výkonu	Vztah mezi napětími $U_{Cbat}$ a $U_{C48V}$	Režim buck nebo boost	Rozsah napětí $U_{Cbat}$	Rozsah $D_c$	$L_{max}$
BAT+→48V	$U_{Cbat} > U_{C48V}$	buck	48 V – 70 V	0,686 – 1	151 $\mu\text{H}$
BAT+→48V	$U_{Cbat} \leq U_{C48V}$	boost	40 V – 48 V	0 – 0,167	67 $\mu\text{H}$
48V→BAT+	$U_{Cbat} > U_{C48V}$	boost	48 V – 70 V	0 – 0,314	151 $\mu\text{H}$
48V→BAT+	$U_{Cbat} \leq U_{C48V}$	buck	40 V – 48 V	0,833 – 1	67 $\mu\text{H}$

**Tabulka 3.2:** Určené hodnoty induktoru pro všechny režimy pulzního stabilizátoru pro proudové zvlnění  $\Delta I_L = 10$  A a spínací kmitočet  $f = 10$  kHz ( $L_{max}$  – nejvyšší hodnota induktoru v rámci rozsahu  $D_c$ ).

Nyní určíme hodnoty kapacitorů  $C_{bat}$  a  $C_{48V}$ . Jak bylo zmíněno výše, oba kapacitory budou mít stejnou hodnotu. Pro výpočet hodnoty kapacity je nutné znát hodnotu induktoru, která zde bude z výše uvedených výpočtů  $180 \mu\text{H}$ . Zvlnění výstupního napětí podle směru toku výkonu bude voleno  $\Delta U = 0,1$  V. Je nutné spočítat hodnotu kapacity pro každý režim pomocí vztahů 3.7 pro buck režim a 3.14 pro boost režim. V tabulce 3.3 jsou uvedeny maximální hodnoty kapacit, které byly určeny při uvedených podmínkách. Pro boost režim je vztah 3.14 upraven tak, aby se ve vztahu nevyskytovala hodnota  $R_z$ :

$$R_z = \frac{U_{out}}{I_{max}} = \frac{U_{out}^2}{P_{max}}$$

$$C = D_c \cdot T \cdot \frac{P_{max}}{U_{out} \cdot \Delta U_{out}}$$

Tento vztah platí pro oba směry toku výkonu, kdy je za veličinu  $U_{out}$  dosazena odpovídající hodnota napětí, která odpovídá maximu  $D_c$ . Vzhledem k velkým hodnotám, které vyšly pro boost režimy pro oba směry toku výkonu by byly výsledné kondenzátory příliš velké a nerealizovatelné. Byla proto zvolena hodnota  $4,7 \text{ mF}$  pro kondenzátory  $C_{at}$  a  $C_{48V}$ . Pro boost režimy budeme

mít zvlnění příslušného výstupního napětí podle směru toku výkonu až 1 V. V simulacích bude uvažován ESR obou kondenzátorů, který bude roven po konzultacích  $ESR = 100\mu\Omega$ .

Směr toku výkonu	Vztah mezi napětími $U_{Cbat}$ a $U_{C48V}$	Režim buck nebo boost	Rozsah napětí $U_{Cbat}$	Rozsah $D_c$	$C_{max}$
BAT+→48V	$U_{Cbat} > U_{C48V}$	buck	48 V – 70 V	0,686 – 1	1,05 mF
BAT+→48V	$U_{Cbat} \leq U_{C48V}$	boost	40 V – 48 V	0 – 0,167	45,14 mF
48V→BAT+	$U_{Cbat} > U_{C48V}$	boost	48 V – 70 V	0 – 0,314	58,14 mF
48V→BAT+	$U_{Cbat} \leq U_{C48V}$	buck	40 V – 48 V	0,833 – 1	0,46 mF

**Tabulka 3.3:** Určené hodnoty induktoru pro všechny režimy pulzního stabilizátoru pro induktor s indukčností  $L = 180\mu\text{H}$  a spínací kmitočet  $f = 10\text{ kHz}$  ( $C_{max}$  – nejvyšší hodnota kapacitoru v rámci rozsahu).

Nyní je nutné určit výkonové ztráty všech tranzistorů a ověřit předpokládané hodnoty. Dalším krokem je určení účinnosti pulzního stabilizátoru podle směru toku výkonu a určení proudů procházející oběma kondenzátory. Pro hodnoty proudů v induktoru  $L$  a kapacitorech  $C_{bat}$  a  $C_{48V}$  se budou určovat jejich efektivní hodnoty a zvlnění. Pro kapacitory se bude určovat napětí na každém z nich a zvlnění napětí. Jsou provedeny celkem 4 simulace. Každá simulace je nastavena pro určitý směr toku výkonu a režim a v daném rozsahu vstupního napětí. Z hodnot napětí na kondenzátorech  $C_{bat}$  a  $C_{48V}$  je vypočítána hodnota  $D_c$  podle vztahů 3.22 a 3.23 podle směru toku výkonu a režimu. K této hodnotě je připočtena hodnota korekce, aby napětí na kondenzátoru  $C_{48V}$  bylo v rozmezí 47 V – 49 V, jinými slovy co nejbližší hodnotě 48 V. V příloze B jsou uvedena schémata pro simulaci každého režimu pulzního stabilizátoru. Tato data jsou zpracována pomocí skriptu napsaném v prostředí MATLAB. Pro hodnotu napětí  $U_{Cbat} = 48\text{ V}$  jsou brány výsledky z režimu boost pro příslušný směr toku výkonu, protože se dá předpokládat, že v tomto režimu bude nutné řídit měnič jako boost. Výsledky těchto simulací jsou uvedeny v kapitole 4 v sekci 4.3.

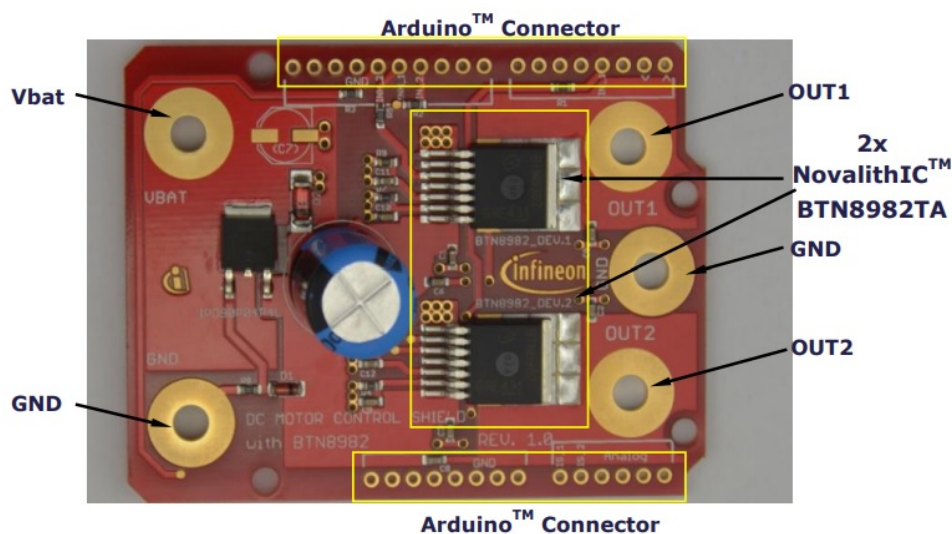
### 3.5 Návrh obvodu pro ověření implementace řízení na mikrokontrolér

Tato sekce pojednává o obvodu, který poslouží pro otestování implementace programu na mikrokontrolér, kterým je konkrétně C2000. Bližší informace o tomto programu jsou uvedeny v následující sekci 3.6.

Pro sestavení obvodu je využíván obvod pro řízení motoru. Tento obvod je realizován jako rozšiřovací deska pro Arduino Uno a byl pořízen jako hotový modul. Modul obsahuje plný můstek a motor lze tedy zapojit podobně jako je zapojení podle obrázku 3.5 [43]. Pro potřeby vyzkoušení implementace ale bude použita pouze jedna část, tj. pouze poloviční H-můstek. Tato část



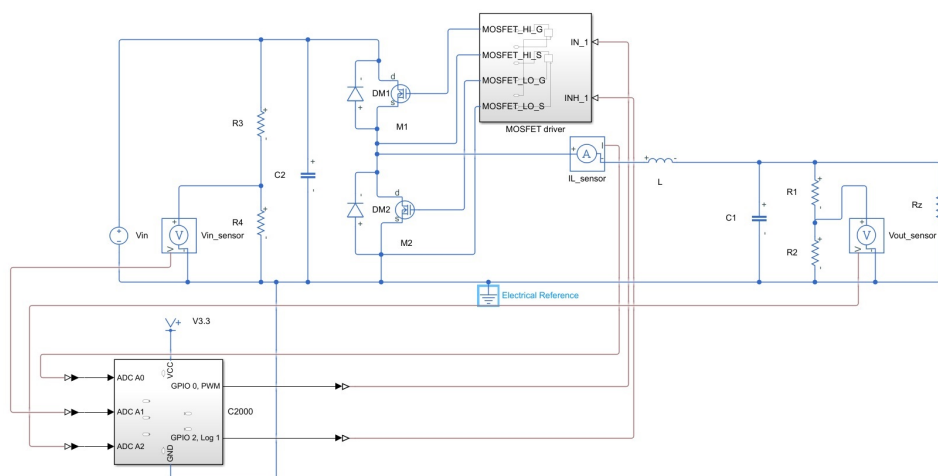
poslouží jako základ pro jednoduchý buck měnič. Na obrázku 3.12 je zmíněný modul, který byl použit v zapojení.



**Obrázek 3.12:** Modul pro řízení motoru, který byl použit v zapojení jednoduchého DC-DC měniče [43].

Na obrázku 3.13 je zobrazeno schéma zapojení jednoduchého buck měniče, které bylo vytvořeno v prostředí MATLAB Simulink. Napěťové senzory, které jsou ve schématu zakresleny, nejsou v reálné realizaci použity, ale jedná se ve skutečnosti o A/D převodníky v mikrokontroléru. Měřené napětí je nutné vydělit odporovými děliči tvořené rezistory R1 a R2 pro výstupní napětí a rezistory R3 a R4 pro vstupní napětí, neboť mikrokontrolér pracuje s napětím 3,3 V. Proudový senzor je modul s čipem ACS712ELC-30A, který má analogový výstup. Tento výstup není možné přímo připojit na mikrokontrolér, protože čip pracuje s napětím 5 V [44]. Z tohoto důvodu je analogový výstup tohoto senzoru připojen k děliči napětí, který je tvořen dvěma rezistory, každý o hodnotě odporu 1 k $\Omega$ . Vzhledem k tomu, že senzor proudu má v prostředí MATLAB Simulink výstup jako číselnou hodnotu proudu [45], není tento dělič napětí ve schématu zakreslen. Hodnota napětí zdroje  $V_{in}$  může být rovna třema hodnotám: 8 V, 12 V a 16 V. Výstupní napětí je zvoleno na hodnotu 6 V. Řízení modulu je možné pomocí vstupů IN\_1, INH\_1, IN\_2 a INH\_2. Pro řízení jedné poloviny H-můstku stačí jedna dvojice pinů IN a INH. Pomocí pinu IN je možné řídit spínání tranzistorů a pomocí pinu INH je možné povolit řízení těchto tranzistorů. Tyto tranzistory (na schématu na obrázku 3.13 značeny M1 a M2 včetně jejich zabudovaných body diod DM1 a DM2) a kondenzátor C2 jsou součástí již zmíněného modulu [46]. Tyto tranzistory jsou součástí obvodu BTN8982TA, kde je také zabudovaný jejich driver. Pokud je jeden z tranzistorů sepnut, druhý tranzistor je rozepnut. Kondenzátor C1 je tvořen dvěma paralelně zapojenými kondenzátory. Induktor L je tvořen dvěma sériově zapojenými tlumivkami. Tabulka 3.4 shrnuje hodnoty všech pasivních součástek, které byly v obvodu použity. Všechny součástky byly dimenzovány na hodnoty napětí a proudu, které je možné

v obvodu předpokládat podle vztahů, které byly uvedeny v sekci 3.1 u buck měniče.



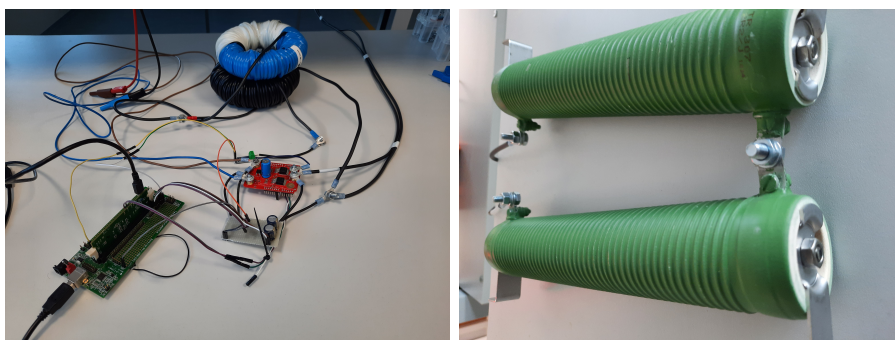
**Obrázek 3.13:** Schéma zapojení jednoduchého buck měniče pro ověření implementace řízení na mikrokontrolér C2000 (bez děliče napětí zapojeného k proudovému senzoru).

Součástka	Hodnota součástky	Poznámka
Zdroj napětí $V_{in}$	8 V, 12 V, nebo 16 V	Laboratorní zdroj, vždy nastaven na jednu hodnotu napětí
Rezistor R1	10 k $\Omega$	
Rezistor R2	1 k $\Omega$	
Rezistor R3	47 k $\Omega$	
Rezistor R4	1 k $\Omega$	
Rezistor R5	1 k $\Omega$	nezakreslen ve schématu, připojen k výstupu proudového senzoru a ADC vstupu C2000
Rezistor R6	1 k $\Omega$	nezakreslen ve schématu, připojen k ADC vstupu C2000 a k společnému vodiči GND
Kondenzátor C1	440 $\mu$ F	tvořen dvěma kondenzátory, každý o hodnotě 220 $\mu$ F
Kondenzátor C2	1 mF	součást použitého modulu
Induktor L	143 $\mu$ H	tvořen dvěma tlumivkami s hodnotami indukčnosti 100 $\mu$ H a 43 $\mu$ H

**Tabulka 3.4:** Hodnoty pasivních součástek, které byly použity v obvodu podle schématu na obrázku 3.13.

Na obrázku 3.14 je výsledné zapojení obvodu pro testování algoritmu, který je implementován na mikrokontrolér C2000. Důvod použití mikrokontroléru

C2000 je ten, že autor této práce je zaměstnancem firmy, která tyto mikrokontroléry používá pro své aplikace. Zdroj vstupního napětí je připojen k svorkám označenými na modulu Vbat (kladný pól zdroje) a GND (záporný pól zdroje). Na tyto svorky je připojen dělič napětí tvořený rezistory R3 a R4. Ke svorce OUT1 je připojen proudový senzor, který je dále spojen se dvěma sériově spojenými tlumivkami, ke kterým jsou připojeny paralelně kladné póly dvou kondenzátorů tvořící kondenzátor C1 a dělič napětí tvořený rezistory R1 a R2, kde k tomuto místu je připojen rezistor R1. K tomuto místu je paralelně připojena zátěž. Druhý konektor zátěže, záporné póly kondenzátorů a dělič napětí (konkrétně rezistor R2) je připojen ke druhé svorce GND, která se vyskytuje na modulu. Svorka OUT2 je nezapojena. S mikrokontrolérem C2000 je propojeno několik pinů. Piny GND mikrokontroléru a modulu jsou spolu propojeny. K pinu modulu IN\_1 je připojen GPIO 0 mikrokontroléru a k pinu INH\_1 je připojen pin GPIO 2. Výstupy děličů napětí jsou připojeny k pinům mikrokontroléru ADCA1 pro vstupní napětí a ADCA2 pro výstupní napětí. Výstup proudového senzoru je připojen k pinu ADCA0. Všechny piny GND všech modulů, které tento pin obsahují, jsou spolu vzájemně propojeny, neboť se jedná o společný vodič.



**Obrázek 3.14:** Fotografie výsledného zapojení (vlevo) a zatěžovací rezistor  $R_z$  (vpravo).

### 3.6 Výběr modulátoru a způsob čtení senzorů pomocí mikrokontroléru C2000

Tato sekce pojednává o výběru modulátoru. Tento modulátor je použit s mikrokontrolérem C2000. Dále sekce pojednává o čtení senzorů pomocí tohoto mikrokontroléru.

Mikrokontrolér C2000 má hardwarovou podporu pro PWM modulaci [47], [48]. Z toho vyplývá, že bude pro řízení použita PWM modulace, která nepotřebuje softwarovou implementaci. V prostředí MATLAB Simulink existuje knihovna, která umožňuje přístup k PWM modulaci [49]. V bloku je možné nastavit typ signálu, kterými může být pilovitý vzestupný signál, pilovitý

sestupný signál, nebo trojúhelníkový signál. Vzhledem k tomu, že v simulacích je používán pilovitý vzestupný signál, bude zde také nastaven tento typ signálu. Signál je generován čítačem, který bude nastaven na vzestupné čítání. Pro periodu výsledného PWM signálu platí rovnice [48]:

$$T_{PWM} = (TBPRD + 1) \cdot T_{TBCLK} \quad (3.24)$$

$TBPRD$  je maximální hodnota čítače a  $T_{TBCLK}$  je perioda hodinového signálu, na kterém pracuje mikrokontrolér. Pracovní kmitočet mikrokontroléru C2000 je 60 MHz [47]. Dokumentace prostředí MATLAB [49] doplňuje výpočet pomocí děliče hodin. V bloku budou nastaveny na hodnotu 1, takže se ve výsledném vztahu neprojeví. Po úpravě vztahu 3.24 vychází maximální hodnota čítače  $TBPRD = 6000$ .

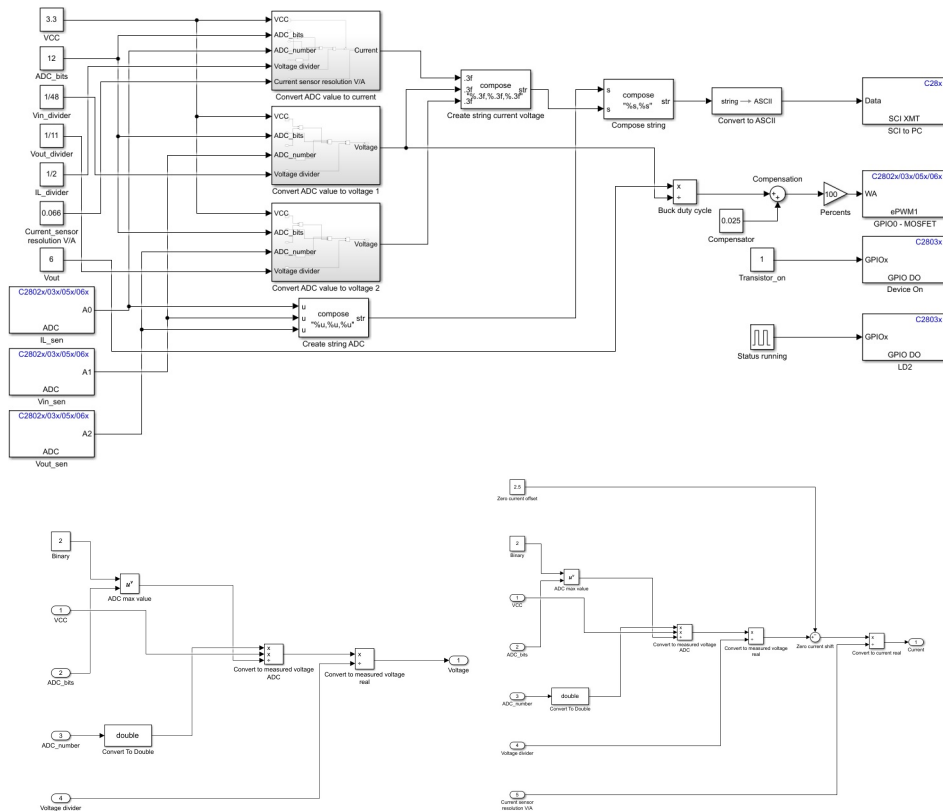
V bloku je dále možné nastavit dva komplementární PWM signály [49]. Tato možnost nebude v programu využita. Signál PWM bude konfigurován na pin GPIO 0. Při dosažení maximální hodnoty čítače je čítač nulován a pin GPIO 0 nastaven na hodnotu logické 1. Pokud vstupní hodnota do bloku, které je v procentech, je větší, nebo rovna hodnotě, která vychází z přepočtu aktuální hodnoty čítače na procenta, je tento pin nastaven na logickou 0.

Pro čtení senzorů je nutné nastavit A/D převodníky. V prostředí MATLAB Simulink existuje blok pracující s A/D převodníky [50]. V bloku je nutné nastavit pin a čas spuštění převodu hodnoty napětí na číslo, které je výstupem tohoto bloku. A/D převodníky mikrokontroléru C2000 jsou dvanáctibitové [47]. Pro všechny ADC vstupy mikrokontroléru platí, že je nutné provést přepočet na příslušnou veličinu. Bloky ADC v prostředí MATLAB mají na svém výstupu číselnou hodnotu. Tuto hodnotu je nutné nejprve převést na hodnotu napětí, která byla naměřena na vstupním pinu. Tuto hodnotu napětí je nutné zpětně převést na skutečnou hodnotu napětí. Tento přepočet je dán podle děliče napětí, který je pro měření dané veličiny použit, tj. pro získání napětí napětí na výstupu proudového senzoru použijeme přepočet pomocí děliče napětí, který je tvořen rezistory R5 a R6. Obdobně postupujeme pro hodnoty vstupního a výstupního napětí. V případě proudového senzoru je nutné hodnotu napětí převést na hodnotu proudu. Citlivost proudového senzoru je 66 mV / A [44]. Touto hodnotou tedy dělíme hodnotu napětí, která se vyskytuje na výstupu proudového senzoru.

Na obrázku 3.15 je schéma zapojení algoritmu, který byl použit pro implementaci. Jsou zde schémata bloků, které slouží pro převod hodnoty na A/D převodníku na skutečnou hodnotu dané veličiny, jejichž postup určení byl popsán v předchozím odstavci. Hodnoty napětí a proudu (skutečné a ADC hodnoty) jsou odesílány pomocí sériové komunikace do PC. Tuto komunikaci zajišťuje blok SCI, ve kterém je nutné nastavit správně komunikaci [51]. Skutečná hodnota napětí, která byla získána přepočtem ADC hodnoty ze vstupu, ke kterému je připojeno vstupní napětí přes dělič napětí, pak slouží k výpočtu  $D_c$ . Tato hodnota je dále kompenzována pomocí bloku Compensator, kdy k hodnotě  $D_c$  je přičtena taková hodnota, aby výsledné výstupní napětí mělo hodnotu co nejbližší požadované hodnotě výstupního napětí, která činí 6 V. Pro samotnou PWM je použit blok ePWM1. Pro uvedení činnosti modulu

### 3.6. Výběr modulátoru a způsob čtení senzorů pomocí mikrokontroléru C2000

s tranzistory je použit blok GPIO DO, který je pro nastavení digitálního výstupu [52]. Další blok GPIO DO je použit pro jiný výstup, ke kterému je připojena LED. Tato LED indikuje svým blikáním, které je implementováno pomocí pulzního generátoru s periodou jedné sekundy a s délkou pulzu 0,5 s, činnost mikrokontroléru.



**Obrázek 3.15:** Schéma zapojení algoritmu, který je implementován na mikrokontrolér C2000 (nahore) a schémata převodu ADC hodnoty na hodnotu napětí (vlevo dole) a hodnotu proudu (vpravo dole).



## Kapitola 4

### Výsledky experimentů

Tato kapitola se zabývá dosaženými výsledky z měření a simulací. Výsledky jsou získány pro jeden bateriový článek po dohodě s vedoucím práce. První sekce se zabývá výsledky obvodových parametrů náhradních modelů bateriového článku a grafickou podobou programu pro určení parametrů náhradního modelu. Druhá sekce na tuto sekci navazuje a zabývá se verifikací náhradních modelů na naměřených datech. Třetí sekce se zabývá výsledky simulace obvodu pulzního stabilizátoru, aby bylo možné zjistit vlastnosti pulzního stabilizátoru. Poslední sekce se zabývá výsledky implementace řídicího algoritmu na mikrokontrolér C2000 na jednoduchém DC-DC měnič. Diskuzí a zhodnocení výsledků se zabývá následující kapitola 5.

#### 4.1 Výsledky obvodových parametrů bateriového článku

Tato sekce se zabývá výsledky parametrů náhradních modelů bateriového článku. Dále je zde uvedena grafická podoba programu, který je použit pro výpočet. Samotný program je uložen v příloženém CD k této práci.

Uvedené výsledky je možné zobrazit pomocí programu pro výpočet obvodových parametrů náhradního modelu. Pro grafickou podobu programu je možné pouze určit parametry Théveninova modelu 1. řádu. Pro Théveninův model 2. řádu lze určit parametry pouze spuštěním příslušné funkce v příkazovém řádku prostředí MATLAB. Důvody, proč je v grafické podobě programu použit pouze Théveninův model 1. řádu, jsou uvedeny v kapitole 5 sekci 5.1. Grafické podoby všech záložek jsou na obrázcích v příloze C. Nápoředa ke všem záložkám kromě záložky „Help tab“, která slouží jako nápoředa k programu, je uvedena v příloze D.

První záložkou programu je „Data Processing“. Tato záložka slouží k provedení výpočtu parametrů Théveninova modelu 1. řádu z naměřených dat. Vstupem je cesta k adresáři, ve kterém jsou uložena data z jednotlivých experimentů, které byly provedeny se stejným bateriovým článkem. Další položkou je typ baterie a číslo vzorku. Možností je vytvořit kopii výsledků v jiném adresáři. Toto řešení je doporučeno pro případ, že máme data z měření více bateriových článků jednoho typu. Ve spodní části okna je možné



sledovat výpis při zpracování dat. Poslední součástí jsou indikační lampy, které signalizují fázi zpracování dat a nápis s odhadem času, který zbývá k dokončení všech výpočtů.

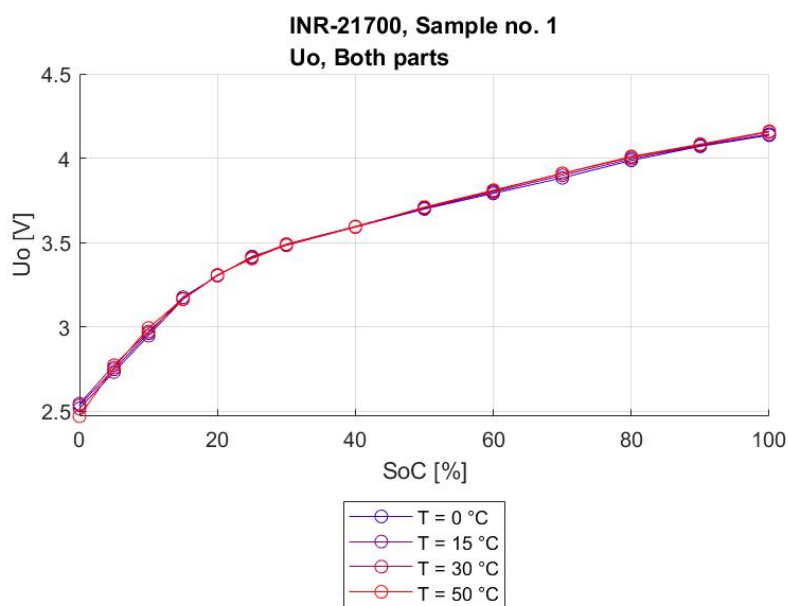
Druhou záložkou je záložka s názvem „Battery Type Statistics tab“. Tato záložka slouží pro určení obecného modelu pro několik bateriových článků, které jsou jednoho typu. Výsledkem jsou takové hodnoty parametrů náhradního obvodu podle Théveninova modelu 1. řádu, které charakterizují všechny bateriové články, s nimiž byly experimenty provedeny. Vstupem je adresář, který obsahuje adresáře s výsledky za každý bateriový článek.

Třetí záložka je „Results Viewer tab“. Jak název napovídá, tato záložka slouží k zobrazení jednotlivých parametrů v grafech. Pro zobrazení získaných výsledků v grafech je nutné nastavit adresář, ve kterém jsou výsledky uloženy. Pokud chceme výsledky vidět ihned po dokončení výpočtů, je možné přejít na tuto záložku přímo ze záložek Data Processing a Battery Type Statistics, kde se cesta nastaví automaticky předvyplněním cesty k adresáři, kde jsou výsledky uloženy. Zobrazení výsledků je možné nastavit buď ve 2D grafu, nebo 3D grafu. Ve 2D grafu lze u parametrů, které jsou závislé na dvou proměnných, zobrazit několik průběhů v jednom grafu podle hodnot jedné z proměnných. Pro zobrazení ve 3D grafu je nutné, aby parametr byl závislý na dvou proměnných, což jsou parametry Théveninova modelu 1. řádu ( $U_0$ ,  $R_0$ ,  $R_p$  a  $C_p$ <sup>1</sup>). Pokud je do 2D grafu zvolena pouze jedna proměnná při dané hodnotě druhé proměnné, je možné zobrazit toleranční pásmo daného parametry, které je dáno střední hodnotou parametru a násobkem směrodatné odchylky. Tento násobek je celé číslo v intervalu 1 – 3. Výsledky jednotlivých parametrů lze zobrazit buď za obě části experimentu, nebo pro jednu část experimentu, pokud je zvolena možnost 2D grafu. Poslední zmíněnou záložkou je záložka „Help tab“, která byla zmíněna v úvodu této sekce.

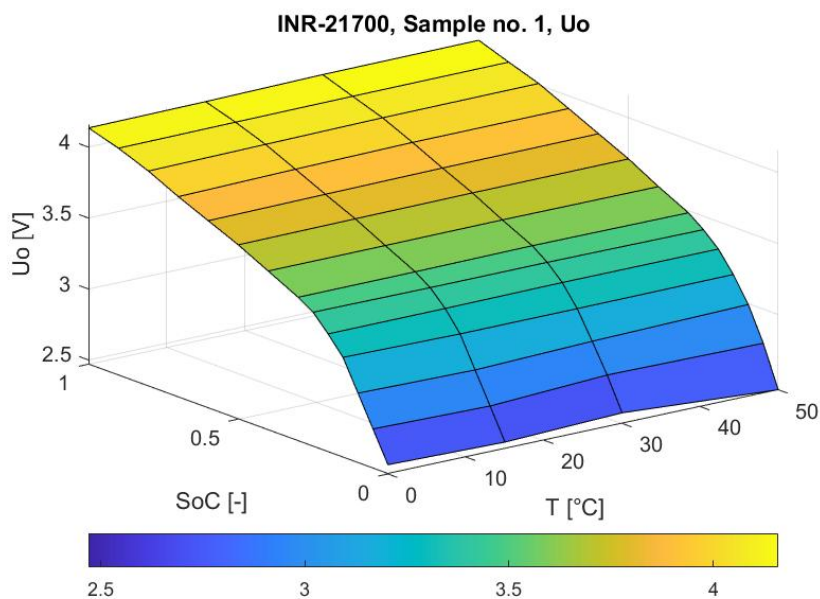
Na obrázku 4.1 jsou zobrazeny výsledky pro parametr  $U_0$  Théveninova modelu 1. řádu ve 2D grafu. Hodnoty tohoto parametru pocházejí z bateriového článku typu INR-21700. Na tomto grafu je parametr  $U_0$  závislý na veličině SoC. Druhou veličinou je teplota a pro každou zjištěnou hodnotu teploty je vyveden graf. Na obrázku 4.2 jsou zobrazeny stejné výsledky jako na předchozím obrázku. Zobrazení je zde provedeno ve 3D grafu. Na obrázku 4.3 jsou zobrazeny výsledky pro parametr  $Q_c$  ze stejného bateriového článku. Tato veličina je závislá na teplotě. Všechny výsledky parametrů tohoto bateriového článku jsou na obrázcích v příloze E. Výsledky jsou uvedeny vždy za obě části experimentů.

<sup>1</sup>Parametr  $\tau_p$  je podle definice také závislý na dvou proměnných, ale vzhledem k tomu, že důležitější parametry polarizačního RC článku jsou hodnoty  $R_p$  a  $C_p$ , není pro tento parametr možné zobrazit 3D graf.

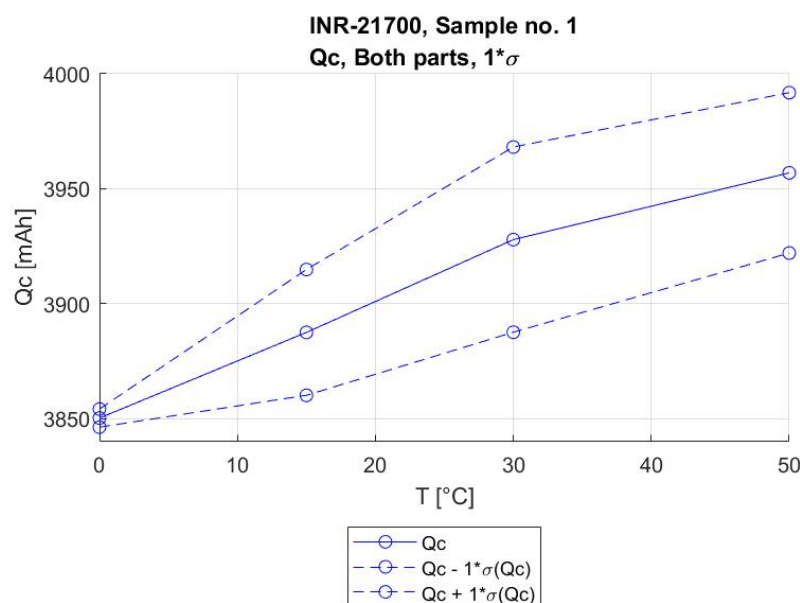




**Obrázek 4.1:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $U_0$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.



**Obrázek 4.2:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $U_0$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu.



**Obrázek 4.3:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $Q_c$  pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.

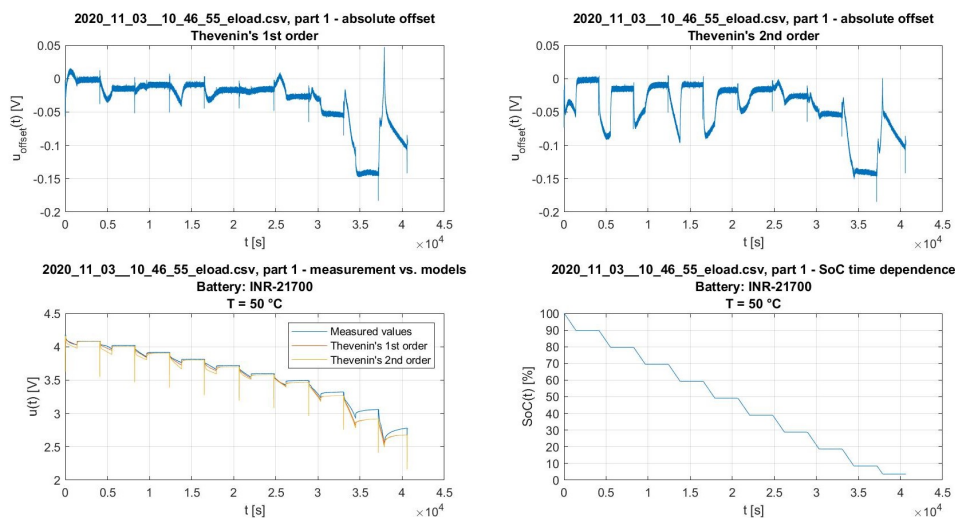
Z grafů je patrné, že žádný parametr nelze určit jako deterministický vztah v závislosti na proměnných teplota a SoC, respektive na proměnné teplota u veličin  $Q_c$ ,  $Q_d$  a  $Q_{eff}$  pouze v závislosti na teplotě. U parametru  $U_0$  lze říci, že není téměř závislý na teplotě, neboť jednotlivé průběhy mají ve všech bodech při dané hodnotě SoC minimální odchylky. Dále u tohoto parametru by bylo možné body proložit lineární funkcí v závislosti na veličině SoC. U tohoto proložení je omezení, že by výsledná funkce byla omezena přibližně na interval SoC 25 % – 100 %. S určitými omezeními by bylo možné proložit lineární funkcí také výsledky pro nábojové parametry  $Q_c$ ,  $Q_d$  a  $Q_{eff}$  v závislosti na teplotě. U ostatních parametrů není proložení funkcí možné. Diskuze k platnosti hodnot těchto výsledků, přesnosti modelu a dalšímu zhodnocení získaných výsledků je uvedena v kapitole 5 v sekci 5.1.

## 4.2 Výsledky verifikace náhradních obvodových modelů

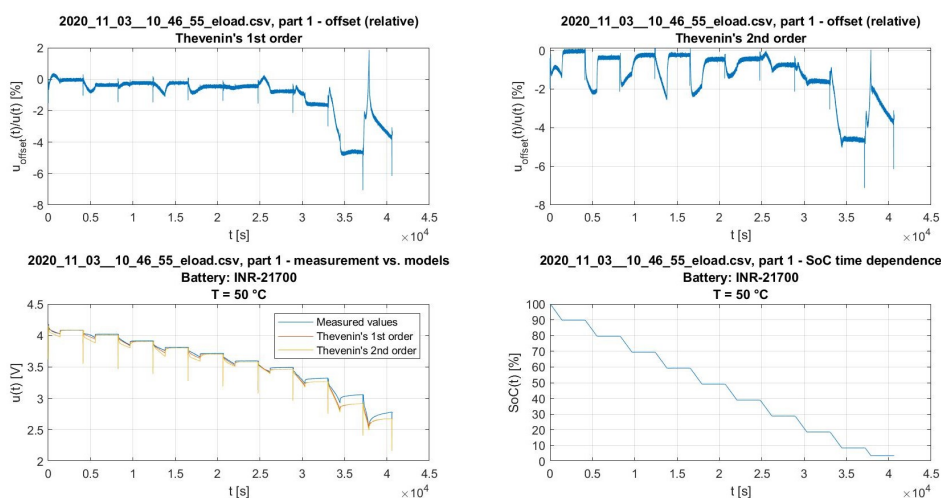
Tato sekce se zabývá verifikací parametrů náhradních obvodových modelů bateriového článku. Jsou zde uvedeny výsledky, ze kterých je možné posoudit platnost a přesnost daných modelů. Diskuzí k přesnosti a platnosti modelů se zabývá kapitola 5, sekce 5.1.

Výsledky verifikace pro jeden bateriový článek typu INR-21700 jsou uvedeny v příloze F. Uvedené obrázky grafů zobrazují rozdíl mezi naměřeným průběhem během jednoho vybíjení baterie (jedna část experimentu) a si-

mulovanými hodnotami, které jsou dány příslušným modelem, kterým je Théveninův model 1. řádu, nebo Théveninův model 2. řádu. Na obrázku 4.4 jsou uvedeny výsledky pro jeden z experimentů, jehož data byla zaznamenána do souboru 2020\_11\_03\_10\_46\_55\_eload.csv. Obrázek zobrazuje 4 grafy. Graf vlevo nahoře ukazuje rozdíl mezi simulovanými hodnotami Théveninova modelu 1. řádu a naměřenými hodnotami napětí na svorkách bateriového článku, který používá vypočítané hodnoty parametrů. Vpravo nahoře se jedná o stejný případ, jen je průběh grafu v čase vytvořen jako rozdíl mezi hodnotami Théveninova modelu 2. řádu a naměřenými hodnotami. V obou případech se jedná o absolutní hodnoty rozdílů. Graf vlevo dole ukazuje průběhy naměřených hodnot napětí a průběhy simulovaných hodnot napětí obou uvedených modelů. Graf vpravo dole pak ukazuje vývoj SoC v čase, aby bylo možné posuzovat platnost a přesnost uvedených modelů v závislosti na veličině SoC. Pro posuzování přesnosti a platnosti uvedených modelů na základě teploty je nutné mít více experimentů, které probíhají za různých teplot. Na obrázku 4.5 jsou uvedeny výsledky verifikace stejného experimentu a stejné části, kde se jedná o relativní výsledky rozdílů mezi modely a naměřenými hodnotami, kde rozdíl hodnot jsou vztaženy do poměru k naměřeným hodnotám. Výsledky všech experimentů a druhé části tohoto experimentu jsou uvedeny v příloze F.



**Obrázek 4.4:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_03\_10\_46\_55\_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



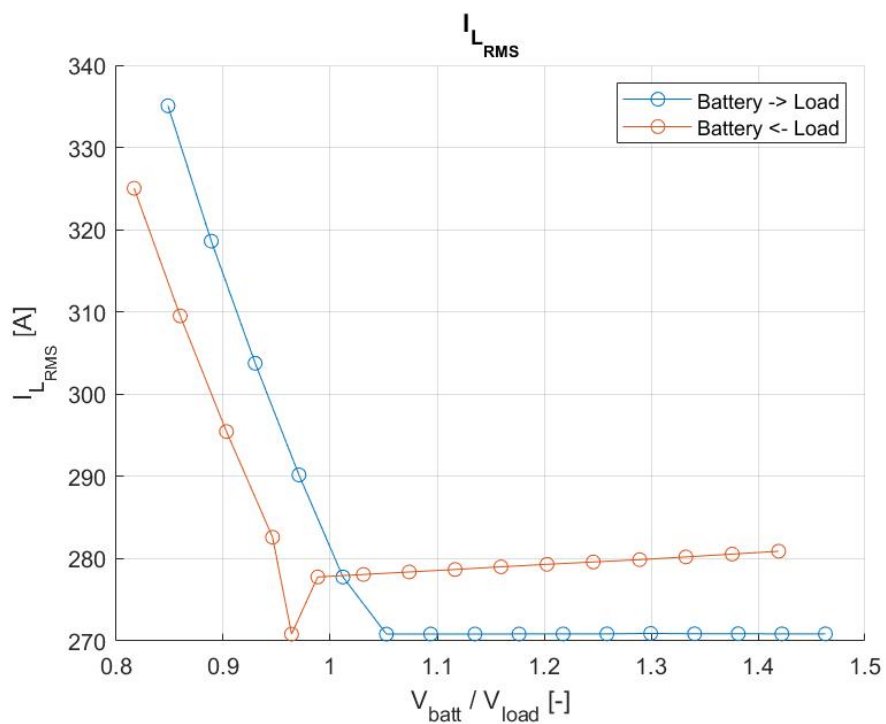
**Obrázek 4.5:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_03\_\_10\_46\_55\_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.

Z uvedených výsledků lze určit platnost a přesnost Théveninova obvodového modelu 1. řádu a Théveninova obvodového modelu 2. řádu. Jak už bylo zmíněno, lze to určit mimo jiné v závislosti na veličinách teplota a SoC. Diskuze k těmto výsledkům je uvedena v kapitole 5 v sekci 5.1.

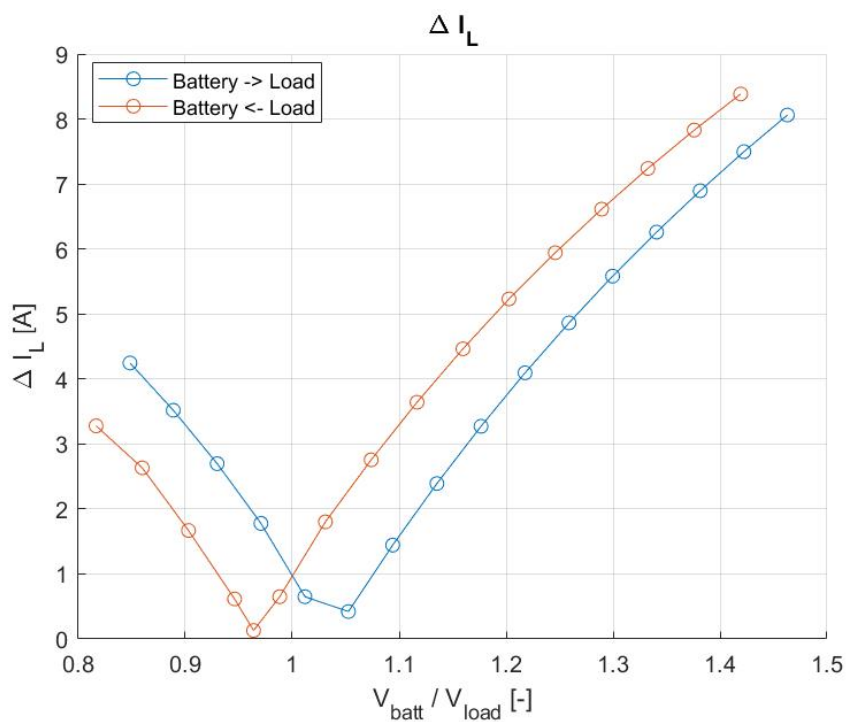
### 4.3 Výsledky simulace pro dimenzování prvků pulzního stabilizátoru

Tato sekce pojednává o dimenzování všech prvků, které jsou použity v pulzním stabilizátoru. Dimenzování těchto prvků vychází ze simulace, kde byly určeny hodnoty prvků, které byly uvedeny v kapitole 3 v sekci 3.4. Zhodnocení těchto výsledků a ověření předpokládů je uvedeno v kapitole 5 v sekci 5.2, kde je rozebráno mimo jiné dimenzování prvků.

Výsledky jsou souhrnné za všechny 4 možné režimy pulzního stabilizátoru, ve kterých se může stabilizátor nacházet. V grafech jsou zachyceny průběhy, které odpovídají jednomu směru toku výkonu. Data byla zpracována prostřednictvím skriptu v prostředí MATLAB. Na obrázku 4.6 je uveden příklad výsledného grafu. Na tomto obrázku je zaznamenán průběh efektivní hodnoty proudu, který prochází induktorem. Skutečné hodnoty proudu, kdy směr výkonu je ze zátěže, jsou záporné, pokud vezmeme v potaz orientaci proudu v induktoru. Z obrázku je patrné, že efektivní hodnota proudu v induktoru se příliš nemění, pokud je hodnota napětí  $V_{batt}$  větší než hodnota napětí  $V_{load}$ . Na obrázku 4.7 jsou uvedeny hodnoty zvlnění hodnoty proudu, který prochází induktorem L. Z grafu je patrné, že zvlnění se pohybuje do velikosti 10 A přes zvolený rozsah poměru napětí  $V_{batt}$  a  $V_{load}$ . Výsledky dalších veličin jsou uvedeny v příloze G.



**Obrázek 4.6:** Výsledky efektivní hodnoty proudu, který prochází induktorem L.



**Obrázek 4.7:** Výsledky efektivní hodnoty proudu, který prochází induktorem L.

Nyní zde budou popsány další výsledky. Budou nejprve uvedeny výsledky týkající se kondenzátorů Cbat a C48V. Pro oba kondenzátory byly určeny efektivní hodnoty napětí a proudu a jejich zvlnění. Výsledky těchto veličin se nachází v příloze G na obrázcích 6.61 až 6.68. Z výsledků pro efektivní hodnoty proudu a jejich zvlnění je patrné, že vyšší hodnoty se u kondenzátoru Cbat vyskytují v případě, že napětí  $V_{batt}$  je větší než napětí  $V_{load}$ . U kondenzátoru C48V je tomu naopak, kdy vyšší hodnoty proudu jsou v případě, že napětí  $V_{batt}$  je menší než napětí  $V_{load}$ . V obou případech nezávisí na směru toku výkonu. V případě napětí na kondenzátoru Cbat se efektivní hodnota napětí mění lineárně, což se dá očekávat vzhledem k nastavení simulace a následnému zisku výsledků. V případě napětí na kondenzátoru C48V se toto napětí v závislosti na poměru napětí  $V_{batt}$  a  $V_{load}$  mění takřka lineárně. Ve směru toku výkonu do zátěže je směrnice větší než v případě opačného toku výkonu. Zde se hodnoty napětí pohybují v intervalu 47 V – 48 V. V opačném směru toku výkonu se napětí téměř nemění, což může být způsobeno nastavením simulace, kdy při simulaci v tomto směru výkonu byl připojen zdroj napětí na straně zátěže. Pro zvlnění napětí na obou kondenzátorech platí totéž, co platí pro zvlnění proudu. Z těchto výsledků je tedy možné určit dimenzování těchto kondenzátorů z hlediska jmenovitého napětí a jmenovitého proudu.

Nyní budou uvedeny výkonové ztráty všech tranzistorů a induktoru L. Výkonové ztráty, konkrétně jejich efektivní hodnoty, v závislosti na poměru napětí  $V_{batt}$  a  $V_{load}$  jsou uvedeny v příloze G na obrázcích 6.71 až 6.75. Mezi ztráty tranzistorů jsou počítány jakékoliv ztráty včetně ztrát způsobenými body diodou. Z obrázků je zřejmé, že tranzistory M1 a M3 mají ztráty ve všech režimech, kdežto tranzistory M2 a M4 ztráty nemají ztráty v určité oblasti nezávisle na směru toku výkonu. Tranzistor M2 nemá ztráty, pokud poměr hodnot napětí  $V_{batt}$  a  $V_{load}$  je menší než jedna, kdežto u tranzistoru M4 je to opačně. Tyto tranzistory jsou spodními tranzistory H-můstku. Naopak tranzistory M1 a M3, které jsou horními tranzistory H-můstku, mají ztráty pokaždé, protože ve všech režimech jsou buď sepnuty, nebo jsou sepnuty trvale, nebo vedou jejich body diody. Ztráty těchto tranzistorů jsou obecně větší než ztráty spodních tranzistorů. Pokud tranzistor je používán jako dioda v daném režimu, jsou jeho ztráty větší než v případě, kdy je tranzistor řízen, nebo trvale sepnut. V případě tranzistoru M1 toto tvrzení platí pro směr toku výkonu ze zátěže, kdy proud vede body dioda tohoto tranzistoru. Pro tranzistor M3 toto tvrzení platí pro opačný směr toku výkonu. Tranzistory tedy musí být dimenzovány na nejvyšší hodnoty výkonu, které jsou zde uvedeny. Pro výkonové ztráty induktoru platí že jsou vyšší, pokud je hodnota napětí  $V_{batt}$  menší než hodnota napětí  $V_{load}$ . Pro výkonové ztráty v této oblasti platí, že ztráty jsou vyšší, pokud je směr toku výkonu do zátěže. V oblasti, kdy je napětí  $V_{batt}$  větší než napětí  $V_{load}$  jsou ztráty téměř konstantní. Vyšší ztráty v této oblasti jsou pro tok výkonu ze zátěže.

Posledními výsledky ze simulace jsou účinnost a převodní charakteristika. Pro převodní charakteristiku platí, že pokud je směr toku výkonu ze zátěže, tak jsou hodnoty téměř konstantní a poblíž cílové hodnoty napětí 48 V. Toto může být způsobeno tím, jak už několikrát bylo zmíněno, že pro tento směr toku

výkonu je na straně zátěže připojen zdroj napětí o hodnotě 48 V. V případě toku výkonu do zátěže je hodnota  $V_{load}$  rostoucí s rostoucí hodnotou napětí  $V_{batt}$  (v obrázku 6.76 v příloze G značeno  $V_{battery}$ ). Převodní charakteristika je v tomto směru téměř lineární, zejména pro hodnoty  $V_{batt} \geq 50$  V. Pro účinnost platí, že vyšší hodnoty účinnosti jsou v případě, že hodnota napětí  $V_{batt}$  je větší než hodnota napětí  $V_{load}$  než pokud je tomu naopak. Pro směr toku výkonu ze zátěže vyšly obecně hodnoty účinnosti vyšší než pro opačný směr, a to až o několik desetin procent. Nicméně, hodnoty účinnosti nejsou špatné ani pro oblast s hodnotami napětí  $V_{batt}$  menší než  $V_{load}$ .

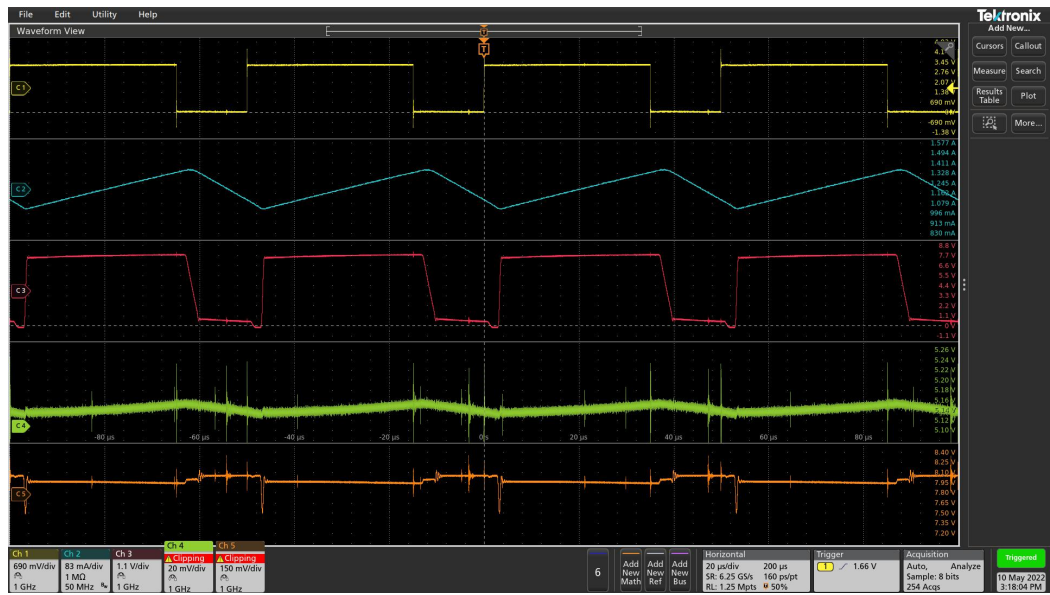
## 4.4 Výsledky implementace řídicího algoritmu na mikrokontrolér C2000

Tato sekce pojednává o výsledcích implementace řídicího algoritmu na mikrokontrolér C2000. Tyto výsledky vyšly ze zapojení jednoduchého DC-DC měniče, jehož schéma je uvedeno v kapitole 3 v sekci 3.5 na obrázku 3.13. Diskuze k těmto výsledkům jsou uvedeny v kapitole 5, v sekci 5.4.

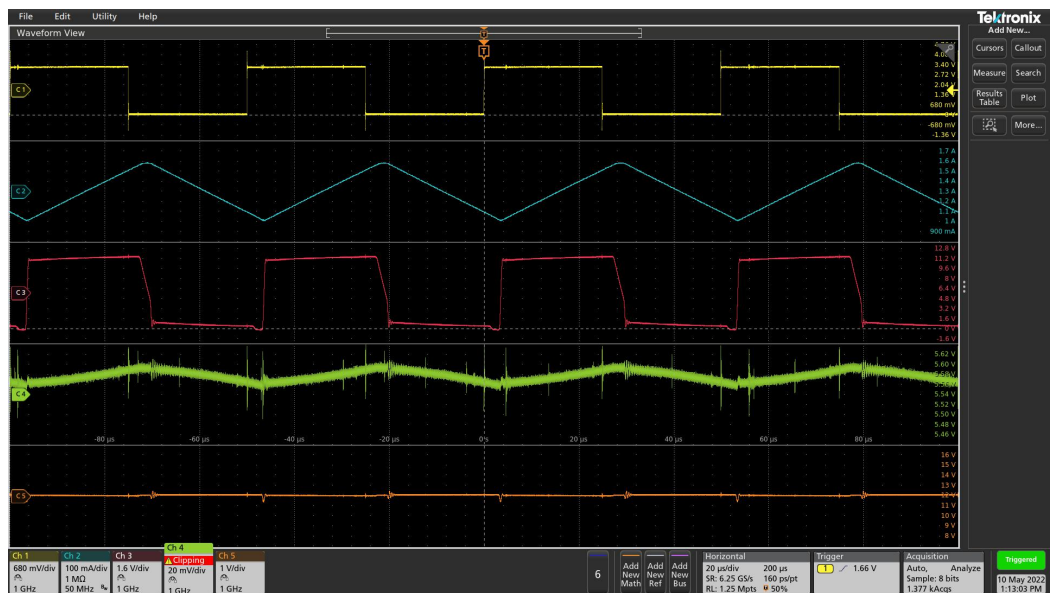
Výsledky byly určovány pomocí osciloskopu. Byly pozorovány následující veličiny: řídicí napěťový signál tranzistoru, proud procházející induktorem L, napětí v uzlu mezi tranzistorem a induktorem L, výstupní napětí a vstupní napětí. Všechna napětí byla měřena proti společnému vodiči GND. Výsledky byly určovány pro 3 hodnoty vstupního napětí. Na obrázku 4.8 jsou uvedeny oscilogramy pro hodnotu vstupního napětí 8 V. Na dalších obrázcích 4.9 a 4.10 jsou uvedeny oscilogramy pro další dvě hodnoty vstupního napětí, 12 V, respektive 16 V. Na všech obrázcích je následující popis kanálů osciloskopu. Kanál 1 (C1) je PWM signál pro řízení tranzistorů. Na kanálu 2 (C2) je průběh proudu, který prochází induktorem L. Na kanálu 3 (C3) je zobrazeno napětí v uzlu mezi tranzistorem a induktorem L, v rámci použitého modulu se jedná o konektor OUT1. Na kanálu 4 (C4) je záznam průběhu výstupního napětí. Poslední kanál 5 (C5) obsahuje záznam vstupního napětí, sonda v tomto případě byla umístěna v rámci použitého modulu mezi svorky VBAT a GND.



#### 4. Výsledky experimentů

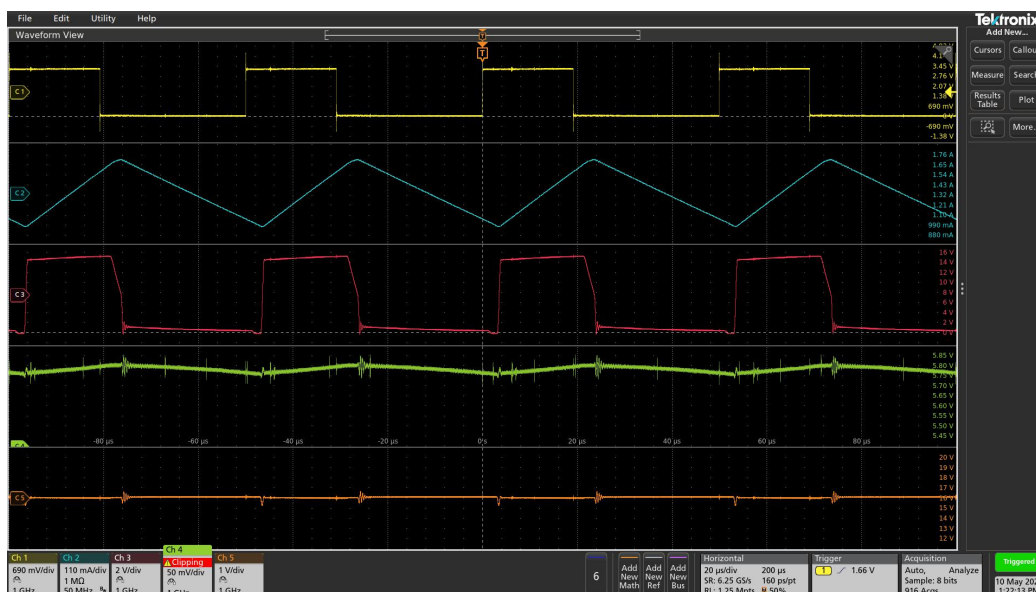


**Obrázek 4.8:** Výsledky měření při ověřování implementace algoritmu na mikrokontrolér C2000 při hodnotě vstupního napětí 8 V.



**Obrázek 4.9:** Výsledky měření při ověřování implementace algoritmu na mikrokontrolér C2000 při hodnotě vstupního napětí 12 V.





**Obrázek 4.10:** Výsledky měření při ověřování implementace algoritmu na mikrokontrolér C2000 při hodnotě vstupního napětí 16 V.

Na všech uvedených obrázcích je zřejmé, že existuje zpoždění mezi signálem PWM a průběhem proudu v induktoru  $L$  a průběhem zvlnění výstupního napětí. Toto zpoždění je dáno driverem tranzistorů, který řídí jejich sepnutí. Další poznatkem je, že hodnota výstupního napětí je vyšší při hodnotě vstupního napětí 16 V. Napříč těmito oscilogramy je zřejmé, že se šířka pulzu, který řídí tranzistory, mění podle velikosti výstupního napětí. Zvlnění proudu induktorem  $L$  je dále větší, čím větší je délka pulzu PWM, což je v souladu se vztahem 3.4, neboť ve všech třech případech se měnič nachází v režimu CCM. Tyto výsledky dokazují, že implementace algoritmu na řízení tohoto měniče byla úspěšná.



## Kapitola 5

### Zhodnocení a shrnutí dosažených výsledků

Tato kapitola se zabývá zhodnocením výsledků, které byly uvedeny v kapitole 4. Kapitola se zabývá diskuzí dosažených výsledků. První sekce se zabývá přesností modelů bateriového článku. Druhá sekce se zabývá dimenzování prvků pulzního stabilizátoru na základě výsledků simulace ve všech režimech, ve kterých se může pulzní stabilizátor nacházet. Třetí sekce se zabývá vlastnostmi pulzního stabilizátoru, kterými jsou účinnost a převodní charakteristika. Poslední sekce se zabývá výsledky testování řídicího algoritmu na mikrokontrolér C2000 v zapojení s jednoduchým DC-DC měničem.

#### 5.1 Přesnost modelů bateriového článku

V této sekci jsou zhodnoceny výsledky, které byly uvedeny v kapitole 4 v sekcích 4.1 a 4.2. Jsou zde zahrnuty poznatky ohledně přesnosti a platnosti uvedených modelů. Další zhodnocení se týká nabojových veličin  $Q_c$ ,  $Q_d$  a zejména veličiny  $Q_{eff}$ .

Vyjděme z výsledků, které jsou uvedeny v příloze F této práce. Prvním poznatkem je, že oba modely vykazují dobrou přesnost. V závislosti na teplotě vykazují oba modely dobrou přesnost pro všechny uvedené hodnoty teploty. V závislosti na SoC toto neplatí pro oba modely přes celý interval SoC 0 % – 100 %. Dobrá přesnost modelu je definována, že relativní chyba od naměřeného průběhu je v intervalu  $\langle -2\%; 2\% \rangle$  na základě konzultace s vedoucím práce. Pro oba modely tato přesnost platí pro interval SoC přibližně 30 % – 100 %. U některých experimentů je možné dostatečnou přesnost pozorovat od hodnoty SoC 20 %. Nicméně, tato přesnost není v celém intervalu. V časovém průběhu je možné vidět větší chyby ve chvíli, kdy začíná vybíjení baterie o přibližně 10 % SoC. Další větší chyby jsou na začátku průběhů, kdy je baterie odpojena od zátěže. Zde jsou relativní chyby rovny až  $\pm 5\%$ . V případě velmi nízkých hodnot SoC neodpovídá ani jeden model s dostatečnou přesností. Je to pravděpodobně dáno tím, že na této úrovni hodnoty SoC probíhají různé chemické děje uvnitř baterie, které modely nejsou schopny popsat s určitou přesností.

Jeden experiment se vymyká ostatním experimentům, které jsou zde uvedeny. Jedná se o experiment, jehož záznam měření je uložen v souboru 2020\_11\_27\_\_11\_30\_51\_eload.csv. V tomto experimentu v porovnání s ex-

perimenty, které probíhaly za stejné teploty, je větší chybovost obou modelů. V oblasti neplatnosti dat (tj. při nízkých hodnotách SoC) je relativní chybovost modelů blízká až 20 %. Z toho je možné usuzovat, zda tento experiment proběhl bez problémů jako další experimenty, nebo v opačném případě by bylo nutné data z tohoto experimentu vyřadit a provést výpočet parametrů obou modelů znovu.

Nyní srovnáme mezi sebou oba uvedené modely. Je možné říci, že Théveninův model 1. řádu nevykazuje o mnoho větší chybovost než Théveninův model 2. řádu, ba v některých experimentech jsou relativní chyby menší než v případě Théveninova modelu 2. řádu. Z toho vyplývá, že pro popis náhradního obvodového modelu baterie je Théveninův model 1. řádu postačující. V případě Théveninova modelu 2. řádu mluví v neprospěch větší výpočetní náročnost a tím delší doba trvání výpočtu. Dále během výpočtu se v příkazovém řádku prostředí MATLAB ukazovaly informace s varováními, že v některých hodnotách SoC Théveninův model 2. řádu nelze spolehlivě určit, konkrétně polarizační parametry  $R_{p1}$ ,  $C_{p1}$ ,  $R_{p2}$  a  $C_{p2}$ . Naopak u Théveninova modelu 1. řádu k těmto varováním během výpočtu nedocházelo. Z tohoto důvodu je v grafické verzi programu pro výpočet parametrů náhradního modelu bateriového článku použit pouze Théveninův model 1. řádu, jehož parametry lze určit na základě naměřených dat.

Posledním zhodnocením jsou výsledky nábojových parametrů baterie. Budeme se zde zabývat zejména nábojovým parametrem  $Q_{eff}$ . Tyto výsledky jsou uvedeny v příloze E. U parametrů  $Q_c$  a  $Q_d$  je přesnost těchto veličin zhruba  $\pm 100$  mAh. Dále z grafů je možné zjistit, že s rostoucí teplotou roste množství elektrického náboje, který byl do bateriového článku uložen během nabíjení, respektive v případě veličiny  $Q_d$  roste množství náboje, který byl z bateriového článku získán během vybíjení. Nyní se zaměříme na coulombickou účinnost  $Q_{eff}$ . I zde platí, že coulombická účinnost roste s rostoucí teplotou. Pro všechny uvedené teploty je hodnota  $Q_{eff}$  vyšší než 90 %, ale menší než 95 %, pokud vezmeme v úvahu pouze střední hodnoty. Z tohoto vyplývá, že použitý bateriový článek je relativně dobrý zdroj energie, ze kterého je možné získat téměř stejnou energii jako při uložení energie během nabíjení.

Všechny uvedené výsledky se týkají pouze jednoho bateriového článku na základě konzultace s vedoucím práce, jak bylo uvedeno na začátku kapitoly 4. Z toho vyplývá, že uvedené hodnoty by nemusely reprezentovat daný typ bateriového článku, pokud bychom použili jiný. Bylo by nutné provést další experimenty a z nich úspěšně získat parametry náhradního obvodového modelu. Tyto experimenty by měly být shodné a ve stejném pořadí jako experimenty s prvním bateriovým článkem. Dále by bylo doporučeno provést experimenty s použitým bateriovým článkem za jiných teplot, abychom měli menší krok mezi hodnotami teploty, zároveň nenastavovat tento krok menší než 5 °C, který byl zvolen. Pro určité hodnoty teplot nebyl proveden dostatečný počet experimentů, neboť např. pro teplotu 0 °C jsou k dispozici data pouze z jednoho experimentu. Bohužel do uzávěrky této práce nebylo možné data z experimentů získat, neboť několik měsíců je zařízení pro měření bateriových článků mimo provoz.

## 5.2 Dimenzování prvků pulzního stabilizátoru na základě výsledků simulace

Tato sekce pojednává o dimenzování prvků pulzního stabilizátoru. Sekce zhodnocuje dosažené výsledky ze simulací, které jsou popsány v kapitole 4 v sekci 4.3. Dále sekce ověřuje předpoklady, které byly stanoveny v kapitole 3 v sekci 3.4. Tyto výsledky jsou využity pro určení dimenzování prvků stabilizátoru.

Začněme u induktoru L. Z výsledků je patrné, že odhad zvlnění proudu induktorem byl zvolen dobře. Odhad zvlnění proudu  $\Delta I_L = 10$  A je vyšší než výsledky, které vyšly ze simulace pro všechny režimy v rozsahu napětí  $V_{batt}$  na kondenzátoru Cbat 40 V – 70 V. Dále maximální efektivní hodnota proudu byla zjištěna  $I_{L_{rmsmax}} \doteq 335$  A. Pokud započítáváme zvlnění proudu, induktor by měl být dimenzovaný na minimální hodnotu jmenovitého proudu o hodnotě 350 A. V praxi by bylo vhodné zvýšit tuto hodnotu, aby induktor nebyl provozován na maximální hodnotě proudu. Doporučenou minimální hodnotou jmenovitého proudu by byla hodnota 400 A. Co se týká ztrát v induktoru, nejvyšší efektivní hodnota ztrátového výkonu byla zjištěna přibližně 112 W. Induktor by měl tedy být dimenzovaný na ztrátový výkon minimálně 150 W, aby nebyl provozován na krajních hodnotách.

Dalšími prvky jsou kondenzátory. Jak bylo zmíněno v kapitole 3 v sekci 3.4, minimální požadovaná hodnota je 70 V. Dále kondenzátory jsou navrhovány se shodnými vlastnostmi. Zvlnění napětí na obou kondenzátorech dosahovalo maxima přibližně 1,2 V, což je vyšší hodnota zvlnění napětí než odhadovaná hodnota zvlnění napětí 1 V. Napěťové dimenzování by tedy mělo být minimálně na 80 V, lepší je minimální hodnota jmenovitého napětí až 100 V, aby kondenzátory nebyly provozovány v mezních podmínkách. Pro podmínku jmenovitého proudu vyšla maximální efektivní hodnota pro kondenzátor Cbat  $I_{Cbat_{rmsmax}} \doteq 130$  A a pro kondenzátor C48V  $I_{C48V_{rmsmax}} \doteq 140$  A. Maximální zvlnění proudu kondenzátory vyšla pro kondenzátor Cbat přibližně 280 A a pro kondenzátor C48V přibližně 340 A. Pokud srovnáme tyto hodnoty, minimální jmenovitý proud by měl být 500 A, ideálně by měl být vyšší, např. až 600 A. Maximální výkonové zatížení kondenzátorů neuvažujeme, neboť je můžeme zanedbat.

Posledními prvky obvodu jsou tranzistory M1, M2, M3 a M4. Jejich dimenzování bylo určeno v kapitole 3 v sekci 3.4 a je nutné tedy ověřit předpoklady. Všechny tranzistory jsou navrhovány tak, že jsou shodné. Nejvyšší efektivní hodnota ztrátového výkonu, která byla během simulace zjištěna, byla u tranzistoru M1 a činí přibližně 350 W. Tuto podmínku podle datasheetu [42] tedy splňují, neboť zde je maximální výkon roven 1,67 kW. Vyšší hodnoty ztrátového výkonu byly zjištěny u tranzistorů M1 a M3, které mají ztráty srovnatelné, pokud neuvažujeme směr toku výkonu. Pro tranzistory M2 a M4 je maximální hodnota ztrátového výkonu rovna přibližně 150 W. Tranzistory splňují dimenzování na hodnoty proudu a napětí. Hodnotu potřebného proudu si vezmeme z dimenzování induktoru, tedy tranzistory by měly být dimenzovány na proud 350 A. Tuto podmínku splňují, neboť mají maximální proud roven 420 A [42]. Dimenzování tranzistorů na určitou hodnotu napětí



Převodní charakteristika je v obou směrech toku výkonu téměř lineární. Nejnižší hodnoty výstupního napětí, které je určováno na zátěži, je při nejnižší hodnotě vstupního napětí, pokud je směr toku výkonu do zátěže. Hodnoty výstupního napětí se v tomto směru pohybují v intervalu 47 V – 48 V, takže tento výsledek můžeme hodnotit jako dobrý. V opačném směru toku výkonu je převodní charakteristika téměř konstantní. Možným důvodem tohoto výsledku je, že simulace pro tento směr toku výkonu byla provedena tak, že na místo zátěže byl zapojen ideální zdroj napětí o hodnotě napětí 48 V. Výsledné zvlnění výstupního napětí bylo vyšší, pokud měnič pracoval v režimu boost při toku výkonu do zátěže, kde dosahovalo hodnot až 1,2 V. Pro režim buck pro tento směr toku výkonu bylo zvlnění velmi nízké. Hodnoty zvlnění napětí jsou dány výběrem hodnoty kondenzátoru, kdy se pro režim boost předpokládalo větší zvlnění napětí vzhledem k tomu, že kondenzátory o vypočtených hodnotách pro zvlnění napětí rovné 0,1 V nebylo možné realizovat po dohodě s vedoucím práce. Pro směr toku výkonu ze zátěže byly hodnoty zvlnění napětí vyšší, pokud měnič pracoval v režimu buck. Hodnoty zvlnění napětí jsou srovnatelné s opačným směrem toku výkonu.

Poslední vlastností je účinnost měniče. Účinnost byla obecně lepší pro směr toku ze zátěže, ale lišila se pouze o desetiny procent. Dále hodnoty účinnosti byly nižší v případě, pokud bylo vstupní napětí nižší než výstupní napětí nezávisle na směru toku výkonu. Hodnoty účinnosti se pro směr toku výkonu do zátěže pohybují v intervalu 95,2 % – 96,5 %, pro opačný směr toku výkonu se hodnoty pohybují v intervalu 95 % – 96,7 %. Z tohoto hlediska můžeme konstatovat, že měnič má dobrou účinnost převodu výkonu v obou směrech.

## 5.4 Zhodnocení implementace na mikrokontrolér C2000

Tato sekce se zabývá zhodnocením výsledků, které byly získány z testování algoritmu na mikrokontroléru C2000. Toto testování probíhalo na obvodu jednoduchého buck měniče podle schématu na obrázku 3.13, který byl uveden v kapitole 3 v sekci 3.5.

Implementace algoritmu byla testována při třech hodnotách vstupního napětí na jednoduchém buck měniči. Vstupní napětí mělo hodnoty 8 V, 12 V, nebo 16 V a požadované výstupní napětí bylo 6 V. Cílem bylo dokázat, že algoritmus je schopen řídit tento jednoduchý měnič. Řízení spočívalo ve čtení hodnoty vstupního napětí, pomocí které byla vypočítána hodnota  $D_c$  podle vztahu 3.1. Byl ověřen předpoklad podle tohoto vztahu, že největší šířka pulzu byla naměřena při nejnižší hodnotě vstupního napětí, naopak nejkratší šířka pulzu byla napřena při největší hodnotě vstupního napětí. Dále bylo zjištěno zpoždění mezi signálem PWM a zvlněním proudu induktorem L a zvlněním výstupního napětí. Toto zpoždění je způsobeno tzv. driverem, který řídí tranzistory na modulu. Velikost zvlnění proudu v induktoru v závislosti na vstupním napětí splňuje předpoklad podle vztahu 3.4. Zároveň bylo zjištěno, že měnič pracuje v režimu CCM, což je v souladu s výše uvedenými vztahy.





## Kapitola 6

### Závěr

Tato práce se zabývala celkem několika tématy. Prvním tématem byly bateriové články a jejich náhradní obvodové modely. Druhým tématem byl návrh pulzního stabilizátoru pro pohon elektrického vozidla, který je napájen z baterie a dimenzování jeho prvků. Posledním tématem byl výběr PWM modulátoru a jeho implementace na mikrokontrolér C2000 a vyzkoušení řízení na jednoduchém obvodu DC-DC měniče.

Jedním z cílů této práce bylo určení náhradních obvodových parametrů lithiového bateriového článku. Za pomoci ERL Teamu ve firmě EATON bylo sestaveno zařízení pro měření bateriových článků. Autor této práce pomohl vytvořit systém příkazů, pomocí kterých je možné toto zařízení programovat a určit tím průběh experimentu. Dále se autor zabýval zejména zpracováním naměřených dat z experimentů, aby bylo možné určit parametry náhradních obvodových modelů bateriových článků, které jsou závislé na veličinách teplota a SoC, a verifikací těchto modelů. Zvolenými modely byly Théveninův model 1. řádu a Théveninův model 2. řádu, po provedení verifikace modelů byl zvolen pouze Théveninův model 1. řádu, jehož parametry je možné spočítat pomocí programu s grafickým rozhraním na základě získaných dat. Kromě parametrů zvoleného modelu lze určit coulombickou účinnost daného článku. Uvedené výsledky se týkaly pouze jednoho bateriového článku na základě konzultace s vedoucím práce. K zpřesnění náhradního obvodového modelu bylo nutné provést více experimentů nejen s jedním bateriovým článkem.

Dalším cílem této práce byl návrh topologie pulzního stabilizátoru a dimenzování jeho prvků. Tento stabilizátor byl navrhován na rozmezí vstupního napětí 40 V – 70 V a má umožňovat tok výkonu oběma směry. Požadavky na stabilizátor byly dány maximálním výstupním výkonem 13 kW a výstupním napětím 48 V. Výsledná topologie byla určena jako zapojení H-můstku, jehož obě větve jsou spojeny pouze společným vodičem a nemají společné napětí. Na základě výpočtů bylo určeno dimenzování všech prvků pulzního stabilizátoru. Tyto hodnoty byly zpětně úspěšně ověřeny pomocí simulace.

Posledním cílem této práce byla implementace algoritmu řízení jednoduchého buck DC-DC měniče na mikrokontrolér C2000. Algoritmus byl testován pro tři různé hodnoty vstupního napětí a požadovanou hodnotu výstupního napětí. Získané výsledky měření posloužily jako důkaz úspěšné implementace na tento mikrokontrolér.





## Literatura

- [1] AUTOR NEUVEDEN. *Druhy baterií – víte, jakou dát do svítilny či fo-táku?* [online]. Rok vydání 2020 [cit. 31.1.2022]. Dostupné z: <https://www.svitimestejne.cz/domacnost/druhy-baterii-jakou-koupit/>
- [2] REICHL, Tomáš. *Základní typy baterií a správné nabíjení* [online]. Rok vydání 2015 [cit. 31.1.2022]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/a/kumulace-energie/zakladni-typy-baterii-a-spravne-nabijeni>
- [3] CLOUD, Maria. *What is the Energy Density of a Lithium-Ion Battery?* [online]. Rok vydání 2020 [cit. 18.2.2022]. Dostupné z: <https://www.fluxpower.com/blog/what-is-the-energy-density-of-a-lithium-ion-battery>
- [4] DRAGONFLY ENERGY. *Why Does Energy Density Matter In Batteries?* [online]. Rok vydání 2021 [cit. 18.2.2022]. Dostupné z: <https://dragonflyenergy.com/why-does-energy-density-matter-in-batteries/>
- [5] EPEC, LLC. *BATTERY CELL COMPARISON* [online]. Rok vydání neuveden [cit. 18.2.2022]. Dostupné z <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>
- [6] XIONG, Shihui. *A study of the factors that affect lithium ion battery degradation* [online]. Missouri, Columbia, USA, 2019. [cit. 18.2.2022] Dostupné z: <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/73777/Xiong-Shihui-Research.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. Faculty of the Graduate School at the University of Missouri-Columbia. Vedoucí práce Dr. Robert O'Connell
- [7] MOMIDI, Kiranmai. *What causes Battery Degradation in Electric vehicles and How to avoid it?* [online]. Rok vydání 2019 [cit. 18.2.2022]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/article/what-causes-battery-degradation-in-electric-vehicles-and-how-to-avoid-it>
- [8] THAKKAR, Rushali R. *Electrical Equivalent Circuit Models of Lithium-ion Battery* [online]. Rok vydání 2021 [cit. 28.1.2022]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/78501>

- [9] RAHMOUN, Ahmad a BIECHL Helmut. *Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams* [online]. Rok vydání 2012 [cit. 28.1.2022]. Dostupné z: <http://pe.org.pl/articles/2012/7b/40.pdf>
- [10] CHEN, Xi-Kun a SUN, Dong. *Modeling and state of charge estimation of lithium-ion battery* [online]. Rok vydání 2015 [cit. 28.1.2022]. Dostupné z: <http://html.rhhz.net/AIM/html/137.htm>
- [11] RUBA, Mircea, NEMES, Raul, CIORNEI, Sorina a MARTIS, Claudia. *Parameter Identification, Modeling and Testing of Li-Ion Batteries Used in Electric Vehicles* [online]. Roky vydání 2019-2020 [cit. 18.2.2022]. Dostupné z <https://www.intechopen.com/chapters/69856>
- [12] HASAN, Rahat a SCOTT, Jonathan. *Extending Randles's Battery Model to Predict Impedance, Charge-Voltage, and Runtime Characteristics* [online]. Rok vydání 2020 [cit. 28.1.2022]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/8948470/09088117.pdf>
- [13] MANOJ, Mathew. *Modeling and State Estimation of Lithium-Ion Battery Packs for Application in Battery Management Systems* [online]. Waterloo, Ontario, Kanada, 2018. [cit. 31.1.2022] Dostupné z: [https://uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/13268/Mathew\\_Manoj.pdf?sequence=5&isAllowed=n](https://uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/13268/Mathew_Manoj.pdf?sequence=5&isAllowed=n). Disertační práce. University of Waterloo. Vedoucí práce Professor Jennifer Bauman.
- [14] HELLOWIG, Christian Achim. *Modeling, simulation and experimental investigation of the thermal and electrochemical behavior of a LiFePO<sub>4</sub>-based lithium-ion battery* [online]. Köln, Německo, 2013. [cit. 31.1.2022] Dostupné z: <https://d-nb.info/1044576510/34>. Disertační práce. Institut für Physikalische Chemie der Universität Stuttgart. Vedoucí práce Prof. Dr. Wolfgang G. BESSLER
- [15] DAHN, Jeff, BURNS, Chris a STEVENS, David. *Importance of Coulombic Efficiency Measurements in R&D Efforts to Obtain Long-Lived Li-Ion Batteries* [online]. Rok vydání 2016 [cit. 3.2.2022]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.F07163if/pdf>
- [16] AUTOR NEUVEDEN. *Elektrický proud* [online] Rok vydání neuveden. [cit. 3.2.2022]. Dostupné z: [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/3\\_1](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/3_1)
- [17] MATLAB [online dokumentace]. *MEX File Functions*. Rok vydání 1994-2021 [cit. 4.2.2022]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/call-mex-file-functions.html>
- [18] ŠŤASTNÝ, František. *Chyba nepřímo měřené veličiny* [online]. Rok vydání 1997 [cit. 1.4.2022]. Dostupné z: [https://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html\\_tree/node8.html#SECTION00081200000000000000](https://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node8.html#SECTION00081200000000000000)

- [19] MATLAB [online dokumentace]. *fitnlm*. Rok vydání 1994-2022 [cit. 1.4.2022]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/call-mex-file-functions.html>
- [20] DAWKINS, Paul. *Section 2-9 : Euler's Method* [online]. Rok vydání neuveden [cit. 5.4.2022]. Dostupné z: <https://tutorial.math.lamar.edu/classes/de/eulersmethod.aspx>
- [21] PAVELKA, Prof. Ing. Jiří, DrSc. a ČEŘOVSKÝ, Prof. Ing. Zdeněk, DrSc. *Výkonová elektronika* [online]. Rok vydání 2000 [cit. 7.2.2022]. Dostupné z: <http://cvut.falconis.cz/semestr-4/ve1/vykonova-elektronika-Cerovsky-Pavelka.pdf>
- [22] LETTL, Jiří, Jiří PAVELKA a Jan BAUER. *Výkonová elektronika*. 4. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2019. ISBN 978-80-01-06514-3.
- [23] AUTOR NEUVEDEN. *What is a DC-DC converter?* [online]. Rok vydání 2022 [cit. 7.2.2022]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/dc-dc-converter/>
- [24] EDITORIAL TEAM. *Discontinuous Conduction Mode of Simple Converters* [online]. Rok vydání 2015 [cit. 13.2.2022]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/discontinuous-conduction-mode-of-simple-converters/>
- [25] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *Understanding Buck Power Stages in Switchmode Power Supplies - Application Report* [online]. Rok vydání 1999 [cit. 13.2.2022]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/an/slva057/slva057.pdf?ts=1644637985679&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slva057/slva057.pdf?ts=1644637985679&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [26] MAXIM INTEGRATED (ANALOG DEVICES). *DC TO DC BUCK CONVERTER TUTORIAL & DIAGRAM* [online]. [cit. 7.2.2022]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/2/2031.html>
- [27] MATLAB [online dokumentace]. *Push-Pull Buck Converter in Discontinuous Conduction Mode*. Rok vydání 1994-2022 [cit. 13.2.2022]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/push-pull-buck-converter-in-discontinuous-conduction-mode.html>
- [28] EDITORIAL TEAM. *Analysis of Four DC-DC Converters in Equilibrium* [online]. Rok vydání 2015 [cit. 13.2.2022]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>

- [29] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *Understanding Boost Power Stages in Switchmode Power Supplies - Application Report* [online]. Rok vydání 1999 [cit. 13.2.2022]. Dostupné z: <https://www.ti.com.cn/cn/lit/an/slva061/slva061.pdf>
- [30] ELECTRICAL TECHNOLOGY. *Half H-Bridge Inverter – Circuit, Operation, Waveforms & Uses* [online]. Rok vydání 2020 [cit. 8.2.2022]. Dostupné z: <https://www.electricaltechnology.org/2020/06/half-h-bridge-inverter-its-modes-of-operation-with-waveforms.html>
- [31] TANTOS, Andras. *H-Bridges – the Basics* [online]. Rok vydání 2011 [cit. 8.2.2022]. Dostupné z: <https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>
- [32] DIGILENT. *H-Bridges* [online]. Rok vydání 2014 [cit. 8.2.2022]. Dostupné z: <https://learn.digilentinc.com/Documents/325>
- [33] VOBECKÝ, Jan a ZÁHLAVA, Vít. *Elektronika Součástky a obvody, principy a příklady*. 3. rozšířené vydání. V Praze: Grada Publishing, a.s., 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.
- [34] CARNEIRO, Helder. *Calculating and Interpreting Power Dissipation for Polypropylene Film DC-Link Capacitors* [online]. Rok vydání 2017 [cit. 7.5.2022]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/26071/calcenterppowdisspolypfilmcl.pdf>
- [35] COILCRAFT. *Choosing Inductors for Energy Efficient Power Applications* [online]. Rok vydání 2020 [cit. 7.5.2022]. Dostupné z: [https://www.coilcraft.com/getmedia/d2188b65-1616-41a6-9bf4-ac20d42b8e9a/doc1400\\_choosing\\_inductors\\_for\\_energy\\_efficiency.pdf](https://www.coilcraft.com/getmedia/d2188b65-1616-41a6-9bf4-ac20d42b8e9a/doc1400_choosing_inductors_for_energy_efficiency.pdf)
- [36] ASPENCORE, Inc. *MOSFET as a Switch* [online]. Rok vydání 2022 [cit. 20.2.2022]. Dostupné z: [https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran\\_7.html](https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html)
- [37] SATTAR, Abdus (IXYS Corporation). *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics* [online]. Rok vydání neuveden [cit. 26.2.2022]. Dostupné z: [https://www.ixys.com/documents/appnotes/ixys\\_igbt\\_basic\\_i.pdf](https://www.ixys.com/documents/appnotes/ixys_igbt_basic_i.pdf)
- [38] MAXIM INTEGRATED. *AN EFFICIENCY PRIMER FOR SWITCH-MODE, DC-DC CONVERTER POWER SUPPLIES* [online]. Rok vydání 2008 [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/4/4266.html>

- [39] SENGUPTA, Upal. *PWM and PFM Operation of DC/DC Converters for Portable Applications* [online]. Rok vydání neuveden [cit. 28.2.2022]. Dostupné z: [https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/062\\_pwm\\_andf\\_pfm\\_operation\\_of\\_dc-dc\\_converters\\_for\\_portable\\_applications\\_.pdf](https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/062_pwm_andf_pfm_operation_of_dc-dc_converters_for_portable_applications_.pdf)
- [40] AUTOR NEUVEDEN. *Switching Regulator Basics: PWM & PFM* [online]. Rok vydání 2016 [cit. 28.2.2022]. Dostupné z: [https://techweb.rohm.com/knowledge/dcdc/dcdc\\_sr/dcdc\\_sr01/897](https://techweb.rohm.com/knowledge/dcdc/dcdc_sr/dcdc_sr01/897)
- [41] MATLAB [online dokumentace]. *N-Channel MOSFET*. Rok vydání 1994-2022 [cit. 8.5.2022]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/nchannelmosfet.html>
- [42] IXYS. [online katalogový list]. *IXFK420N10T, IXFX420N10T*. Rok vydání 2009 [cit. 7.5.2022]. Dostupné z: [https://eu.mouser.com/data-sheet/2/240/Littelfuse\\_Discrete\\_MOSFETs\\_N-Channel\\_Trench\\_Gate\\_-1856282.pdf](https://eu.mouser.com/data-sheet/2/240/Littelfuse_Discrete_MOSFETs_N-Channel_Trench_Gate_-1856282.pdf)
- [43] INFINEON. [online katalogový list]. *Motor Control Shield with BTN8982TA for Arduino*. Rok vydání 2016 [cit. 8.5.2022]. Dostupné z: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Motor\\_Control\\_Shield\\_with\\_BTN8982TA\\_for\\_Arduino-UserManual-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4624ca27d02014cb20b89867eed](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Motor_Control_Shield_with_BTN8982TA_for_Arduino-UserManual-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4624ca27d02014cb20b89867eed)
- [44] ALLEGRO MICROSYSTEMS, Inc. [online katalogový list]. *ACS712*. Rok vydání 2006 [cit. 11.5.2022]. Dostupné z: <https://html.alldata-sheet.com/html-pdf/174116/ALLEGRO/ACS712/293/1/ACS712.html>
- [45] MATLAB [online dokumentace]. *Current Sensor*. Rok vydání 1994-2022 [cit. 11.5.2022]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/currentsensor.html>
- [46] INFINEON. [online katalogový list]. *BTN8982TA*. Rok vydání 2013 [cit. 8.5.2022]. Dostupné z: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTN8982TA-DS-v01\\_00-en.pdf?fileId=db3a30433fa9412f013f32289b7c17&sd=t](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTN8982TA-DS-v01_00-en.pdf?fileId=db3a30433fa9412f013f32289b7c17&sd=t)
- [47] TEXAS INSTRUMENTS. [online katalogový list]. *TMS320F2803x Real-Time Microcontrollers*. Rok vydání 2009, revidováno 2021 [cit. 8.5.2022]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28035.pdf?ts=1652005052157>
- [48] TEXAS INSTRUMENTS. *TMS320F2803x Piccolo Technical Reference Manual* [online]. Rok vydání 2018 [cit. 8.5.2022]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/sprui10/sprui10.pdf?ts=1652000961822>

- [49] MATLAB [online dokumentace]. *c280x/C2802x/C2803x/C2805x/C2806x/C2833x/C2834x/F28M3x/F2807x/F2837xD/F2837xS/F2838x/F28004x/F28002x/F28003x ePWM*. Rok vydání 1994-2022 [cit. 8.5.2022]. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/supportpkg/texasinstrumentsc2000/ref/c280xc2802xc2803xc2805xc2806xc2833xc2834xf28m3xf2807xf2837xdf2837xsf2838xf28004xf28002xf28003xepwm.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/supportpkg/texasinstrumentsc2000/ref/c280xc2802xc2803xc2805xc2806xc2833xc2834xf28m3xf2807xf2837xdf2837xsf2838xf28004xf28002xf28003xepwm.html?s_tid=doc_ta)
- [50] MATLAB [online dokumentace]. *C2802x/C2803x/C2805x/C2806x/F28M3x/F2807x/F2837xD/F2837xS/F2838x/F28004x/F28002x/F28003x ADC*. Rok vydání 1994-2022 [cit. 8.5.2022]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/texasinstrumentsc2000/ref/c2802xc2803xc2805xc2806xf28m3xf2807xf2837xdf2837xsf2838xf28004xf28002xf28003xadc.html>
- [51] MATLAB [online dokumentace]. *C28x SCI Transmit*. Rok vydání 1994-2022 [cit. 11.5.2022]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/texasinstrumentsc2000/ref/c28xscitransmit.html>
- [52] MATLAB [online dokumentace]. *C280x/C2802x/C2803x/C2805x/C2806x/C2833x/C2834x/F28M3x/F2807x/F2837xD/F2837xS/F2838x/F2838x-M4/F28004x/F28002x/F28003x GPIO Digital Output*. Rok vydání 1994-2022 [cit. 11.5.2022]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/texasinstrumentsc2000/ref/c280xc2802xc2803xc2805xc2806xc2833xc2834xf28m3xf2807xf2837xdf2837xsf2838xf2838xm4f28004xf28002xf28003xgpiodigitaloutput.html>



## Přílohy

### Seznam příloh

- **Příloha A:** Schéma zapojení pulzního stabilizátoru
- **Příloha B:** Schémata zapojení jednotlivých režimů pulzního stabilizátoru pro určení jeho parametrů
- **Příloha C:** Záložky programu pro určení parametrů Théveninova obvodového modelu 1. řádu
- **Příloha D:** Nápopvěda programu pro výpočet parametrů náhradního obvodového modelu bateriového článku
- **Příloha E:** Výsledky parametrů Théveninova modelu 1. řádu pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1
- **Příloha F:** Výsledky verifikace náhradních obvodových modelů pro bateriový článek článek INR-21700, vzorek č. 1
- **Příloha G:** Výsledky simulace pro dimenzování prvků pulzního stabilizátoru

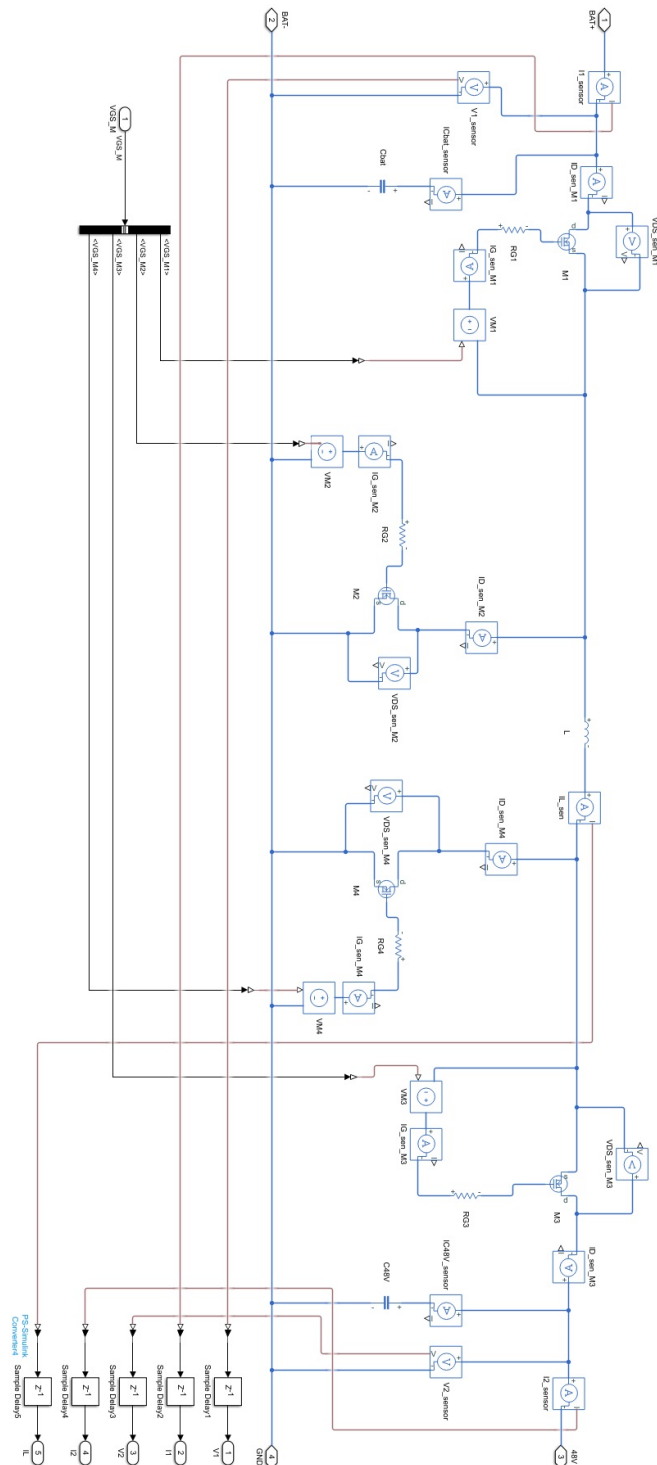
### ■ **Příloha H: CD**

V této práci nejsou tyto přílohy uvedeny, jsou přiloženy pouze na CD. Na CD jsou uloženy:

- elektronická verze této práce (soubor „DIPLOMA.pdf“)
- zdrojový kód aplikace s grafickým uživatelským rozhraním v prostředí MATLAB pro výpočet parametrů náhradního modelu bateriového článku (adresář „data\_processing\_2022\_03\_24“)
- zdrojový kód funkcí pro určení verifikace použitých obvodových modelů
- soubory se schémata pro simulaci pulzního stabilizátoru v daném režimu (soubory „Battery\_Load\_buck.slx“, „Battery\_Load\_boost.slx“, „Load\_Battery\_buck.slx“ a „Load\_Battery\_boost.slx“)
- soubor s algoritmem pro otestování implementace programu na mikrokontrolér C2000 (soubor „HW\_test.slx“)

## ■ Příloha A: Schéma zapojení pulzního stabilizátoru

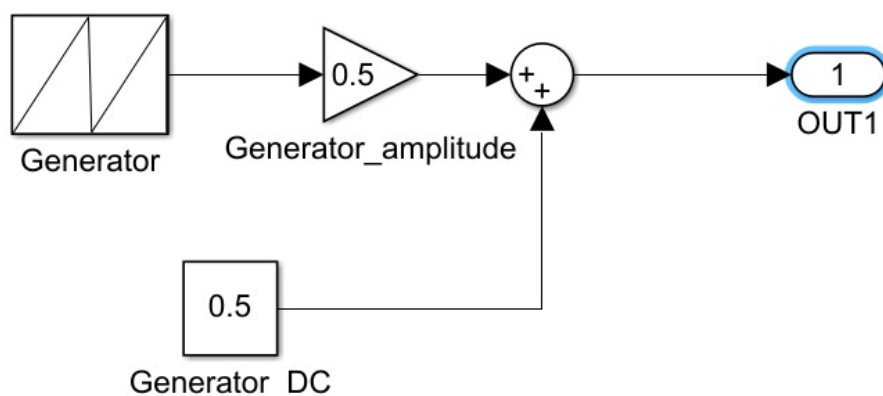
V této příloze je uvedeno schéma zapojení pulzního stabilizátoru. Schéma bylo vytvořeno v prostředí MATLAB Simulink. Všechny tranzistory mají zabudovanou tzv. body diodu, která ve schématu není zakreslena. Vývody senzorů nejsou zakresleny z důvodu přehlednosti ve schématu. Tyto veličiny jsou zaznamenávány do souborů.



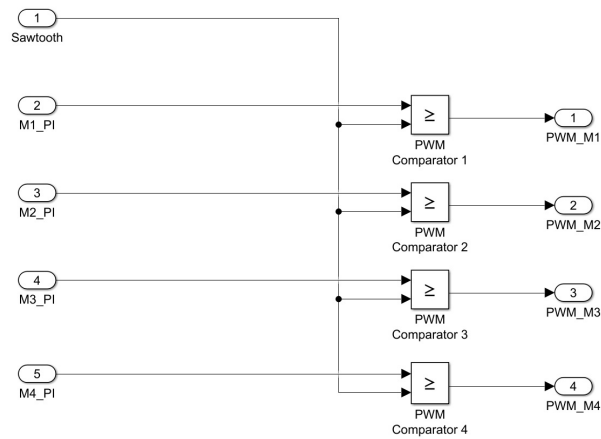
**Obrázek 6.1:** Obvodové schéma zapojení pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink (tranzistory mají mezi svorkami drain a source zapojenou antiparalelně diodu (tzv. body dioda)).

## ■ Příloha B: Schémata zapojení jednotlivých režimů pulzního stabilizátoru pro určení jeho parametrů

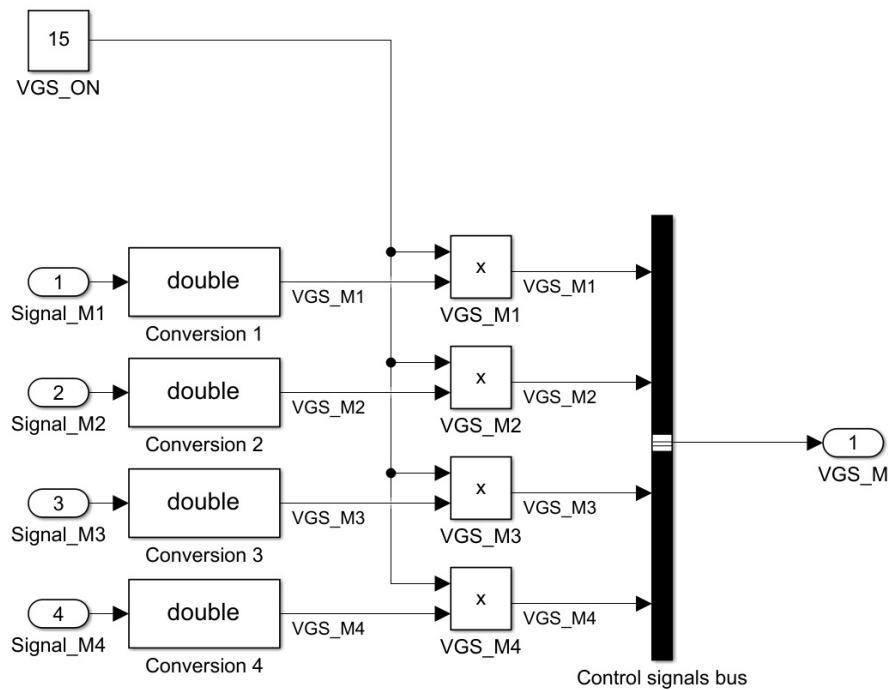
V této příloze jsou uvedena schémata bloků, která tvoří PWM modulátor. Dále tato příloha obsahuje všechna schémata v prostředí MATLAB Simulink, pomocí kterých bylo možné pomocí simulací určit parametry pulzního stabilizátoru. Schémata jsou bloková a používají vždy stejný pulzní stabilizátor, jehož schéma je uvedeno v kapitole 3 sekci 3.4. Každý režim má určitý rozsah napětí  $U_{Cbat}$ . Pro směr toku výkonu do zátěže je levá strana tvořena ideálním zdrojem napětí, který mění své napětí po určitém čase skokově. Zátěž je v tomto směru tvořena proudovým zdrojem, který odpovídá maximální hodnotě výkonu 13 kW při napětí 48 V. Napětí na levé straně v obou režimech klesá. Pro směr toku výkonu ze zátěže je zátěž tvořena ideálním zdrojem napětí o hodnotě 48 V a levá strana je tvořena zdrojem proudu, který odpovídá podílu maximálního výkonu 13 kW a dané hodnotě napětí, která se mění a v čase roste.



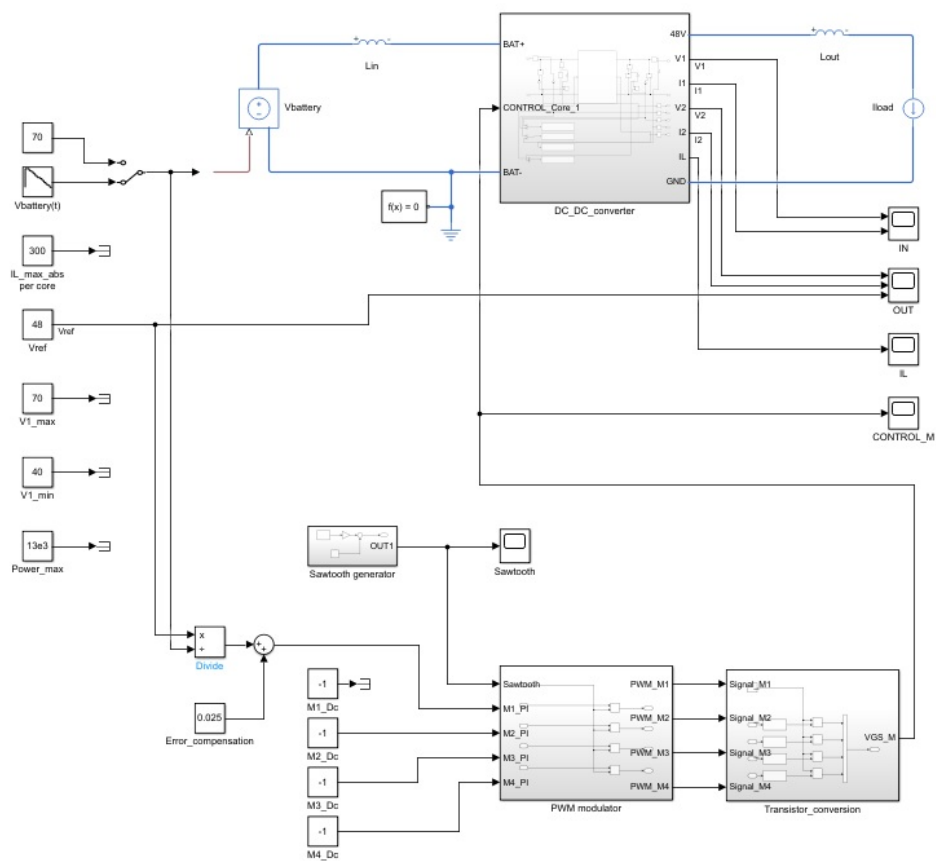
**Obrázek 6.2:** Zapojení generátoru rostoucího pilovitého signálu.



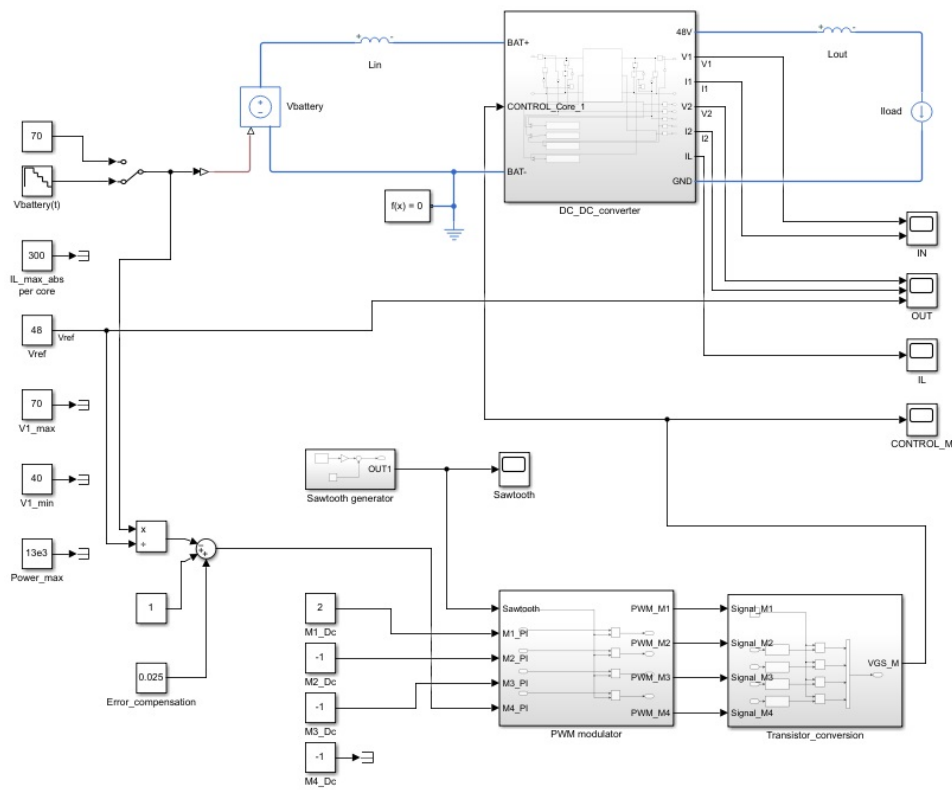
**Obrázek 6.3:** Schéma PWM modulace.



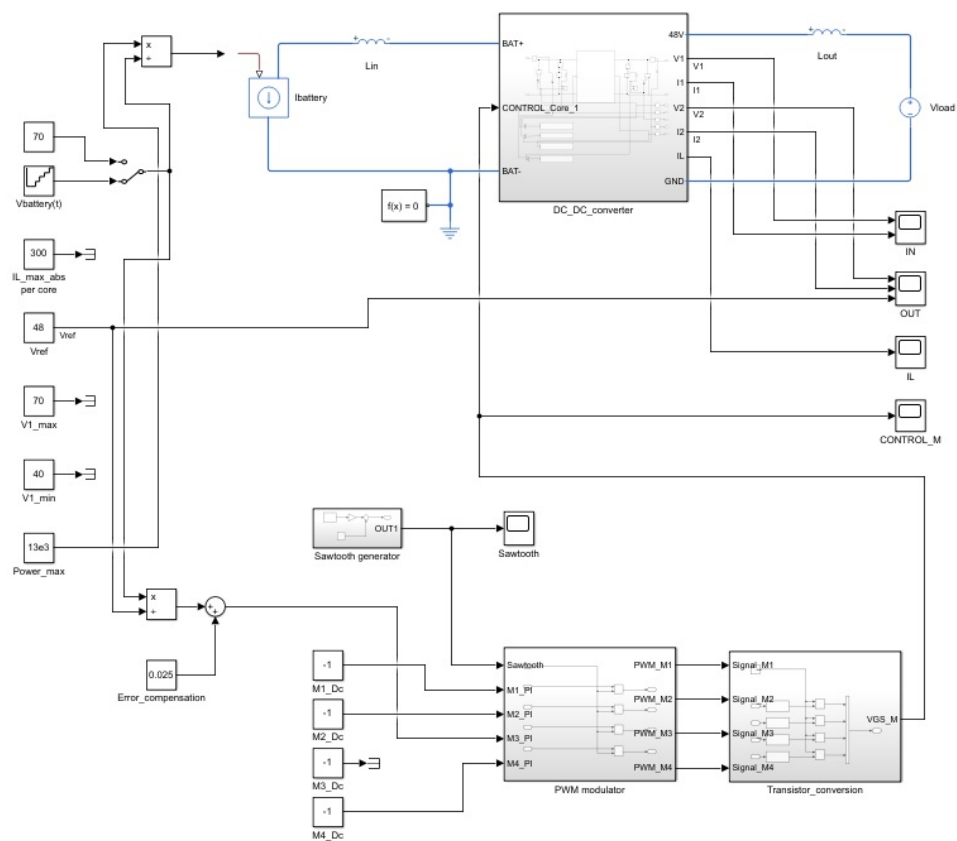
**Obrázek 6.4:** Schéma pro nastavení hodnoty napětí na 15 V podle stavu PWM.



**Obrázek 6.5:** Schéma pro simulaci pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink se směrem toku výkonu do zátěže v režimu buck, rozsah napětí mezi svorkami BAT+ a BAT- 48 V – 70 V.

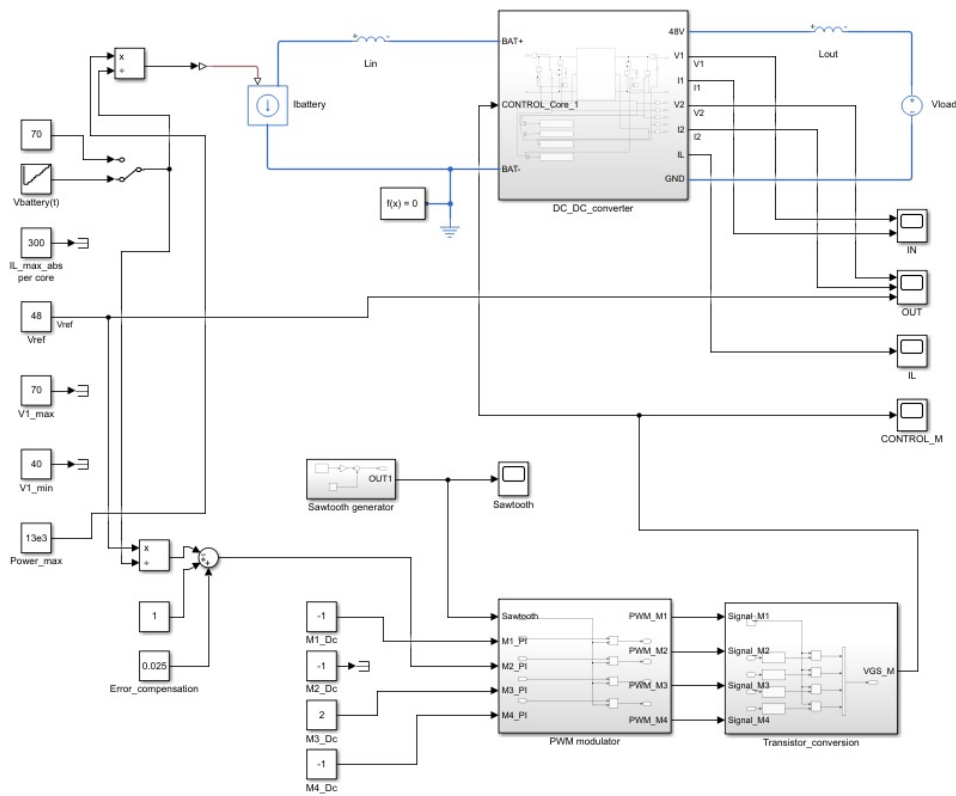


**Obrázek 6.6:** Schéma pro simulaci pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink se směrem toku výkonu do zátěže v režimu buck, rozsah napětí mezi svorkami BAT+ a BAT- 40 V – 48 V.



**Obrázek 6.7:** Schéma pro simulaci pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink se směrem toku výkonu ze zátěže v režimu buck, rozsah napětí mezi svorkami BAT+ a BAT- 40 V – 48 V.

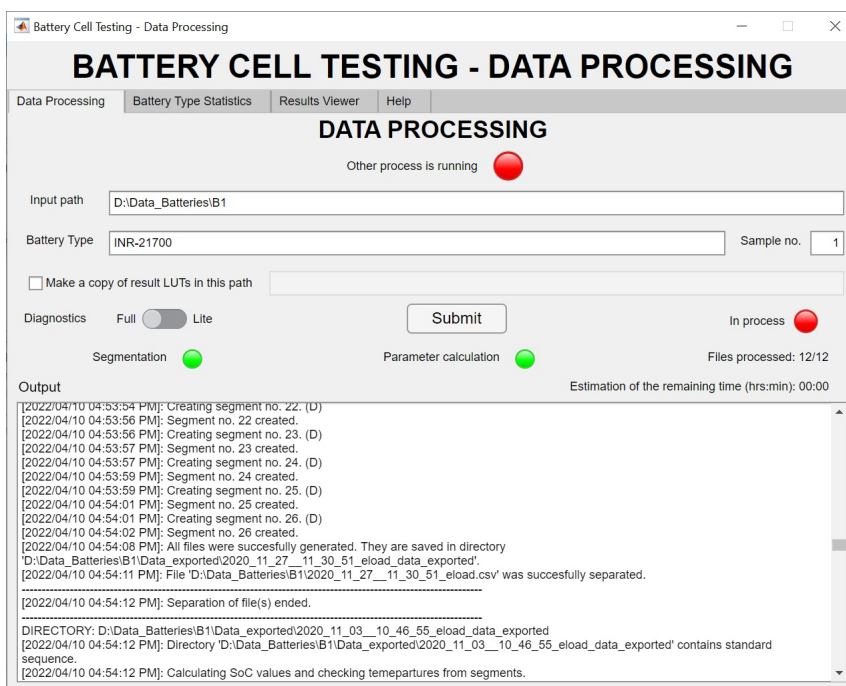




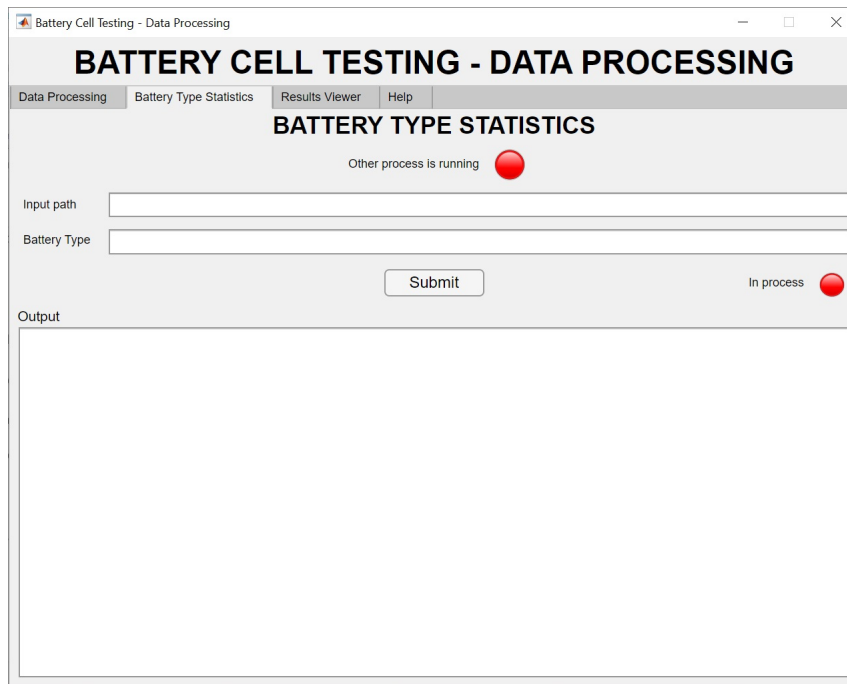
**Obrázek 6.8:** Schéma pro simulaci pulzního stabilizátoru v prostředí MATLAB Simulink se směrem toku výkonu ze zátěže v režimu boost, rozsah napětí mezi svorkami BAT+ a BAT- 48 V – 70 V.

## Příloha C: Záložky programu pro určení parametrů Théveninova obvodového modelu 1. řádu

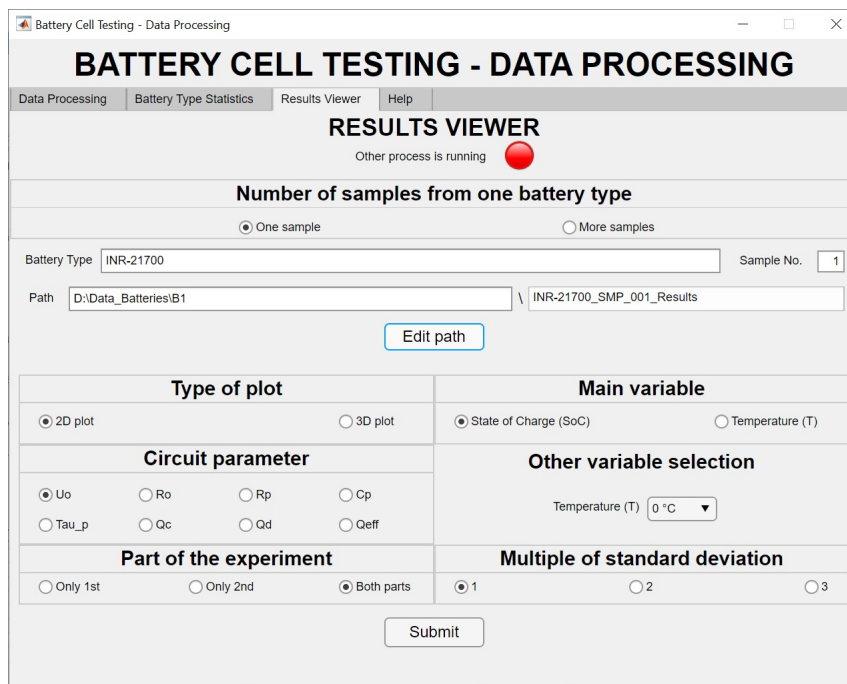
V této příloze jsou uvedeny všechny záložky, které se vyskytují v programu pro určení parametrů náhradního modelu, kterým je Théveninův model 1. řádu.



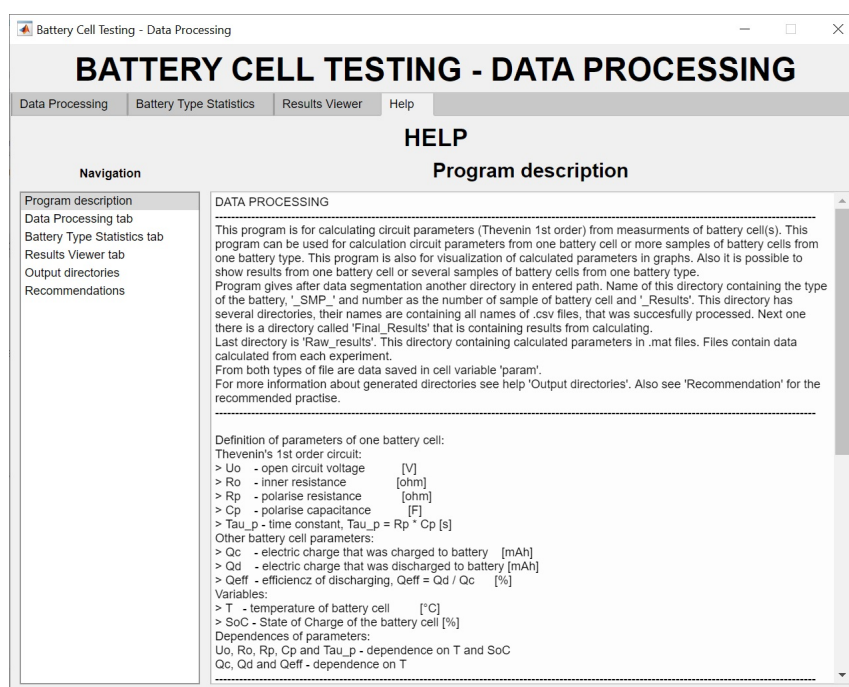
**Obrázek 6.9:** Záložka „Data Processing tab“ v programu pro určení parametrů Théveninova modelu 1. řádu bateriového článku po dokončení výpočtu.



**Obrázek 6.10:** Záložka „Battery Type Statistics tab“ v programu pro určení parametrů Théveninova modelu 1. řádu několika bateriových článků stejného typu.



**Obrázek 6.11:** Záložka „Results Viewer tab“ pro zobrazení výsledku jednotlivých parametrů v grafech.



**Obrázek 6.12:** Zálložka „Help tab“, která slouží jako nápověda k použití programu.

## ■ Příloha D: Nápověda programu pro výpočet parametrů náhradního obvodového modelu bateriového článku

V této příloze je uvedena nápověda k programu pro výpočet parametrů náhradního modelu bateriového článku. Nápověda je psána v angličtině vzhledem k tomu, že požadavek na program byl, že musí být v anglickém jazyce. Jednotlivé odstavce jsou tvořeny částmi nápovědy, kterými jsou:

- Program Description
- Data Processing tab
- Battery Type Statistics tab
- Results Viewer tab
- Output directories
- Recommendations

## ■ Program Description

### DATA PROCESSING

---

This program is for calculating circuit parameters (Thevenin 1st order) from measurements of battery cell(s). This program can be used for calculation circuit parameters from one battery cell or more samples of battery cells from one battery type. This program is also for visualization of calculated parameters in graphs. Also it is possible to show results from one battery cell or several samples of battery cells from one battery type. Program gives after data segmentation another directory in entered path. Name of this directory containing the type of the battery, '\_SMP\_' and number as the number of sample of battery cell and '\_Results'. This directory has several directories, their names are containing all names of .csv files, that was successfully processed. Next one there is a directory called 'Final\_Results' that is containing results from calculating. Last directory is 'Raw\_results'. This directory containing calculated parameters in .mat files. Files contain data calculated from each experiment. From both types of file are data saved in cell variable 'param'. For more information about generated directories see help 'Output directories'. Also see 'Recommendation' for the recommended practise.

---

Definition of parameters of one battery cell:

Thevenin's 1st order circuit:

- > Uo - open circuit voltage [V]
- > Ro - inner resistance [ohm]
- > Rp - polarise resistance [ohm]
- > Cp - polarise capacitance [F]
- > Tau\_p - time constant,  $\text{Tau}_p = R_p * C_p$  [s]

Other battery cell parameters:

- > Qc - electric charge that was charged to battery [mAh]
- > Qd - electric charge that was discharged to battery [mAh]
- > Qeff - efficiency of discharging,  $Q_{eff} = Q_d / Q_c$  [%]

Variables:

- > T - temperature of battery cell [°C]
- > SoC - State of Charge of the battery cell [%]

Dependences of parameters:

Uo, Ro, Rp, Cp and Tau\_p - dependence on T and SoC

Qc, Qd and Qeff - dependence on T

---

How to prepare program and its inputs:

1. Copy all content of directory 'data\_show' anywhere (this step could be skipped).
2. Make a directory anywhere you want and add to this directory all 'eload.csv' files. Each file has to contain experiment data from

one experiment on one battery cell and all files are from measurements of the same battery cell from one battery type.

3. When there are measurements from more samples of one battery type, make directories as described in 2. Remember, one directory contains all 'eload.csv' files from measurement of the same sample!

Notes:

1) This app is interact with user. If there is an error during data processing, it opens window with alert.

2) First part of the data processing is data segmentation. This part can give two output directories in directory that was entered to path: 'Data\_exported' and 'Log\_files'. Directory 'Log\_files' has log files from segmentation from each csv file. The name of log file containing name of the .csv file.

3) The 'Battery Type Statistics' tab is for processing more samples of the one battery type. For using this tool it is recommended to use 'Data Processing' on each sample.

---

Lamp colors description

> 'In process' / 'Other process is running' lamp:

red color - data processing is not in progress

green color - data processing is in progress

> Data processing tab

- 'Segmentation' lamp:

red color - data segmentation has not started yet

yellow color - data segmentation is in progress

green color - data segmentation is finished

- 'Parameter calculation' lamp:

red color - parameter calculation has not started yet

yellow color - parameter calculation is in progress

green color - parameter calculation is finished

## ■ Data Processing tab

How to use data processing tab: 1. Enter the path of the directory with csv files that contain data from measurements of one battery cell.

2. Enter the type of the battery cell and the number of sample. It is used for the name of output directory with results.

3. Choose the type of diagnostics.

4. Check whether you want a copy of results. If you want a copy of results, enter the path that will be saved. The path is to the output directory. 5. Click on the 'Submit' button.

6. Wait until the calculation of time estimation and required space on disc. Then if you want to continue (time and also required space is in order), choose 'Yes' in dialogue window.

7. After the process of program there is a protocol file generated.

## ■ Battery Type Statistics tab

How to use battery type statistics tab:

1. Enter the path of the directory with results of all used battery cell samples from one battery type. On this path is generated directory with results.
2. Enter the type of the battery cells.
3. Click on the 'Submit' button.
4. Wait until the calculation.

Notes:

- 1) The output directory has name <battery\_type>\_LUTs.
- 2) The generated files as results have in their name 'LUT' and no 'SMP'.

## ■ Results Viewer tab

How to use results viewer tab:

1. Choose for showing results from one sample or more samples of battery cells from one type of battery.
  2. Enter the type of the battery. When one sample choice is chosen, also enter the number of sample.
  3. Enter the path of the directory that contains directory that its name is generated by entering number of samples, battery type and (if is necessary) sample number (it is the target directory with results).
  4. Click on the button 'Set path'
  5. Specify the type of the plot.
  6. Specify the parameter. Values of this parameter will be shown.
- The next steps are only for 2D plot:
7. Specify the main variable and then (if it is shown) specify the value of the other variable.
  8. Specify of which part of the experiment you want to see the calculated values.
  9. Specify the multiple of standard deviations, if it is shown.
- The last step for both types is clicking to the 'Submit' button.

Notes:

- 1) Other process has not to run.
- 2) For editing the path, battery type, etc. click on the button 'Edit path'.

## ■ Output directories

### OUTPUT DIRECTORIES DESCRIPTION

---

After data processing there are several directories that are located in path that was entered. Each directory is described below. Some directories and subdirectories contain in their names the name of

the battery that was measured, name of the file that was used for data processing or number of multiple standard deviation which data are saved in the directory. When no directory was deleted, then in path there are located this directories:

```
> Data_exported
> Log_files
> <battery_type>_SMP_<sample_number>_Results
> <battery_type>_LUTs
```

---

Directory: Data\_exported

This directory holds files, that were created from input csv files. In this directory there are several subdirectories. Each subdirectory has files that come from one csv file. Each subdirectory contains an original csv file name (without extension) and ends with '\_data\_exported'. Number of these subdirectories is lower or equal to the number of original csv files, it depend on, if the original csv is without errors. In one subdirectory there are csv files. This csv files are segments from original csv files. This files are used for calculating circuit parameters.

---

Directory: Log\_files

This directory holds log files. Each log file is from segmentation of one csv. The name of log file contains the name of original csv file (without extension). The log file has information about errors in the original csv file. Errors are described in this file. Also there is a type of diagnostics that was used. At the end there is a number of errors in the original csv file.

---

Directory: <battery\_type>\_SMP\_<sample\_number>\_Results

This directory contains results from calculating circuit parameters that comes from measurments of one sample of battery cell. There are several directories. Directories, that contain in their names a file name from original csv file, hold results from calculating from one experiment. In this directories there are graphs from segments 'R' and 'D'. Another directory is directory 'Raw\_results'. This directory has mat files. Each mat file has in its name of the calculated parameter. In columns are cells that hold calculated parameters from one csv file. The column has these line descriptions:

```
> name of the .csv file
> temperature (from experiment it is temperature T1)
> SoC vector
> parameter vector
> vector of standard deviations
```

Data are saved in cell columns. The last directory name is 'Final\_Results'. This directory contains two directories. In directory 'LUTs\_points' there are calculated parameters across experiments from measurments



one battery cell. All parameters are saved in mat files and parameters are represented as points. Points are saved in columns. There is a difference between parameters  $U_o$ ,  $R_o$ ,  $R_p$ ,  $C_p$  and  $\tau_p$  and parameters  $Q_c$ ,  $Q_d$ ,  $Q_{eff}$ . The difference is in dependence on variables, so the table of parameter  $Q_c$ ,  $Q_d$ , or  $Q_{eff}$  has fewer rows than table of parameter  $U_o$ ,  $R_o$ ,  $R_p$ ,  $C_p$  or  $\tau_p$ . Rows have this description:

```
> Variables - T (all parameters), SoC (only parameters  $U_o$ ,  $R_o$ ,  $R_p$ ,  $C_p$ ,  $\tau_p$ )
> Parameter
> Standard deviation of Parameter
> Number of used values for calculation
> Tag - if the point was calculated from both parts of experiment or only from one part
```

In the directory there is one 'read me' file. This file has description about the parameters that was calculated.

The second directory is 'LUTs\_table'. In this directory there are files with saved parameters  $U_o$ ,  $R_o$ ,  $R_p$  and  $C_p$ . In each file there is a 2x2 cell. In first cell there is a description of the variables T and SoC. The second cell has a row vector with SoC values. The third cell has column vector with values of T. The last cell is a matrix that size is equal to length of T vector x length of SoC vector. In this matrix there are saved values of the parameter.

---

Directory: <battery\_type>\_LUTs

This directory contains results from calculating circuit parameters across more samples of battery cells, that are the same type. There are only mat files. They have in their the name of the calculated parameter. This files have the same data representation as data in files from one battery cell. The representation of calculated values is same as in directory '<battery\_type>\_SMP\_<sample\_number>\_Results\_Final\_Results'. The results are divided by its representation. There are two directories 'LUTs\_points' and 'LUTs\_table'.

## ■ Recommendations

Recommendations

1. Use absolute paths to the directories.
2. For the full information about data processing it is recommended to use full diagnostics.
3. When you have more samples than 1, use making a copy and make copies of results in the same directory. It is recommended for using 'Battery type statistics'.
4. When you have only 1 sample of battery cell from one battery type, enter the sample number as 1. After data processing do not use 'Battery type statistics'.
5. Do not delete the directories in the results for correct function

of showing results.

---

Recommended practise - one sample

1. Prepare a directory with 'eload.csv' files. This directory has to contain only files that are from measurements of the same battery cell sample.
2. Go to the tab 'Data Processing'. and enter the path of this directory. As a sample number it is recommended to enter '1'. Recommended: After processing, if is necessary, copy the contain of the output window to the, for example, notepad.
3. Unmark the choice 'Make a copy of results LUTs in path' when you want no another copy.
4. Choose the type of diagnostics and click on 'Submit' button.
5. After processing, the program asks for opening 'Results Viewer' tab. Click on 'Yes'. Then opens the tab with copied information from 'Data Processing' tab that was entered.
6. Set the parameter, variables, etc. to show the graphs with results of this battery cell sample.

---

Recommended practise - more samples, one battery type

1. Prepare all directories with 'eload.csv' files. Each directory has to contain only files that are from measurements of the same battery cell sample. This directories should be in one directory. Recommended: Give name to each directory that means one battery cell samples very similar, for example: B1, B2, B3, etc. or Bat\_Sample\_01, Bat\_Sample\_02, etc.
2. Go to the tab 'Data Processing' and gradually start the program with input path that holds a directory with 'eload.csv' files. Do not forget to change the path to the next directory and a sample number. Recommended: After each processing of one sample, if is necessary, copy the contain of the output window to the, for example, notepad.
3. When one sample is processed, stay on the tab 'Data Processing' until the last sample is processed. Then click to the button 'Battery Type Statistics' to open the Battery Type Statistics tab. All input information should be copied from the tab Data Processing.
4. Start the statistics. After the process (in several seconds) go to the Results Viewer tab. The program should ask you if you want open the tab. All input information should be copied from the tab Battery Type Statistics.
5. Set the parameter, variables, etc. to show the graphs with results of all batteries. If you want to show results from one sample, click on the 'Edit path' and edit the first path.

---

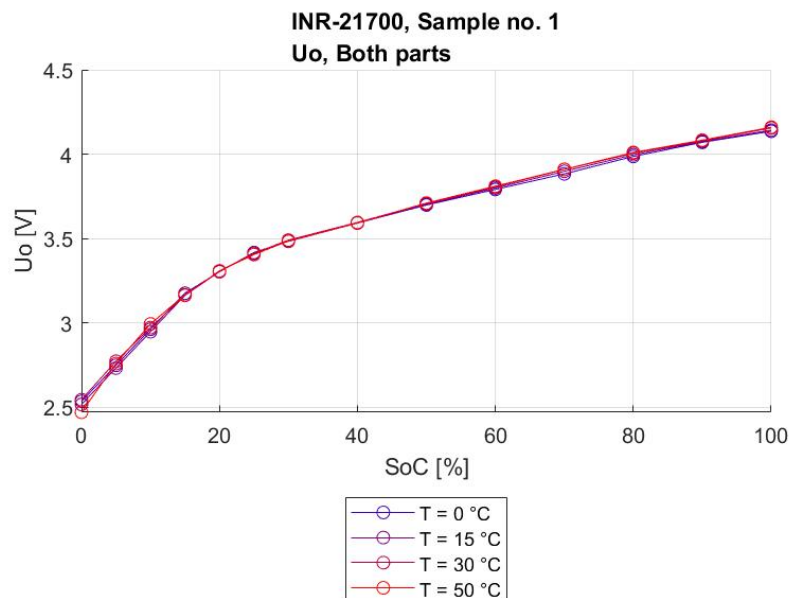
Recommended practise - more samples, more battery types

1. Make a directory for each sample. In each directory move or copy all 'eload.csv' files that belongs to the correct battery sample.

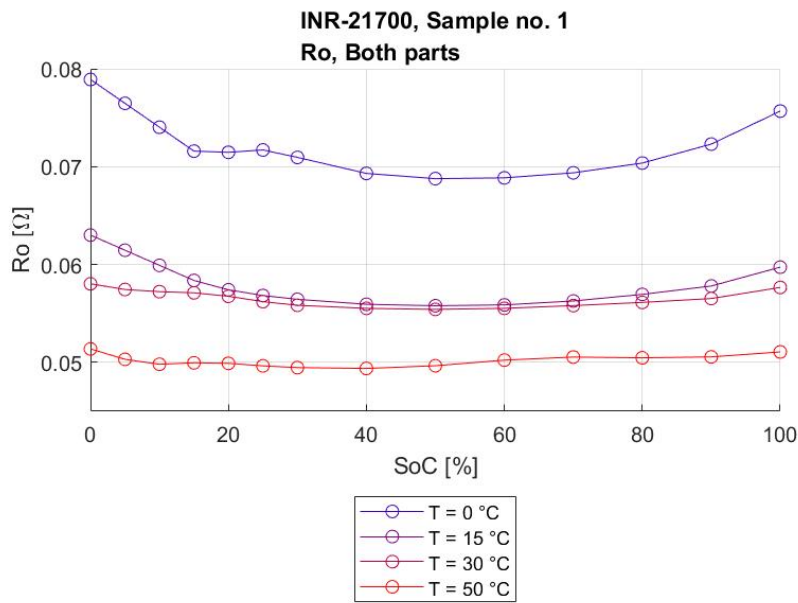
2. Make directories, that each directory is for one battery type.
3. To each directory copy directories that holds data from measurement samples of the same battery type.
4. For each directory that holds data from measurements of several samples of battery type, do the process as it is described in 'Recommended practise - more samples, one battery type' from point 2.

## ■ Příloha E: Výsledky parametrů Théveninova modelu 1. řádu pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1

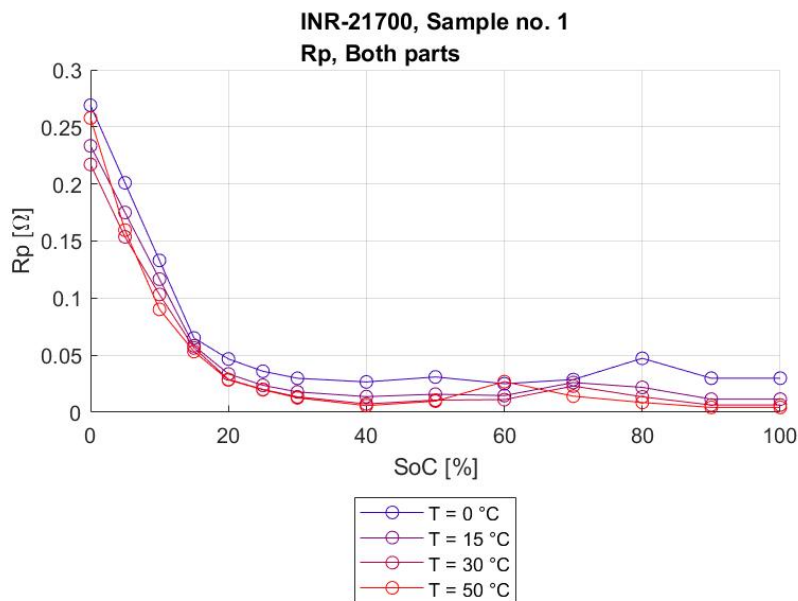
V této příloze jsou uvedeny výsledky parametrů Théveninova modelu 1. řádu pro použitý bateriový článek. Kromě parametrů již zmíněného modelu jsou tu také parametry  $Q_c$ ,  $Q_d$  a  $Q_{eff}$ . Všechny uvedené výsledky jsou uvedeny za obě části experimentů.



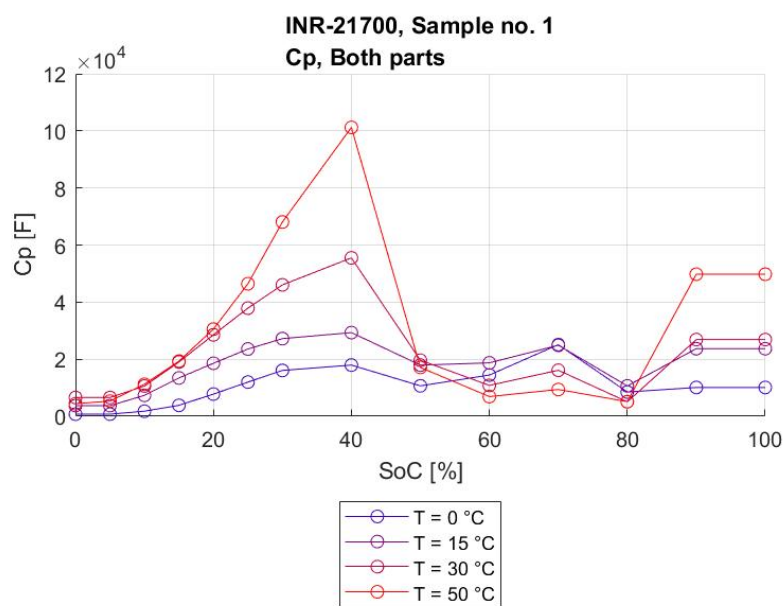
**Obrázek 6.13:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $U_0$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.



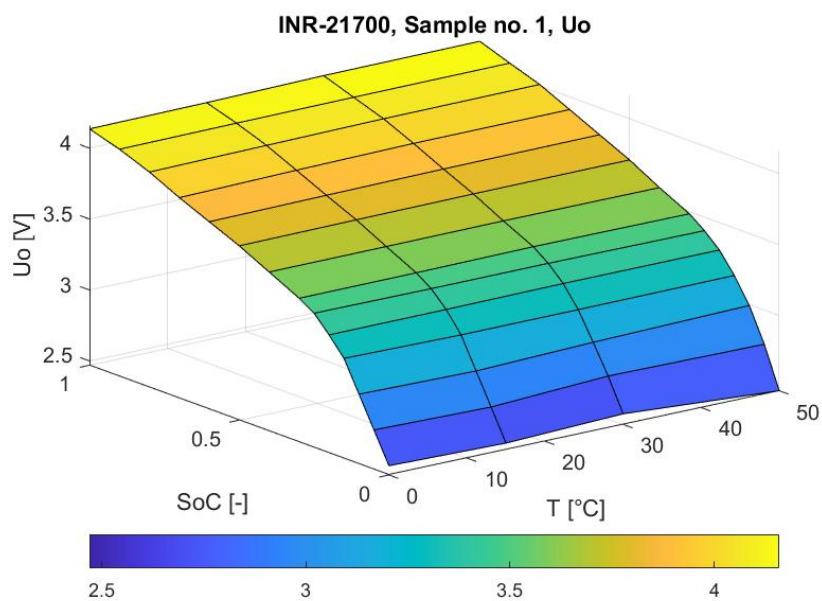
**Obrázek 6.14:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $R_o$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.



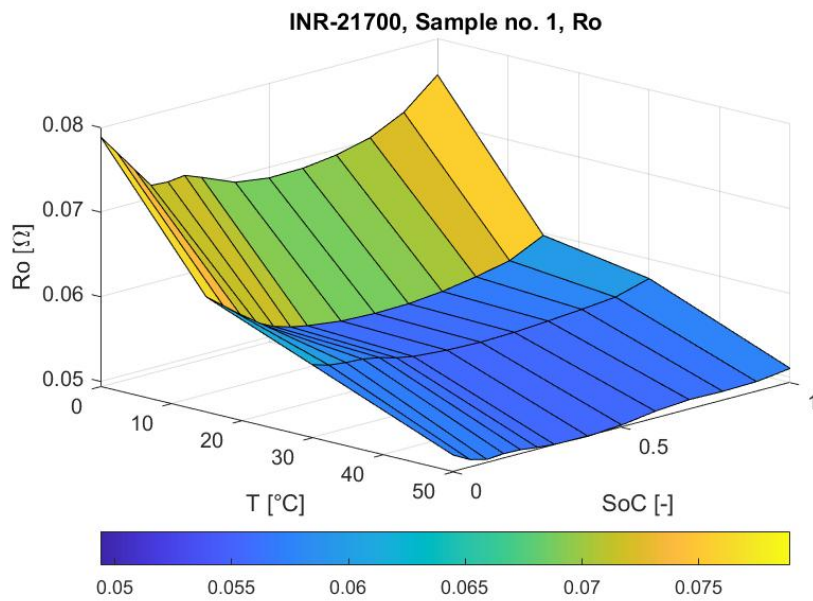
**Obrázek 6.15:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $R_p$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.



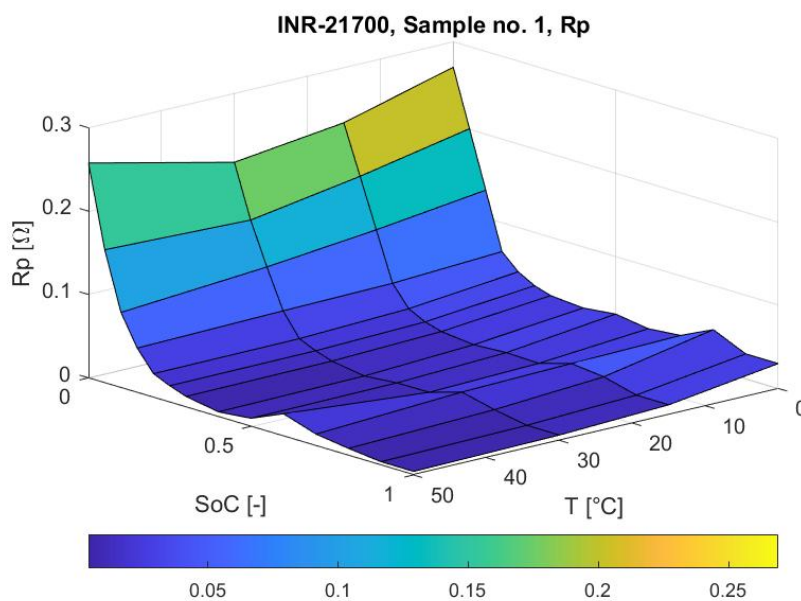
**Obrázek 6.16:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $C_p$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.



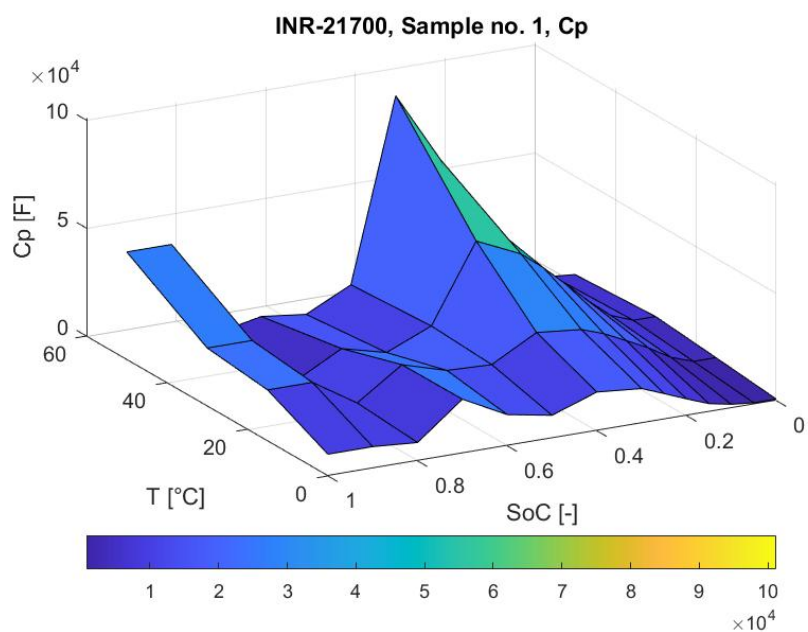
**Obrázek 6.17:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $U_0$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu.



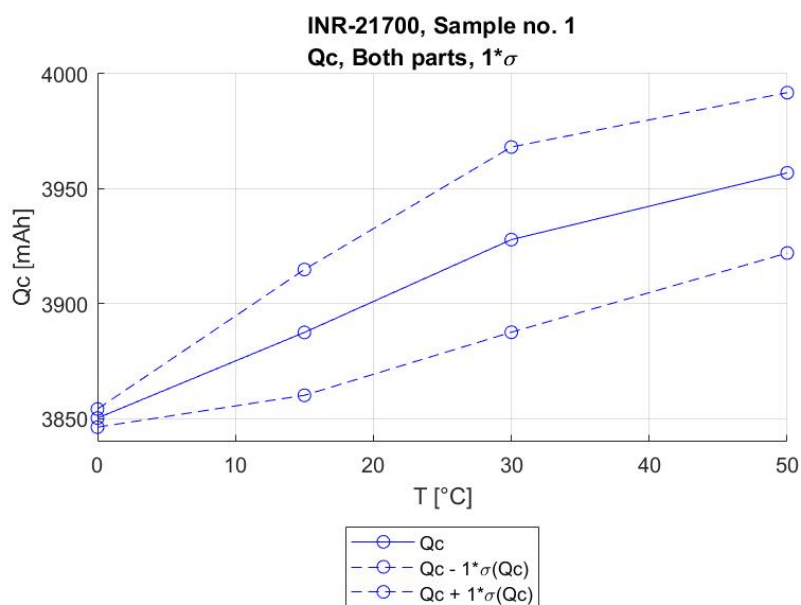
**Obrázek 6.18:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $R_o$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu.



**Obrázek 6.19:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $R_p$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu.

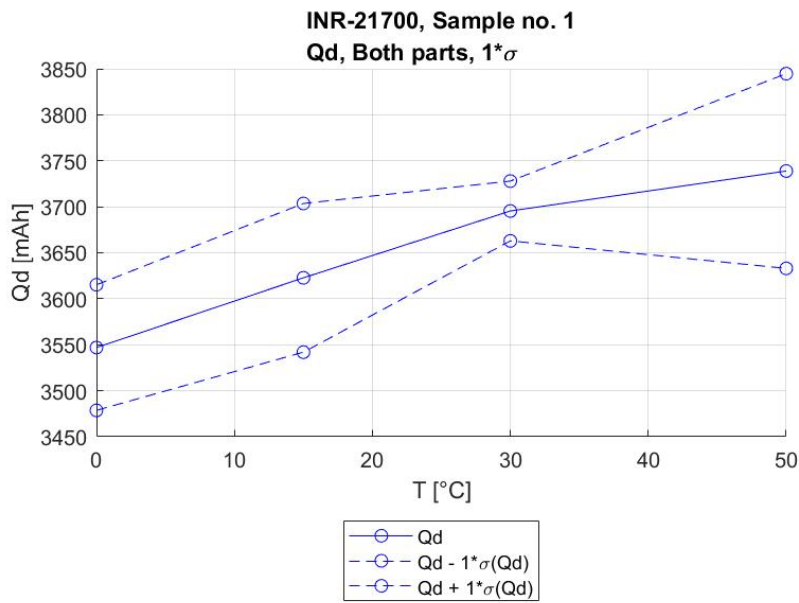


**Obrázek 6.20:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $C_p$  Théveninova modelu 1. řádu pro obě části experimentu zobrazené ve 3D grafu.

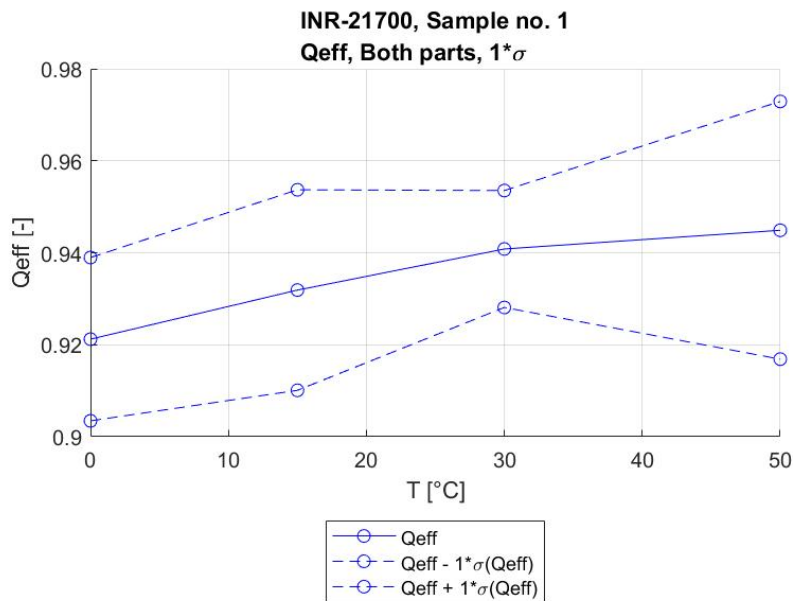


**Obrázek 6.21:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $Q_c$  pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.





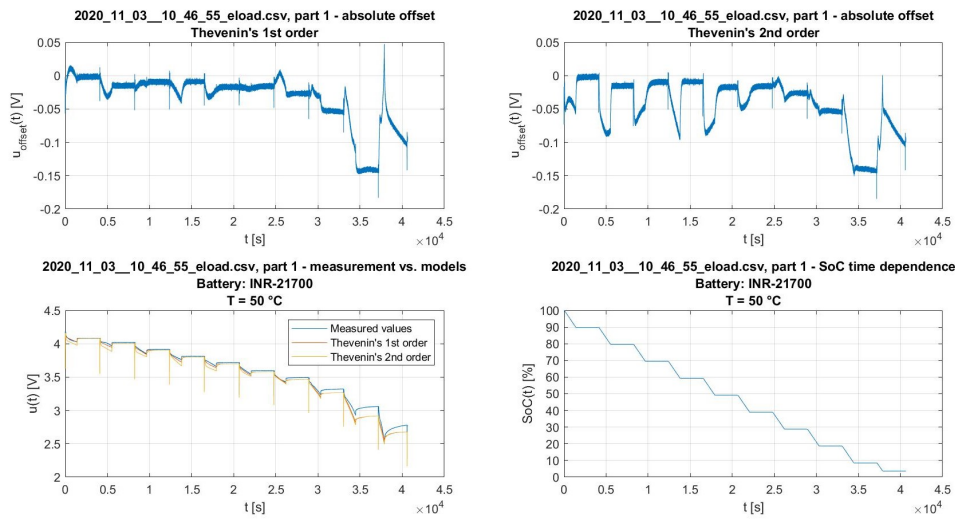
**Obrázek 6.22:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $Q_d$  pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.



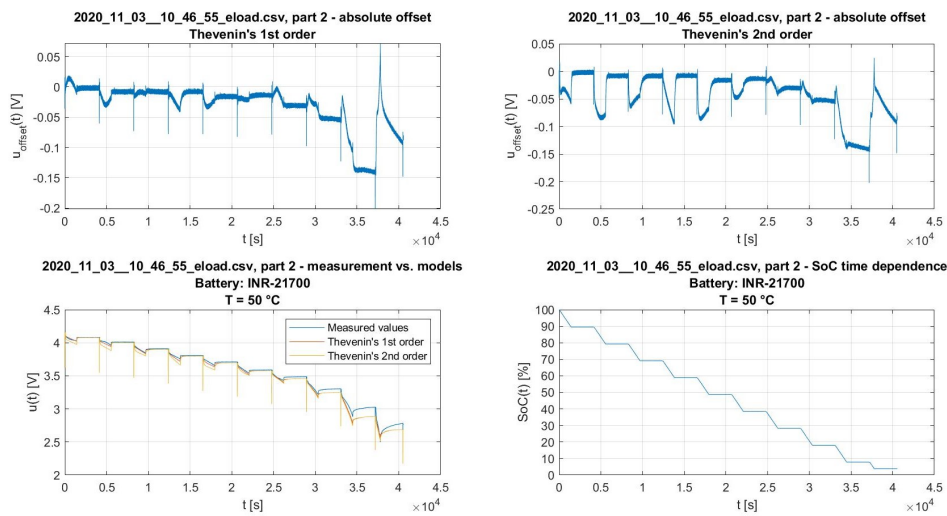
**Obrázek 6.23:** Výsledky pro bateriový článek INR-21700, vzorek č. 1 pro parametr  $Q_{eff}$  pro obě části experimentu zobrazené ve 2D grafu.

## ■ Příloha F: Výsledky verifikace náhradních obvodových modelů pro bateriový článek článek INR-21700, vzorek č. 1

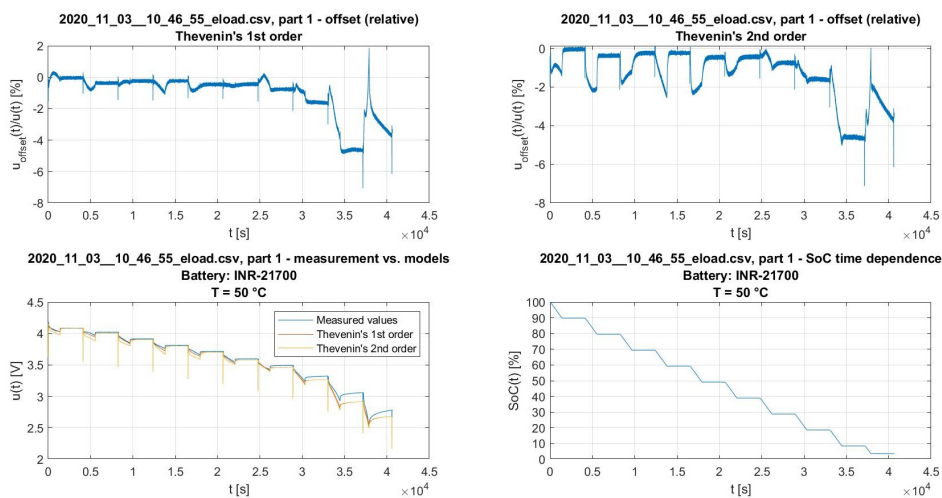
V této příloze jsou zobrazeny výsledky verifikace. Verifikace byla provedena na bateriovém článku typu INR-21700. Ověřovanými náhradními obvodovými modely byly Théveninův model 1. řádu a Théveninův model 2. řádu. Verifikace byla provedena pro každý experiment, z něhož parametry byly úspěšně určeny a pro každou část experimentu samostatně. Výsledky modelů používají hodnoty parametrů, které byly spočítány z obou částí experimentů.



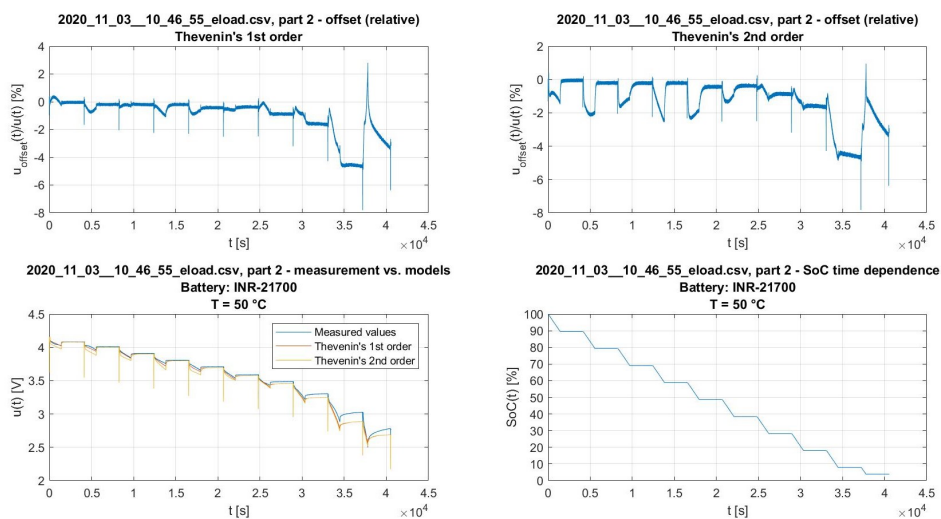
**Obrázek 6.24:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_03\_10\_46\_55\_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



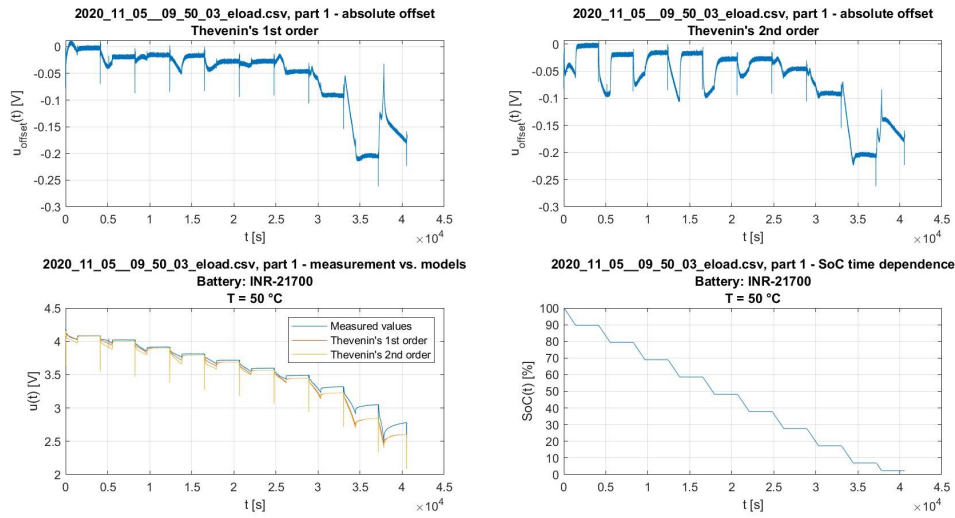
**Obrázek 6.25:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_03\_10\_46\_55\_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.



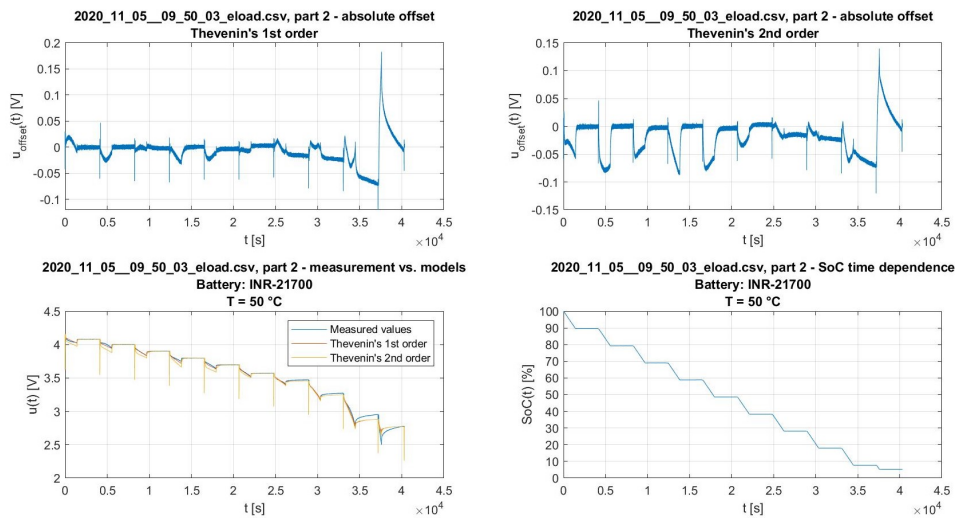
**Obrázek 6.26:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_03\_10\_46\_55\_eLOAD.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.



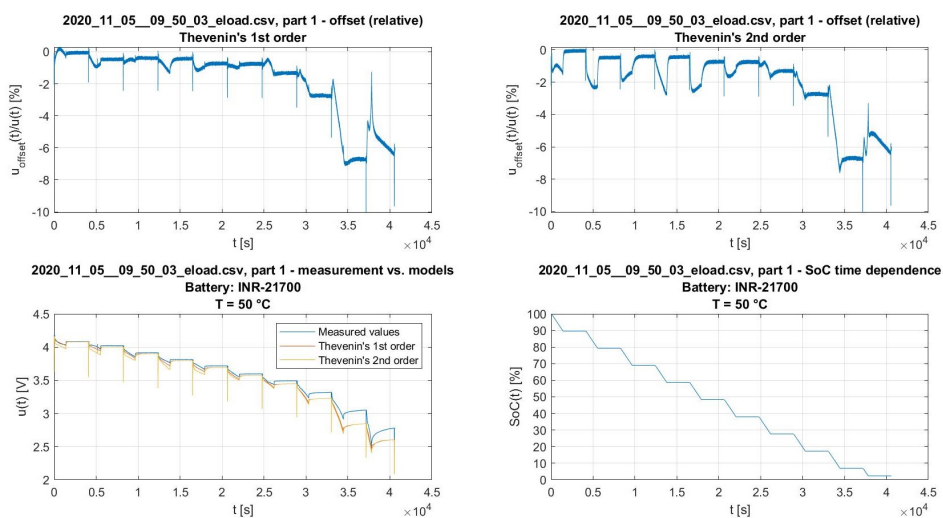
**Obrázek 6.27:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_03\_10\_46\_55\_eLOAD.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.



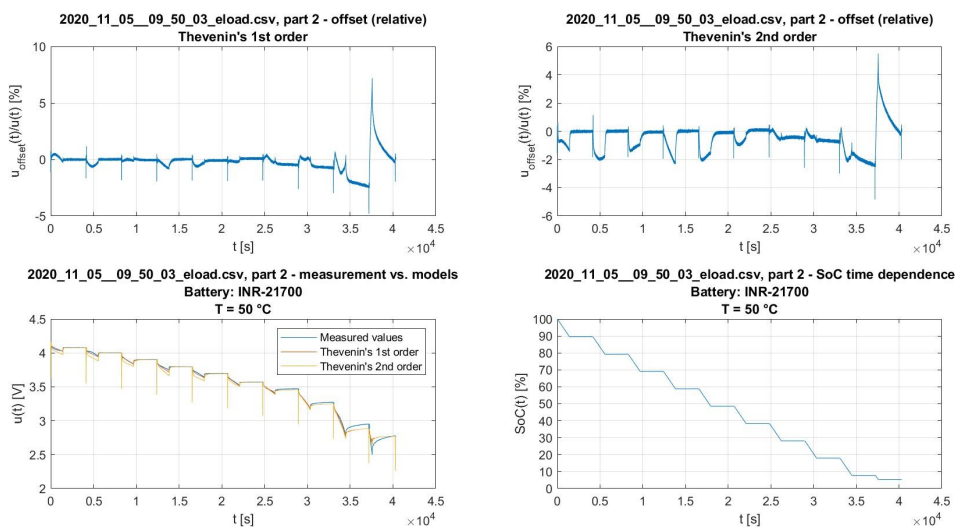
**Obrázek 6.28:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_05\_09\_50\_03\_eoload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



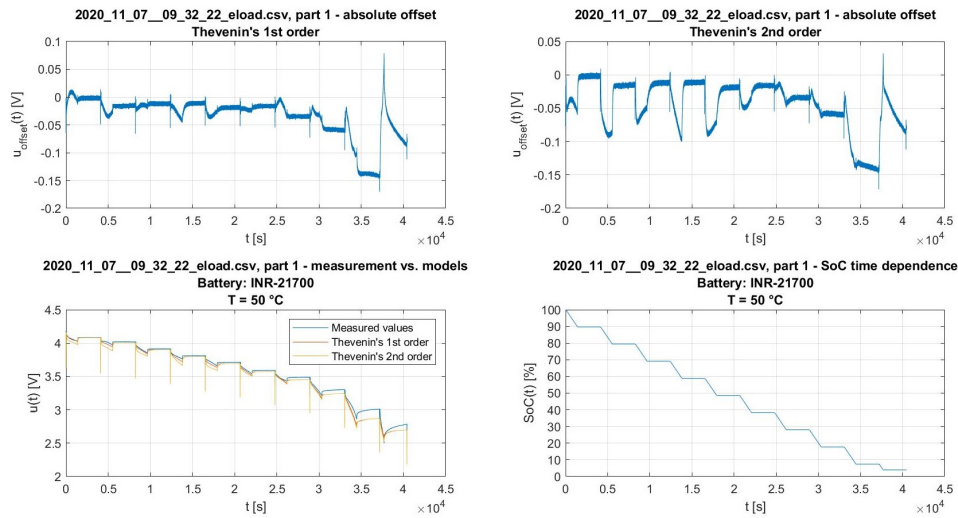
**Obrázek 6.29:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_05\_09\_50\_03\_eoload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.



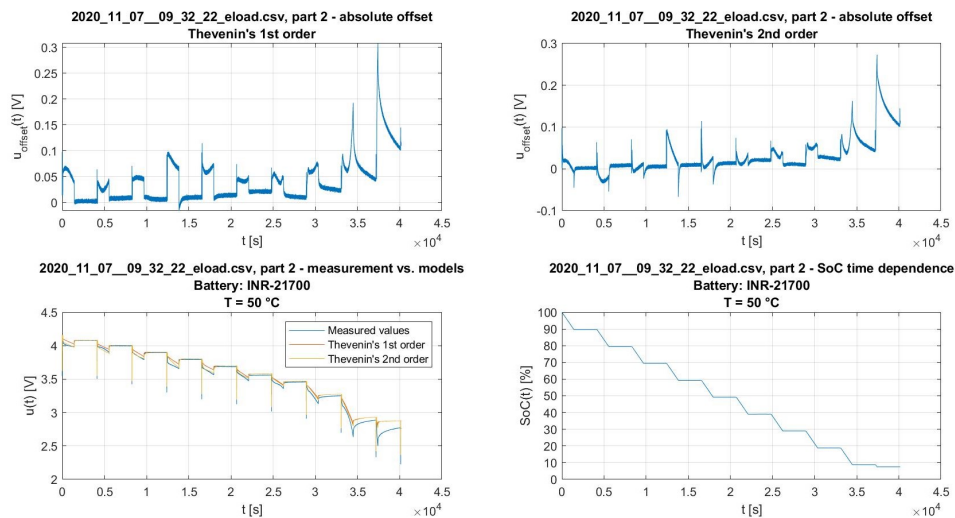
**Obrázek 6.30:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_05\_09\_50\_03\_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.



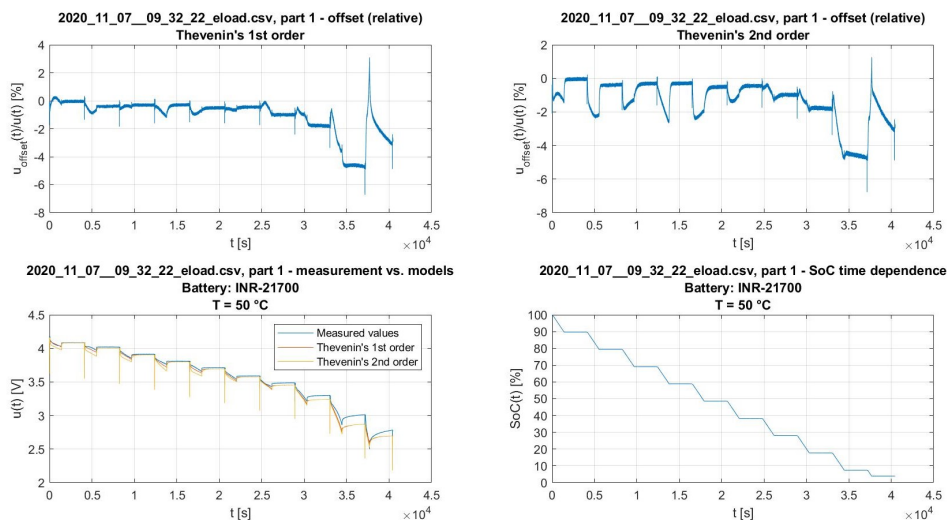
**Obrázek 6.31:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_05\_09\_50\_03\_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.



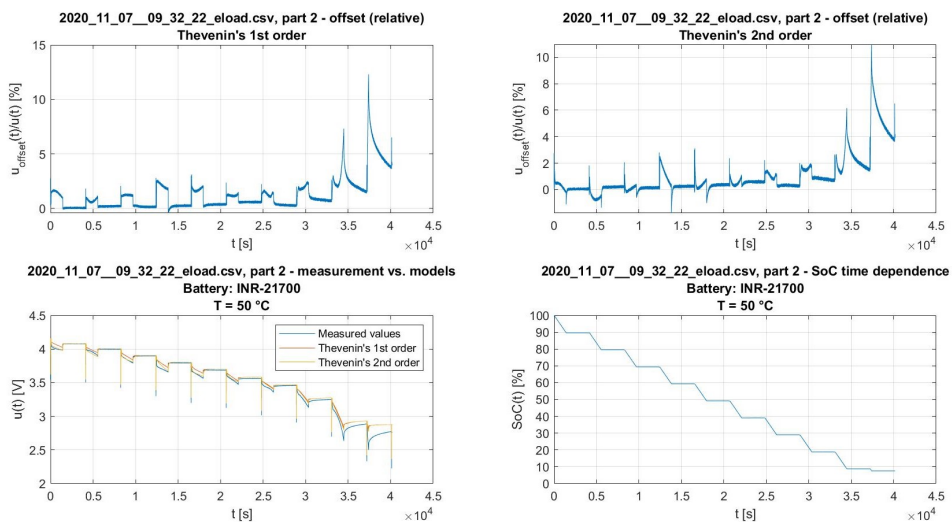
**Obrázek 6.32:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_07\_09\_32\_22\_eoload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



**Obrázek 6.33:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_07\_09\_32\_22\_eoload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.

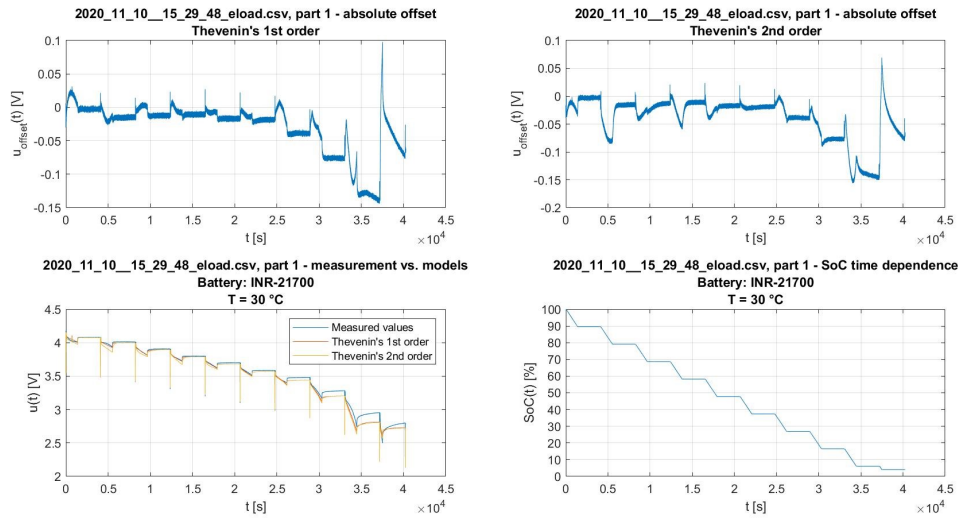


**Obrázek 6.34:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_07\_\_09\_32\_22\_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.

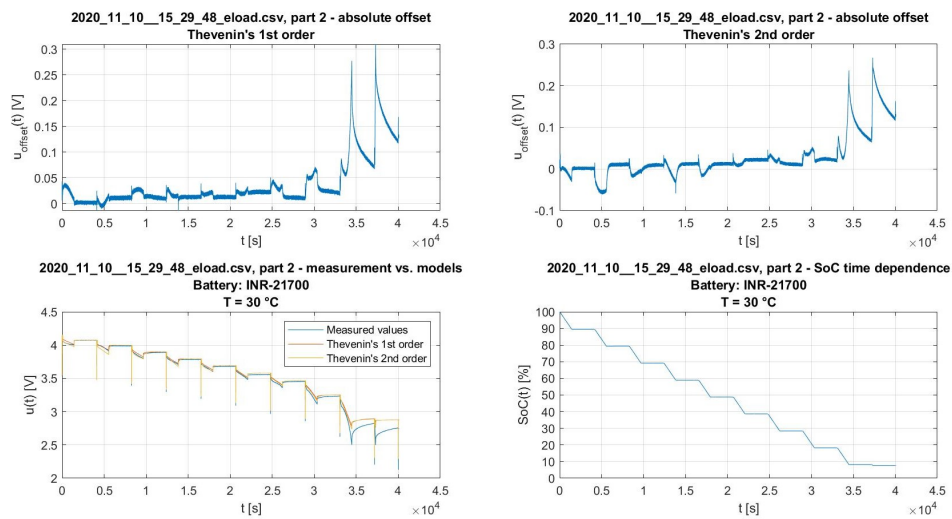


**Obrázek 6.35:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_07\_\_09\_32\_22\_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.

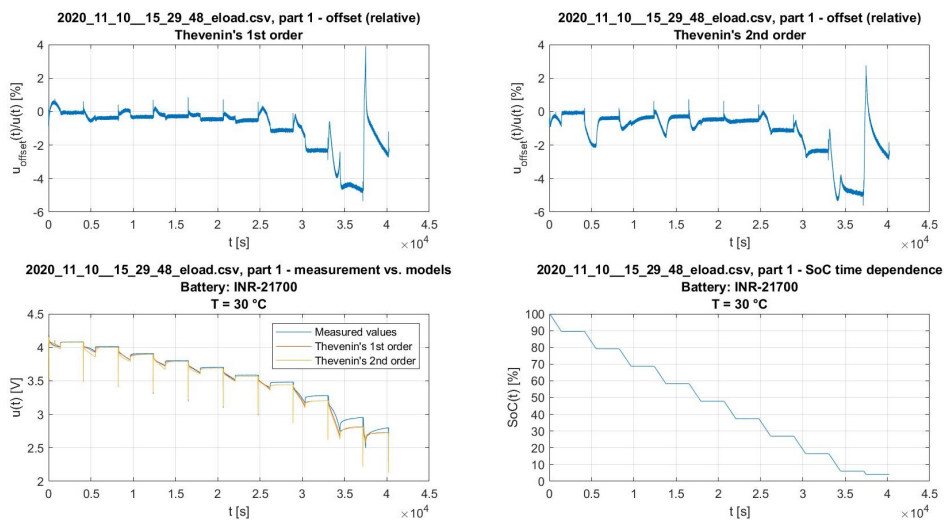




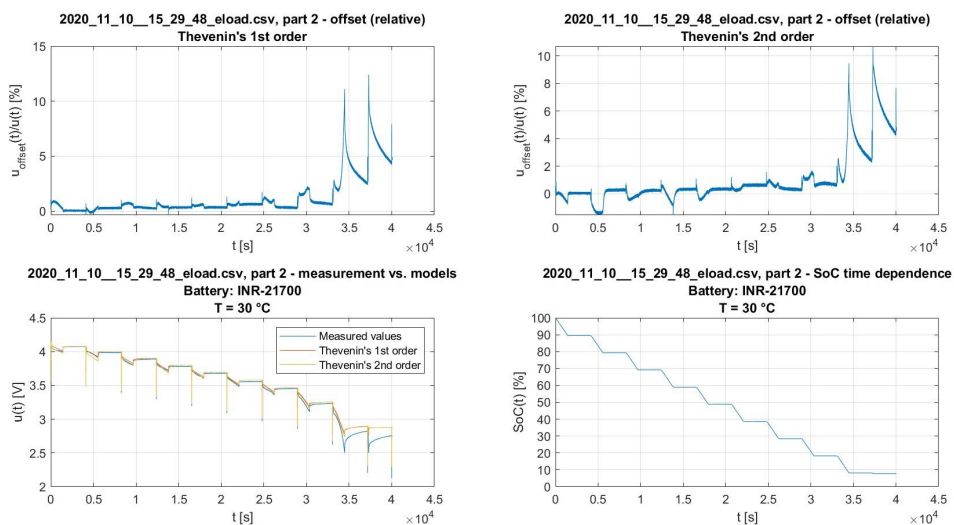
**Obrázek 6.36:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_10\_15\_29\_48\_eLOAD.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



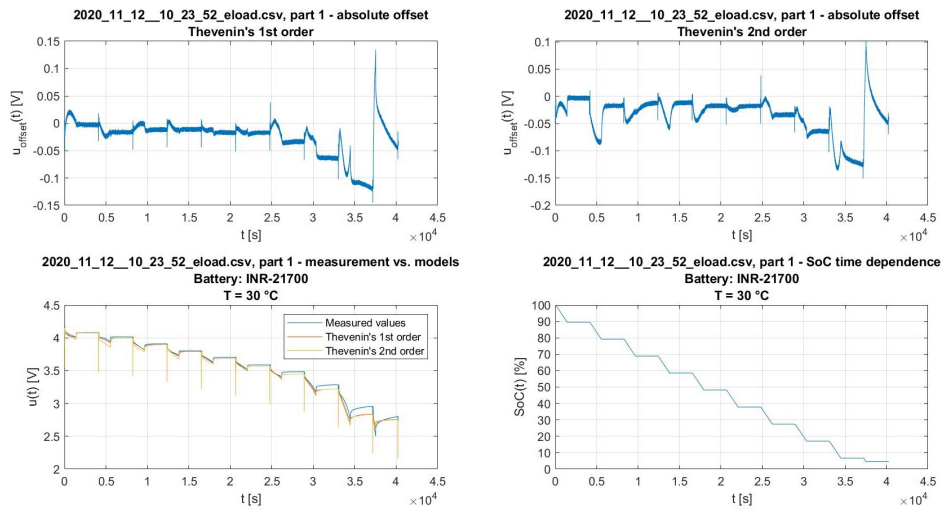
**Obrázek 6.37:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_10\_15\_29\_48\_eLOAD.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.



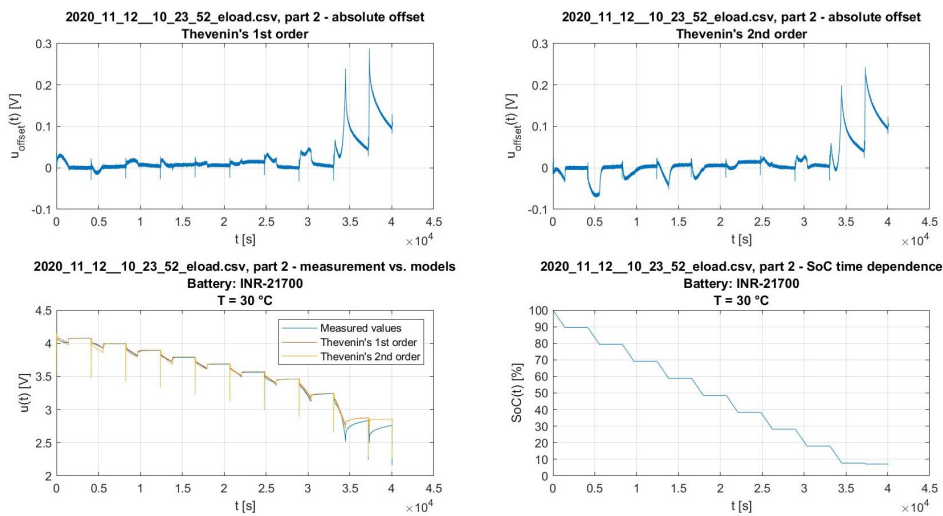
**Obrázek 6.38:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_10\_15\_29\_48\_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.



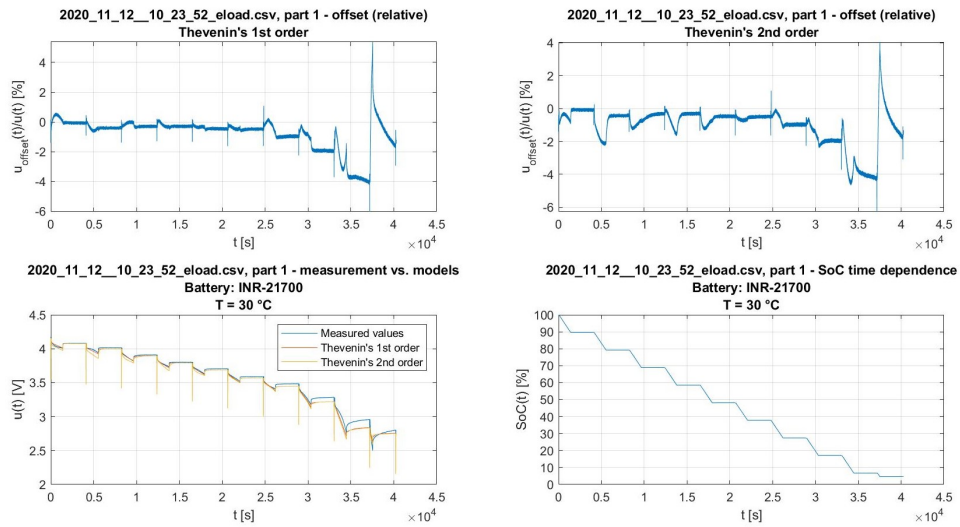
**Obrázek 6.39:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_10\_15\_29\_48\_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.



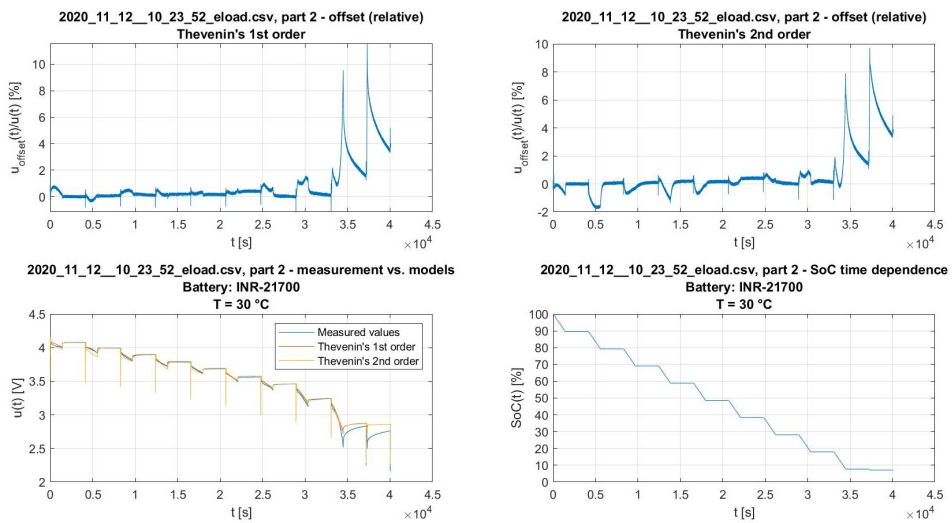
**Obrázek 6.40:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_12\_10\_23\_52\_eoload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



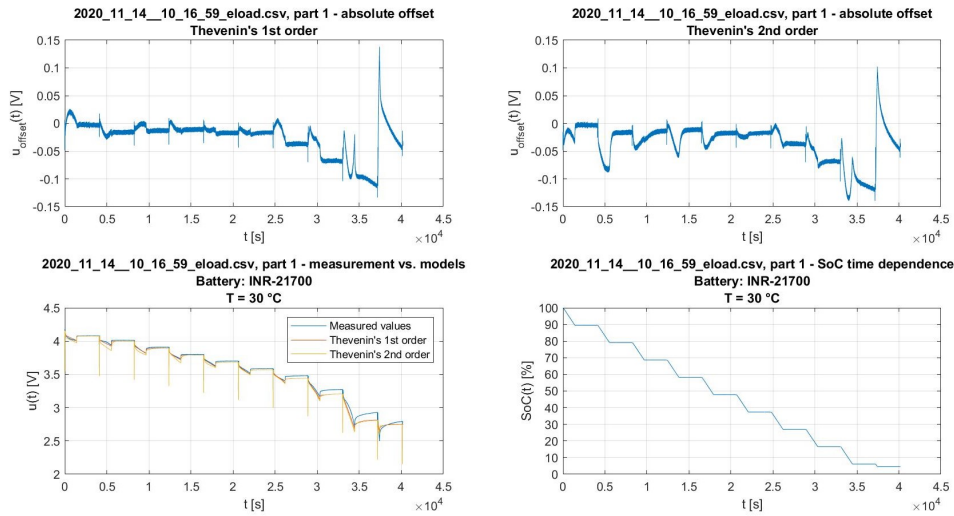
**Obrázek 6.41:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_12\_10\_23\_52\_eoload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.



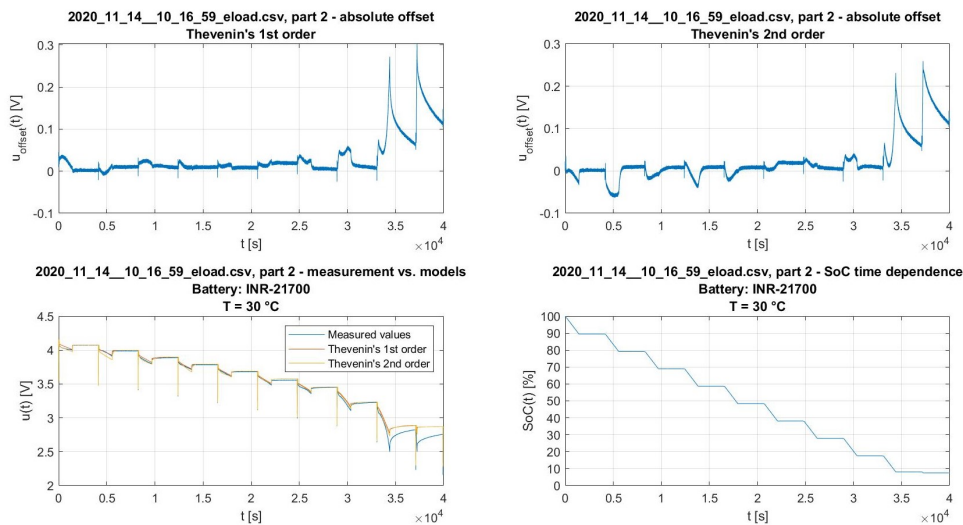
**Obrázek 6.42:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_12\_\_10\_23\_52\_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.



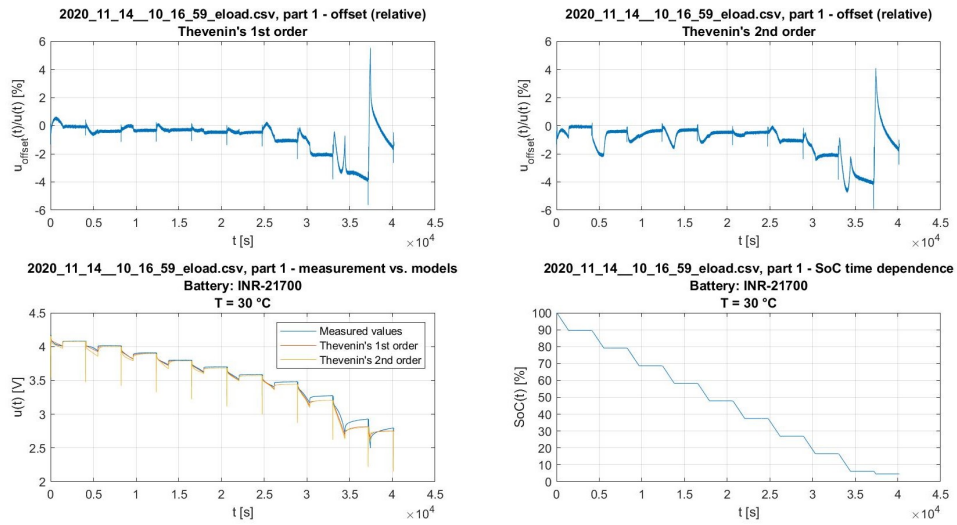
**Obrázek 6.43:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_12\_\_10\_23\_52\_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.



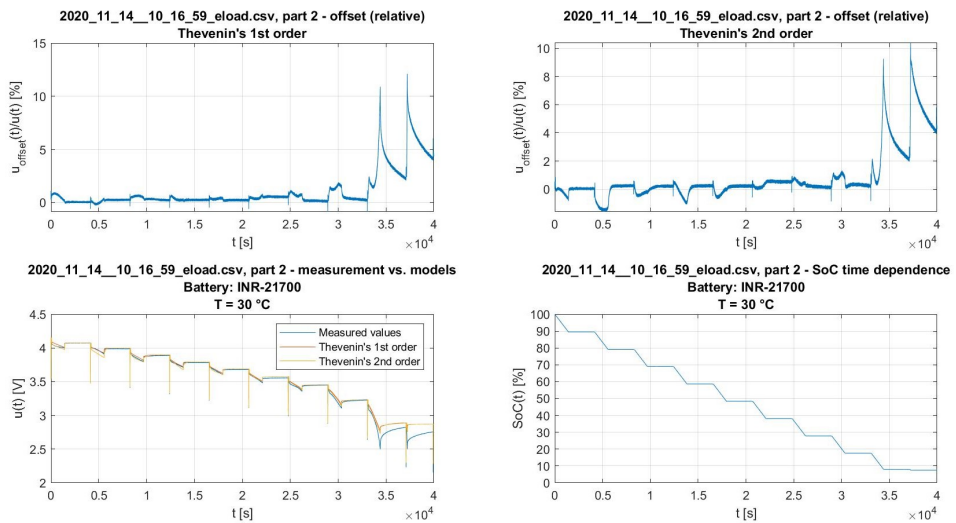
**Obrázek 6.44:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_14\_10\_16\_59\_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



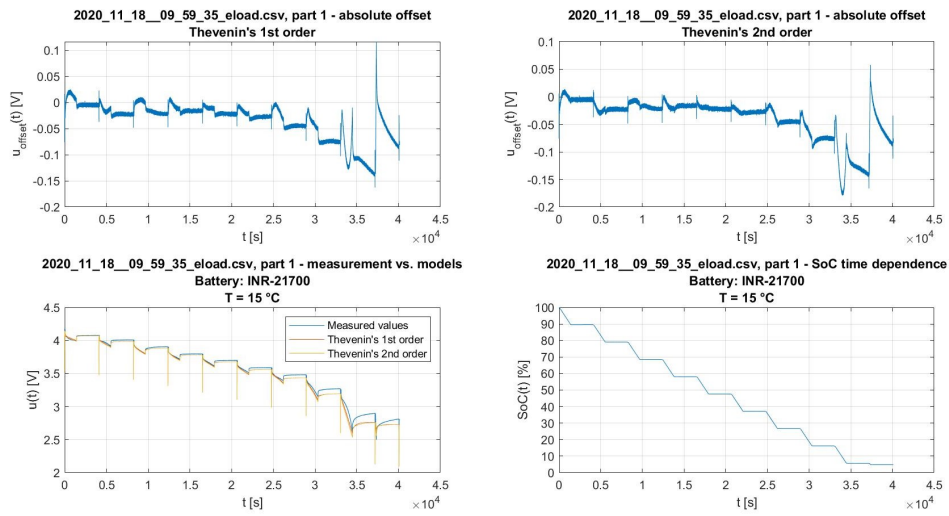
**Obrázek 6.45:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_14\_10\_16\_59\_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.



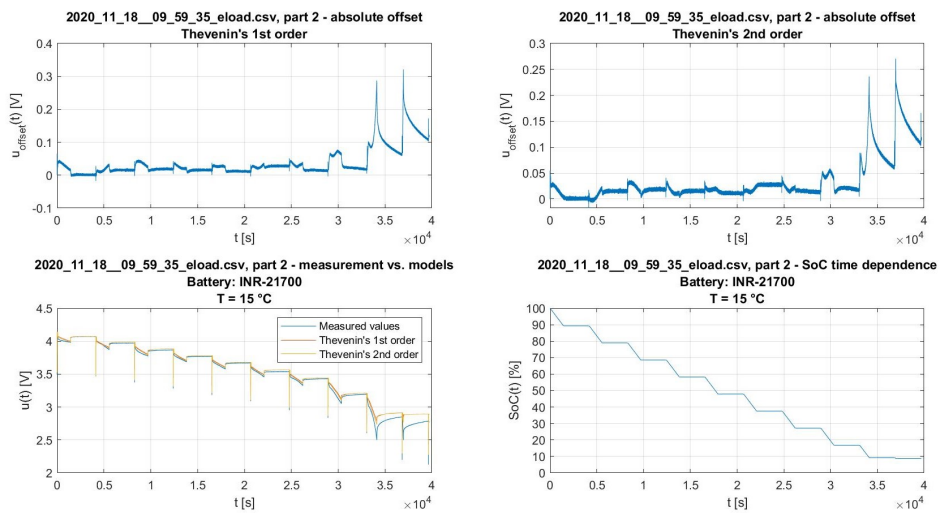
**Obrázek 6.46:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_14\_10\_16\_59\_load.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.



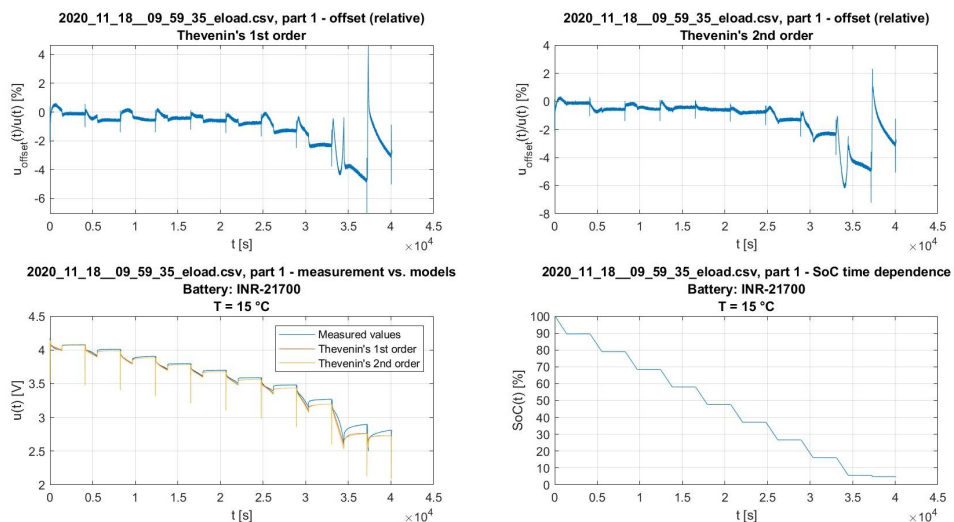
**Obrázek 6.47:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_14\_10\_16\_59\_load.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.



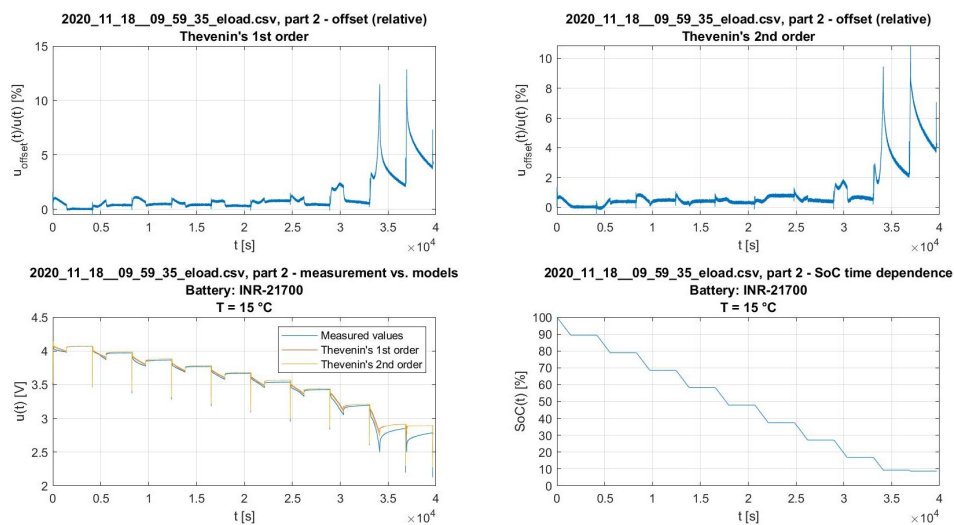
**Obrázek 6.48:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_18\_09\_59\_35\_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



**Obrázek 6.49:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_18\_09\_59\_35\_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.

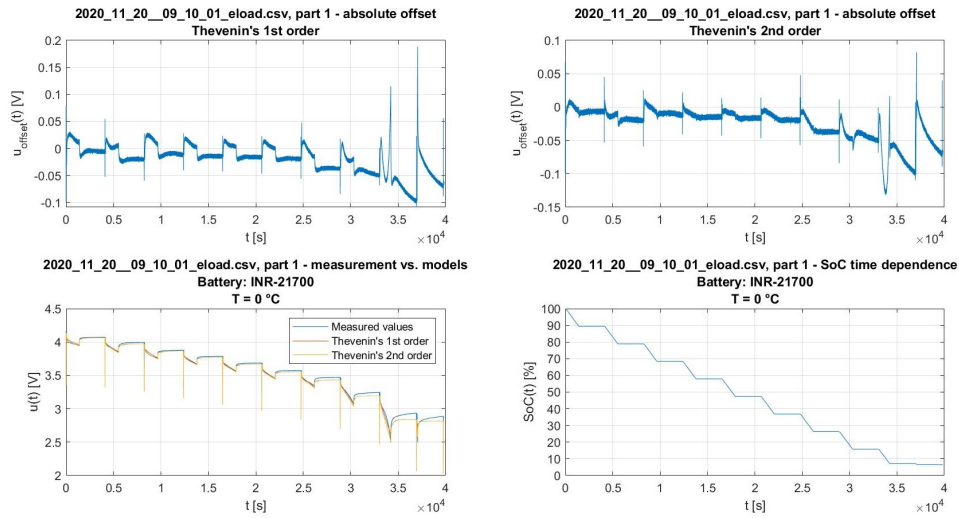


**Obrázek 6.50:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_18\_09\_59\_35\_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.

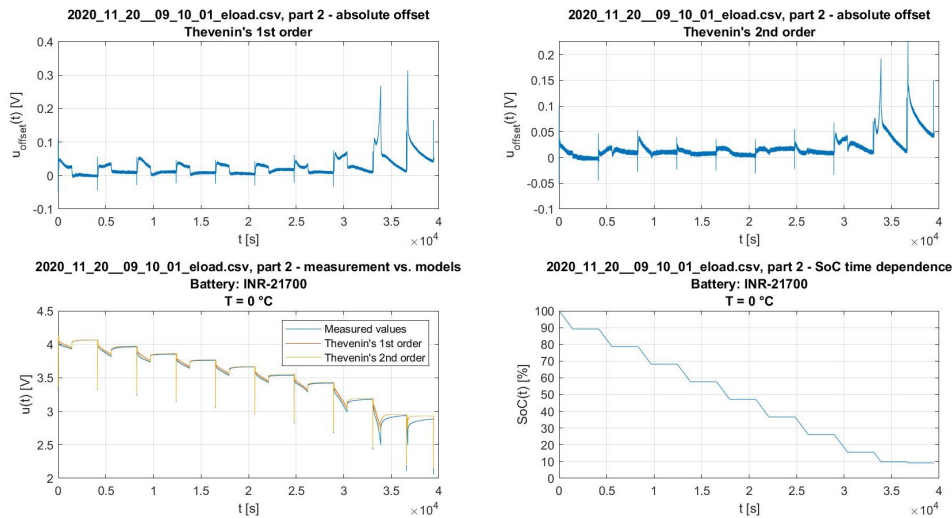


**Obrázek 6.51:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_18\_09\_59\_35\_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.

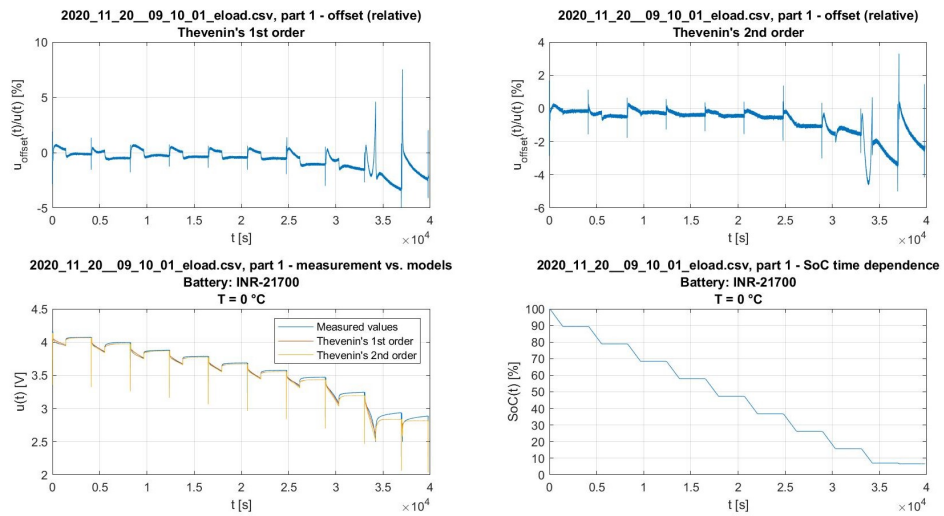




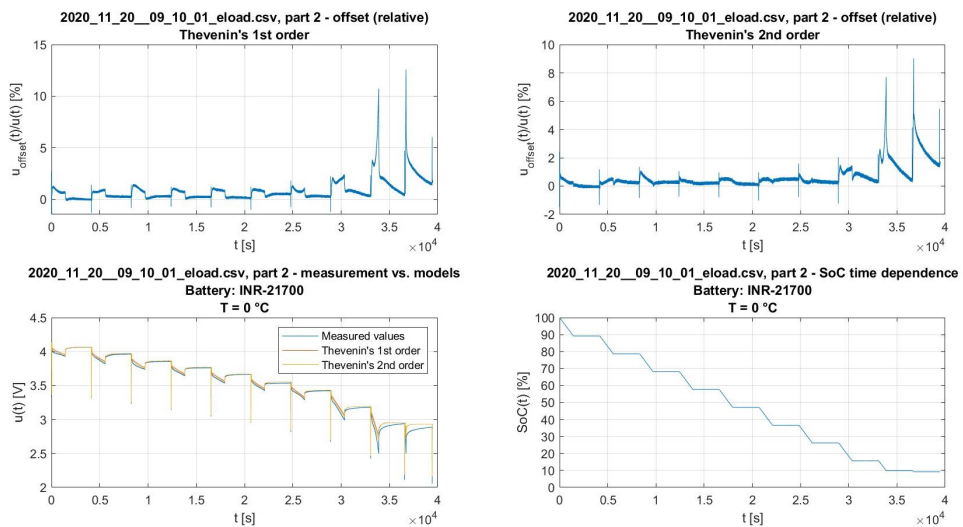
**Obrázek 6.52:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_20\_09\_10\_01\_eload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



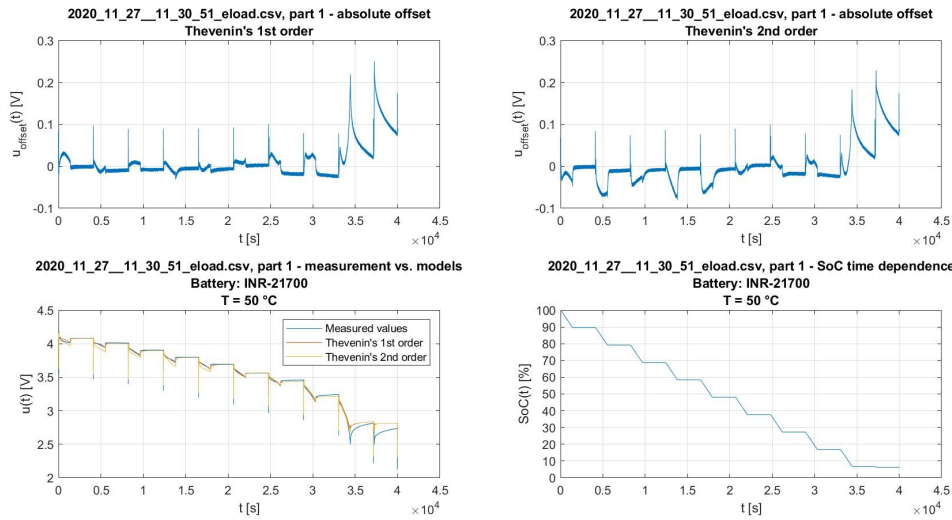
**Obrázek 6.53:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_20\_09\_10\_01\_eload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.



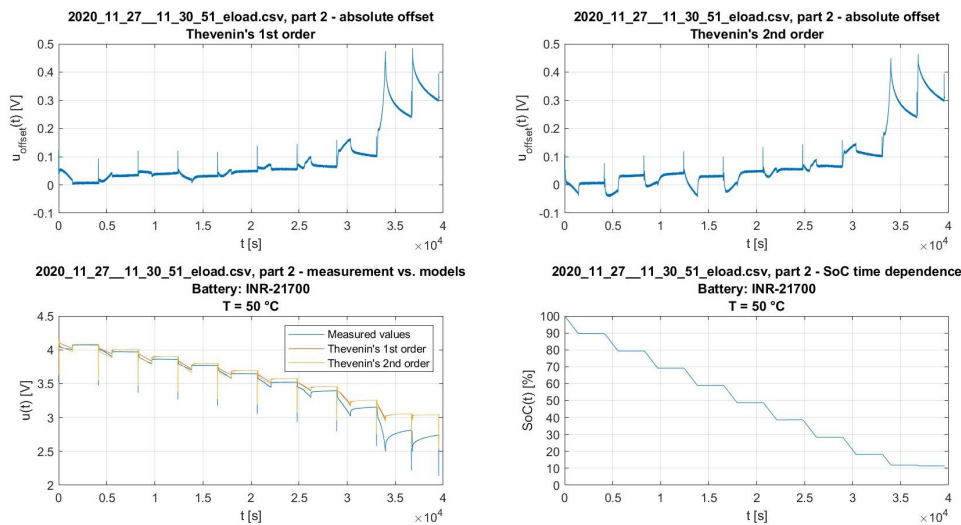
**Obrázek 6.54:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_20\_09\_10\_01\_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.



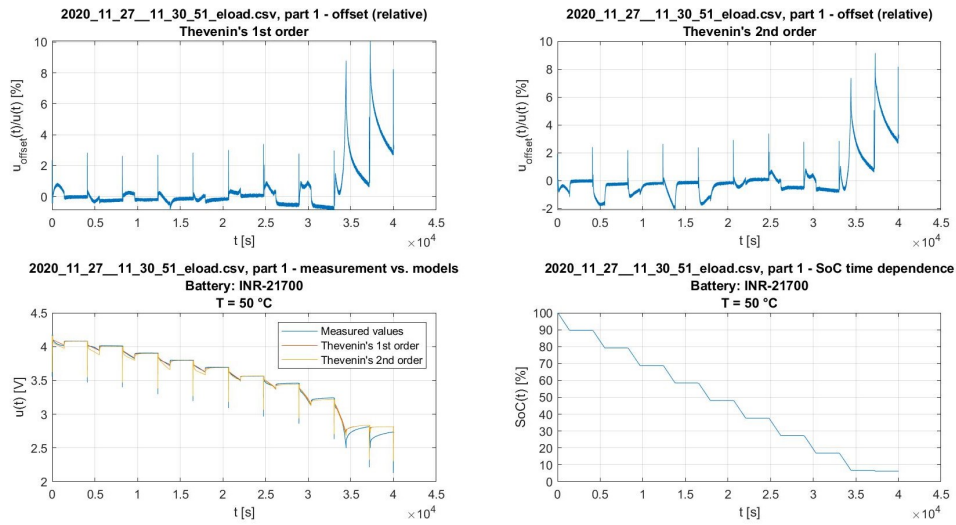
**Obrázek 6.55:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_20\_09\_10\_01\_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.



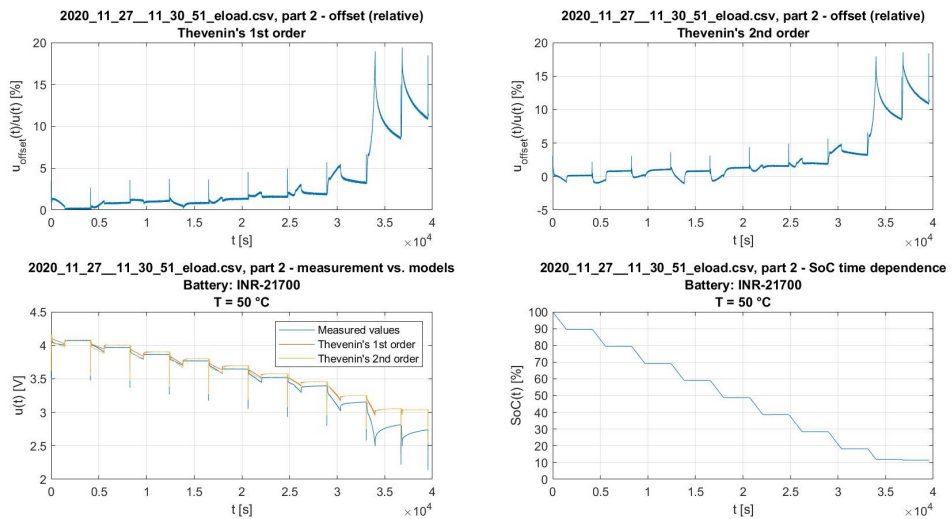
**Obrázek 6.56:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_27\_11\_30\_51\_eoload.csv z 1. části s absolutními hodnotami výsledků.



**Obrázek 6.57:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_27\_11\_30\_51\_eoload.csv ze 2. části s absolutními hodnotami výsledků.



**Obrázek 6.58:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_27\_\_11\_30\_51\_eload.csv z 1. části s relativními hodnotami výsledků.



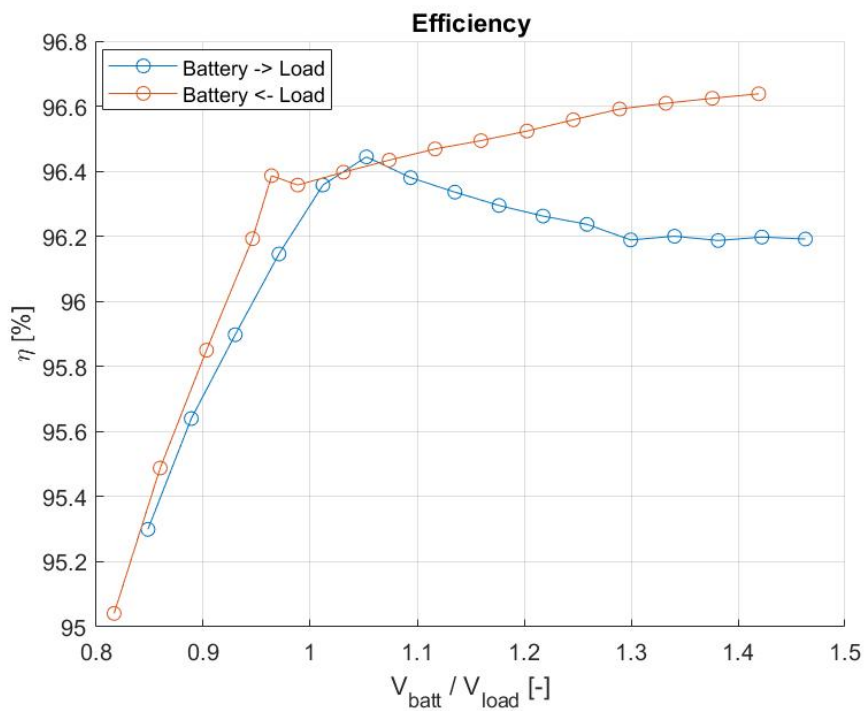
**Obrázek 6.59:** Výsledky verifikace z experimentu uloženém v souboru 2020\_11\_27\_\_11\_30\_51\_eload.csv ze 2. části s relativními hodnotami výsledků.

## ■ Příloha G: Výsledky simulace pro dimenzování prvků pulzního stabilizátoru

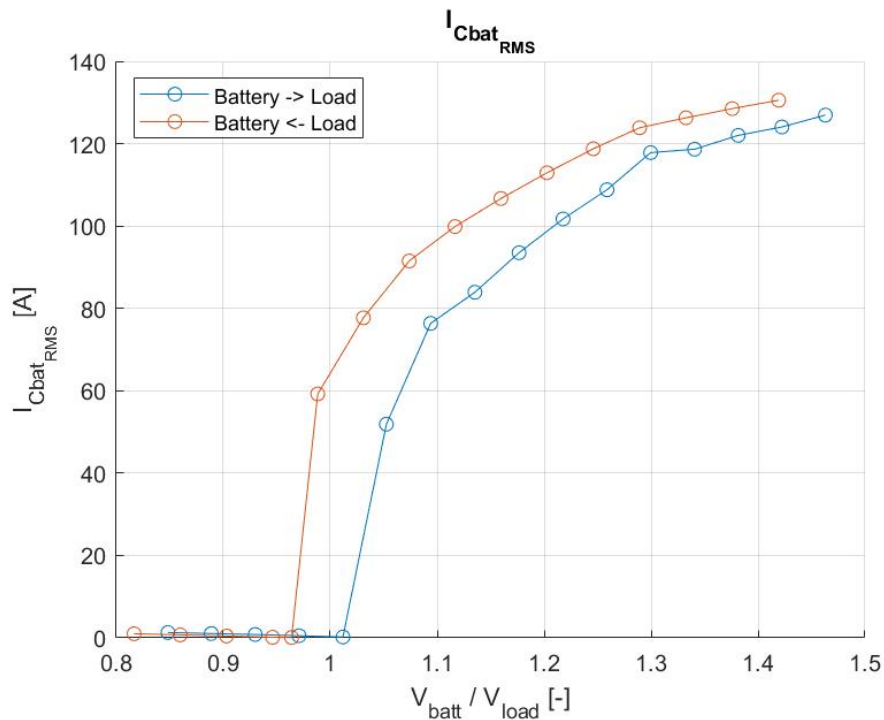
V této příloze jsou uvedeny výsledky simulace pro každý prvek pulzního stabilizátoru. Uvedeny jsou zde efektivní hodnoty napětí a proudu a zvlnění proudu a napětí kondenzátorů  $C_{bat}$  a  $C_{48V}$ , efektivní hodnota proudu a zvlnění proudu induktoru  $L$ , efektivní hodnoty výkonových ztrát induktoru  $L$  a tranzistorů  $M1$ ,  $M2$ ,  $M3$  a  $M4$ . Ztráty pro kondenzátory tu nejsou uvedeny, protože je možné je zanedbat vzhledem k jejich velikosti. Všechny uvedené výsledky pracují s maximální hodnotou výkonu pulzního stabilizátoru 13 kW. Většina výsledků je vztažena k poměru napětí na kondenzátorech  $C_{bat}$  a  $C_{48V}$ , které jsou zde značeny  $V_{batt}$  pro napětí na kondenzátoru  $C_{bat}$  a  $V_{load}$  pro napětí na kondenzátoru  $C_{48V}$ .

Definice legendy:

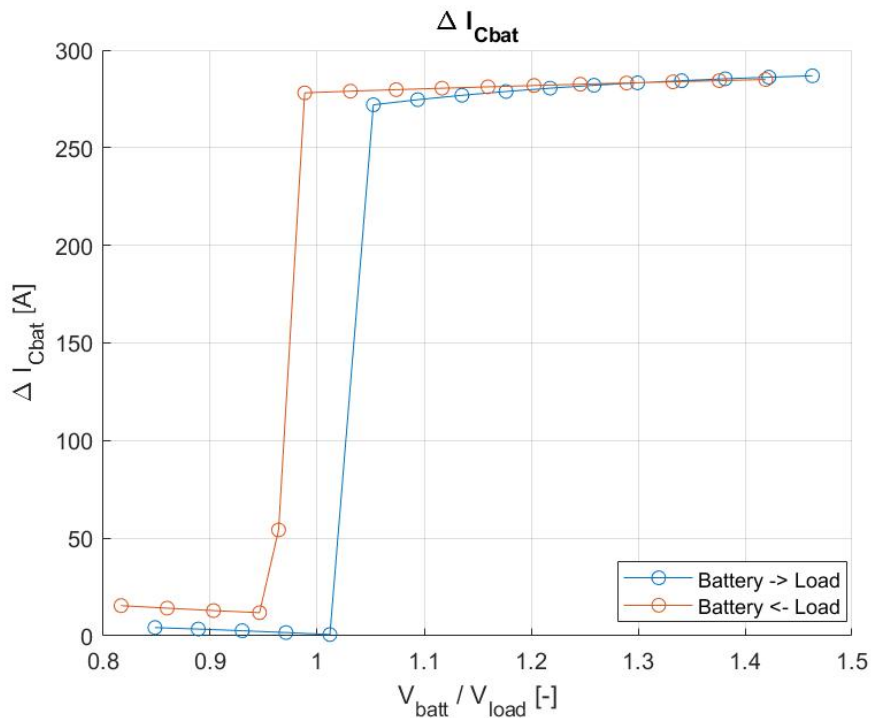
- Battery -> Load - tok výkonu je směrem do zátěže
- Battery <- Load - tok výkonu je směrem ze zátěže



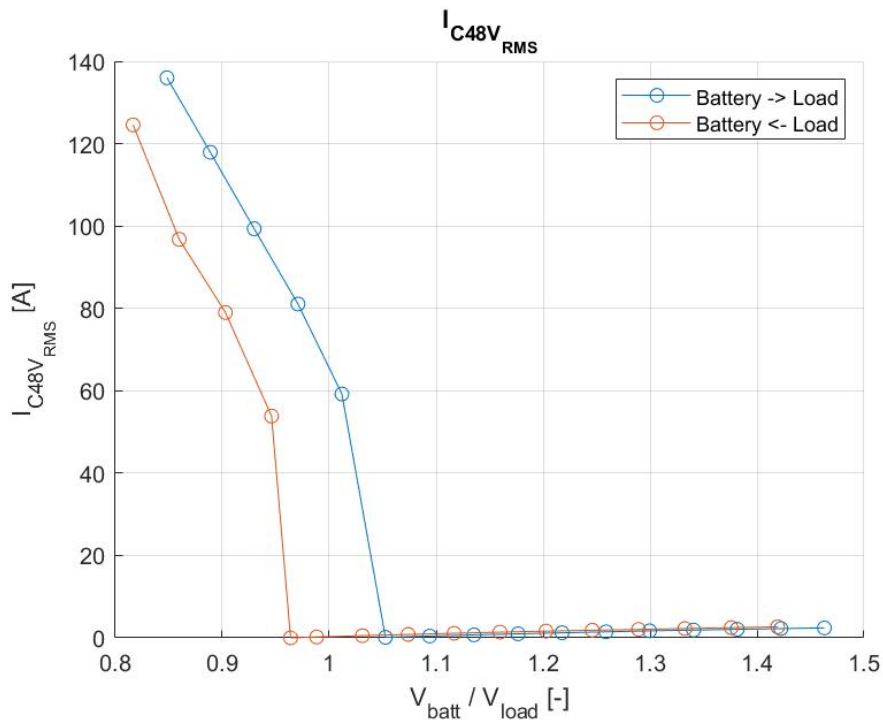
**Obrázek 6.60:** Graf se závislostí účinnosti na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



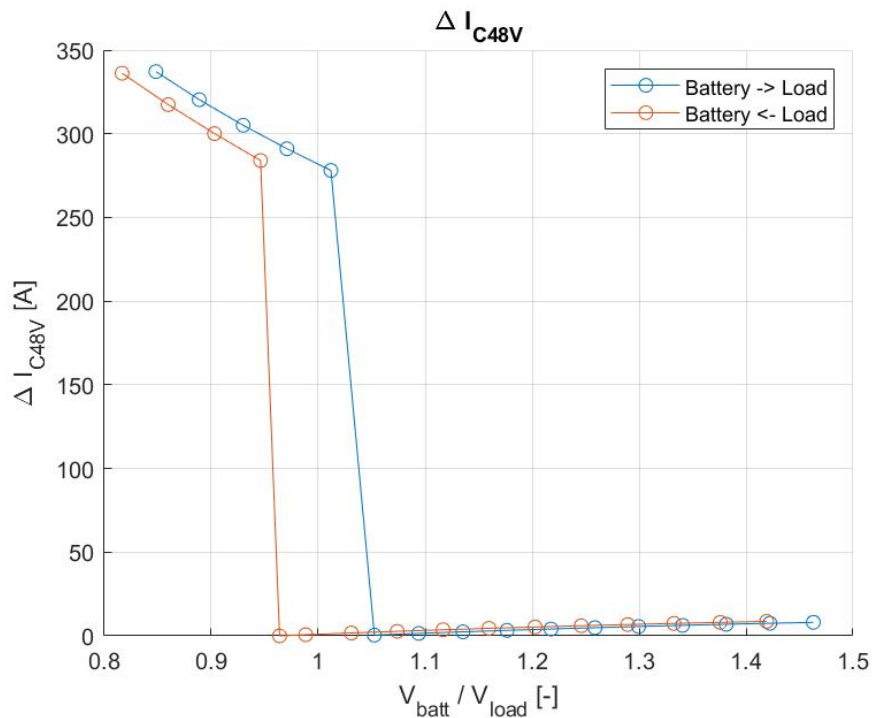
**Obrázek 6.61:** Závislost efektivní hodnoty proudu tekoucí kapacitorem  $C_{bat}$  na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



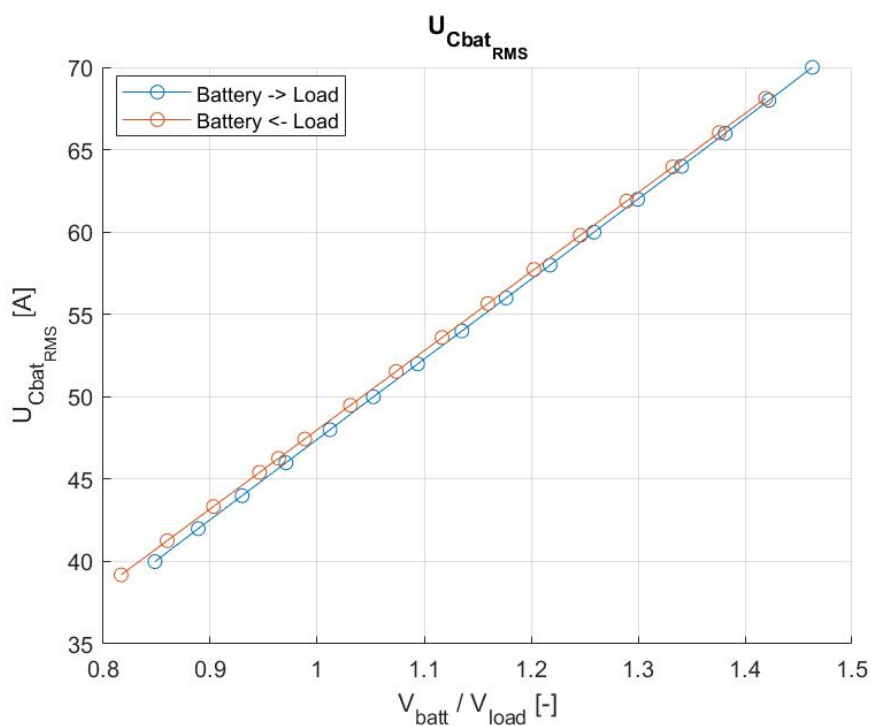
**Obrázek 6.62:** Závislost zvlnění proudu tekoucí kapacitorem  $C_{bat}$  na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



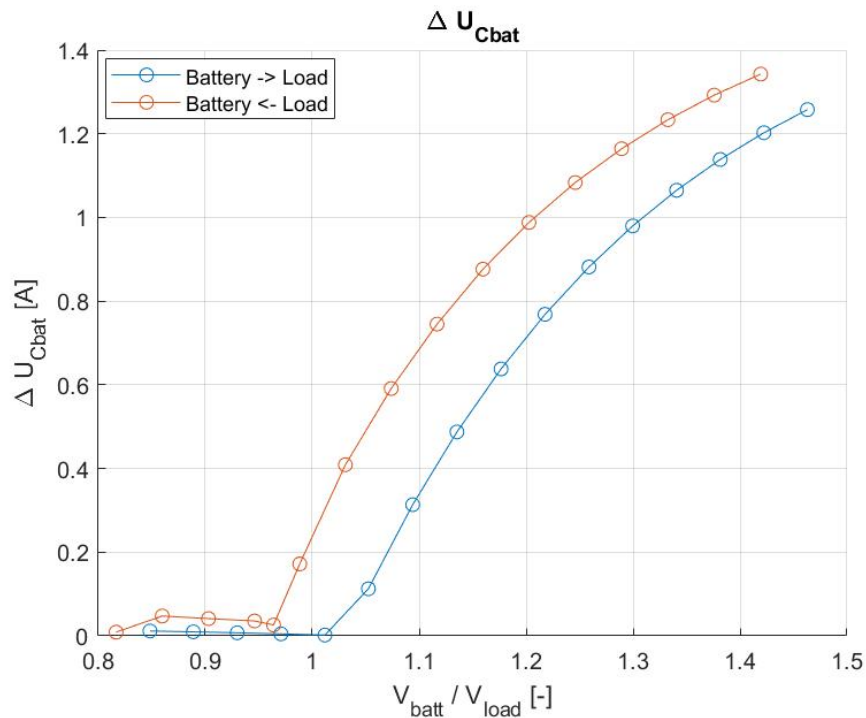
**Obrázek 6.63:** Závislost efektivní hodnoty proudu tekoucí kapacitorem C48V na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



**Obrázek 6.64:** Závislost zvlnění proudu tekoucí kapacitorem C48V na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.

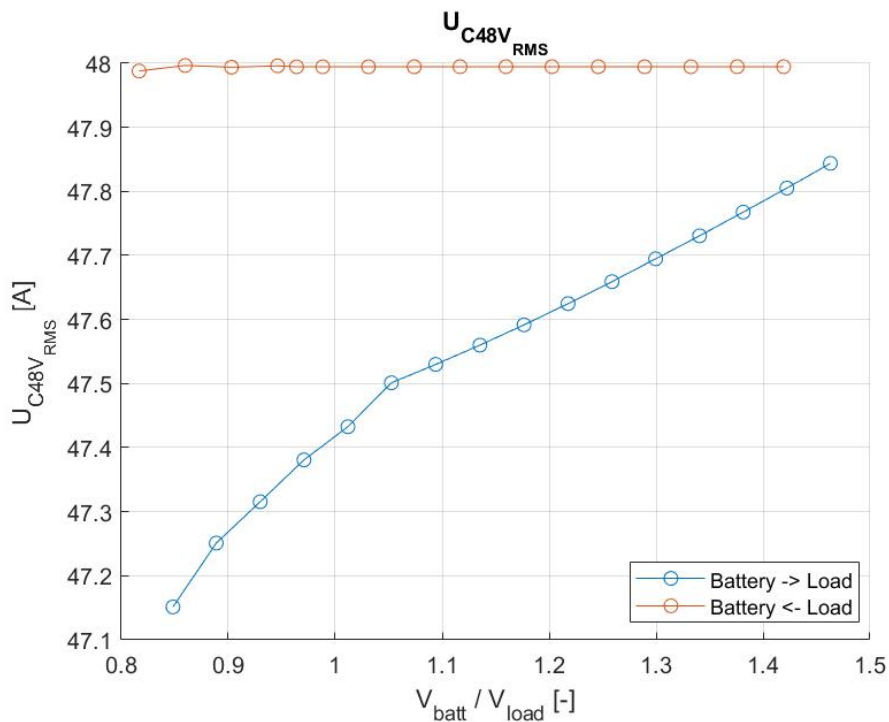


**Obrázek 6.65:** Závislost efektivní hodnoty napětí na kapacitoru Cbat na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.

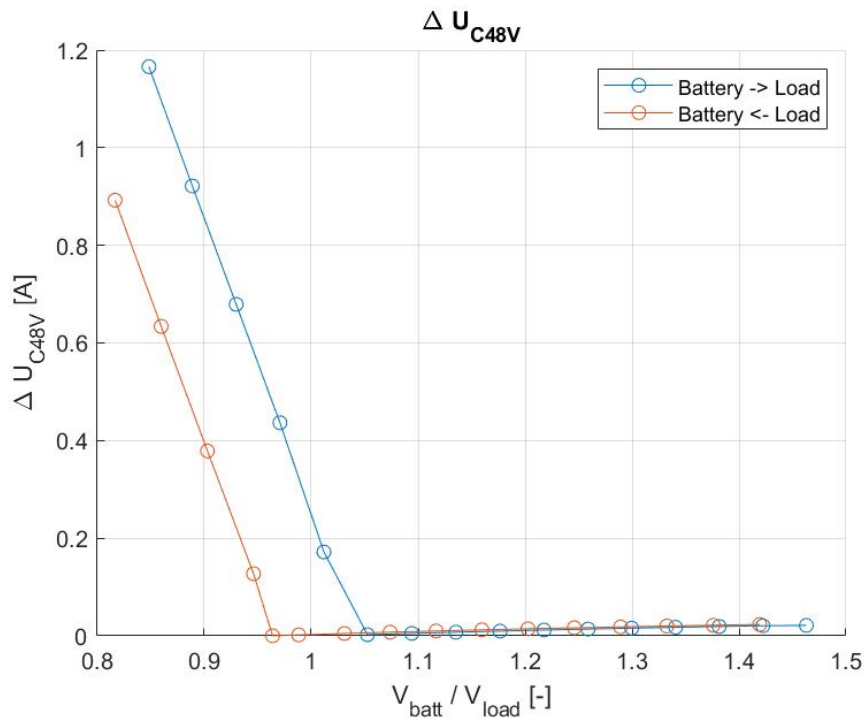


**Obrázek 6.66:** Závislost zvlnění napětí na kapacitoru Cbat na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.

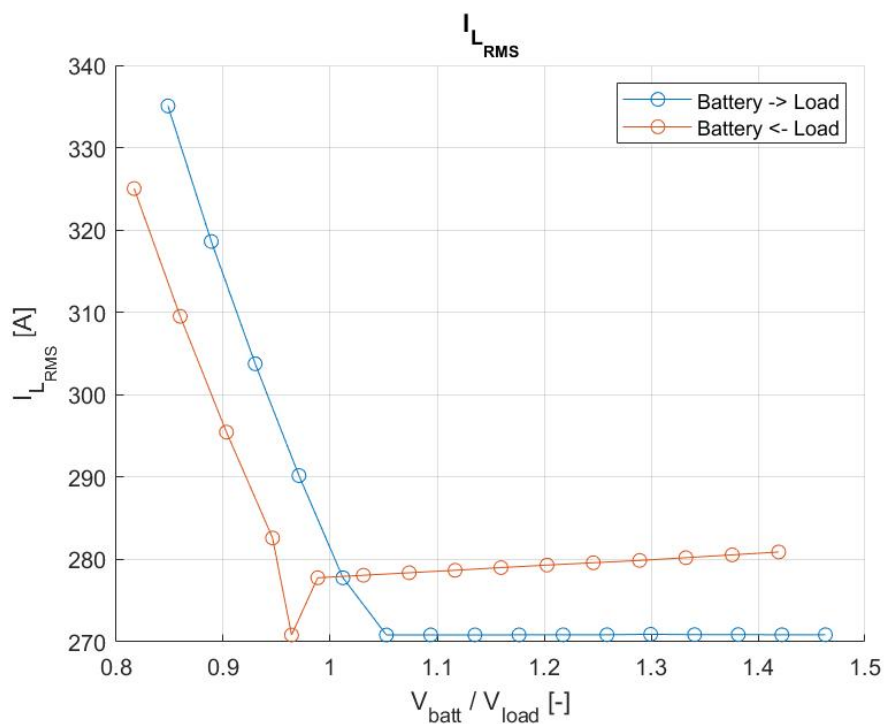




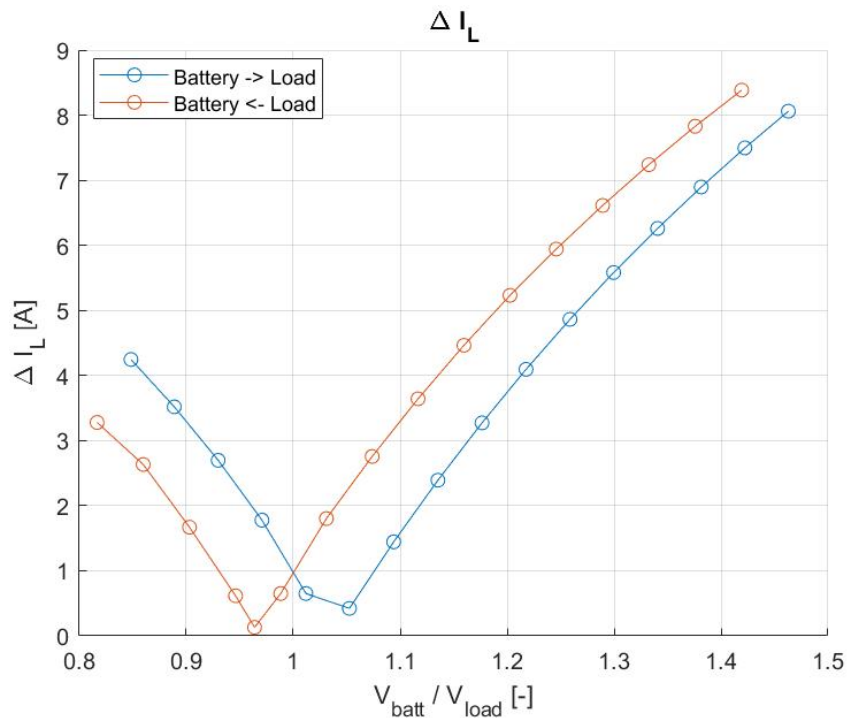
**Obrázek 6.67:** Závislost efektivní hodnoty napětí na kapacitoru C48V na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



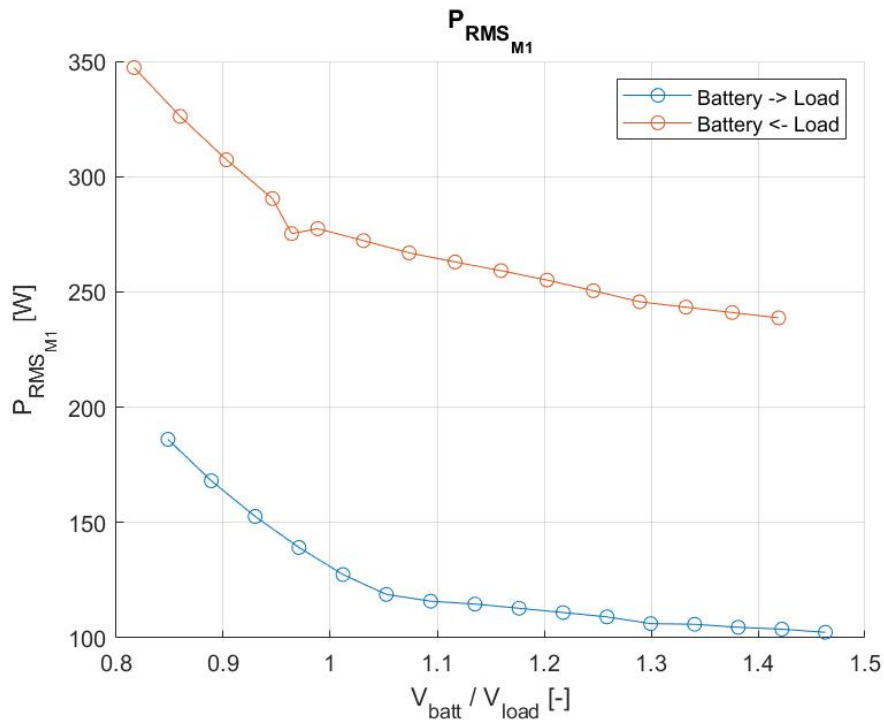
**Obrázek 6.68:** Závislost zvlhění napětí na kapacitoru C48V na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



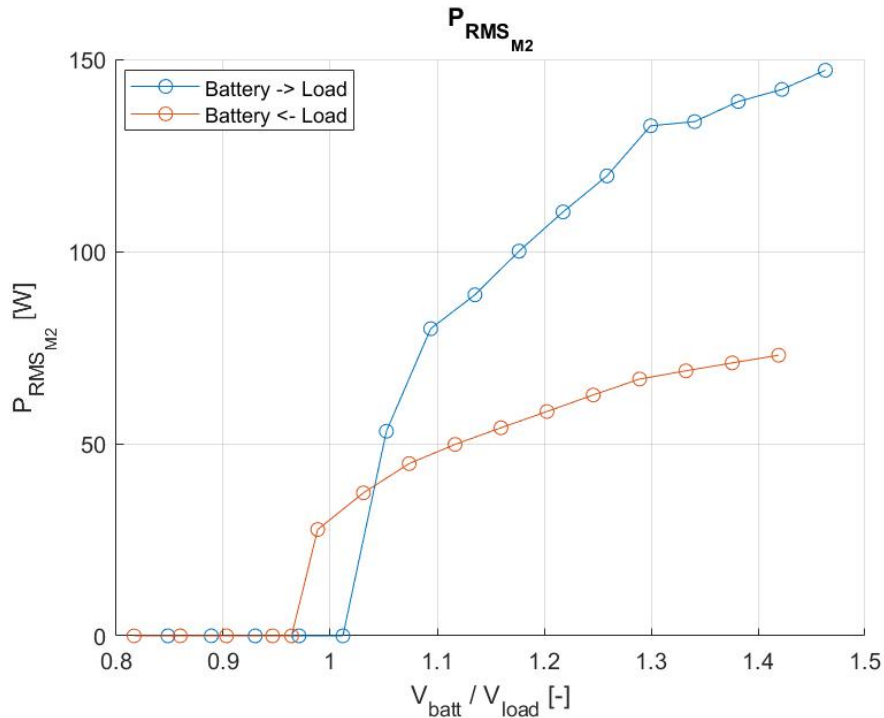
**Obrázek 6.69:** Závislost efektivní hodnoty proudu v induktoru L na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



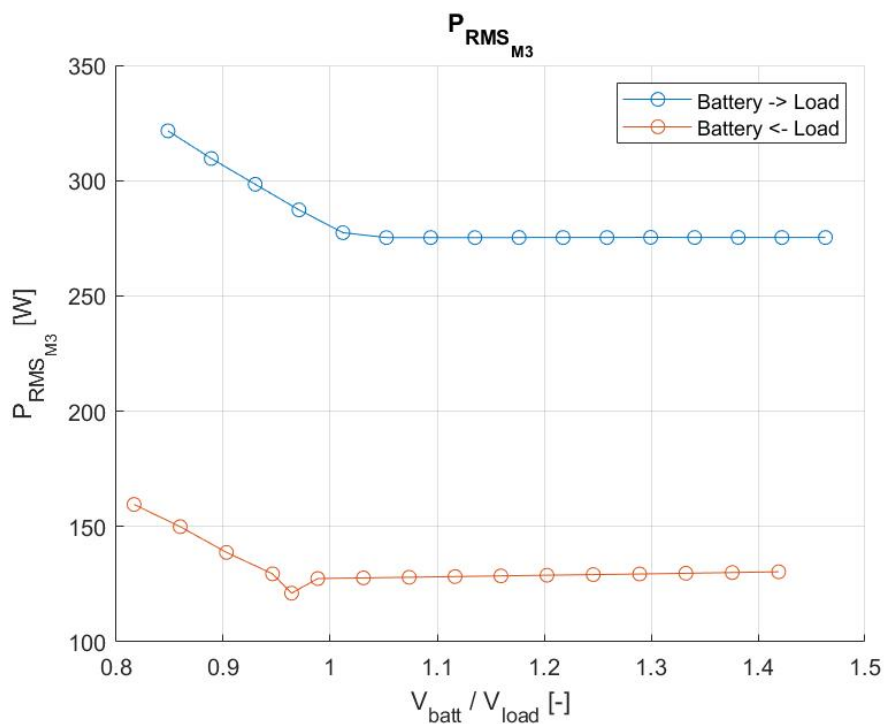
**Obrázek 6.70:** Závislost zvlnění proudu v induktoru L na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



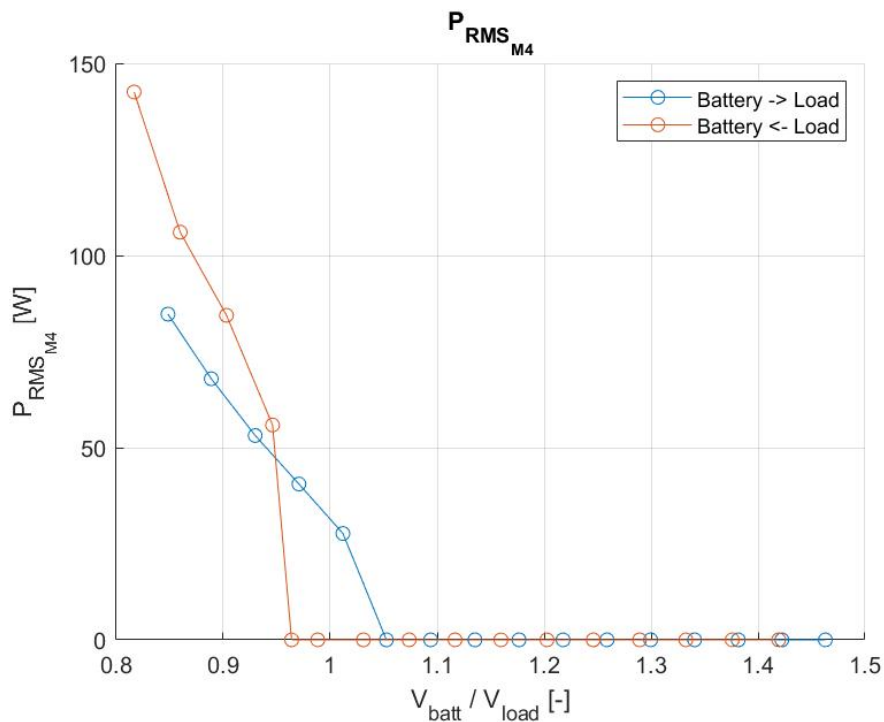
**Obrázek 6.71:** Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu tranzistoru M1 na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



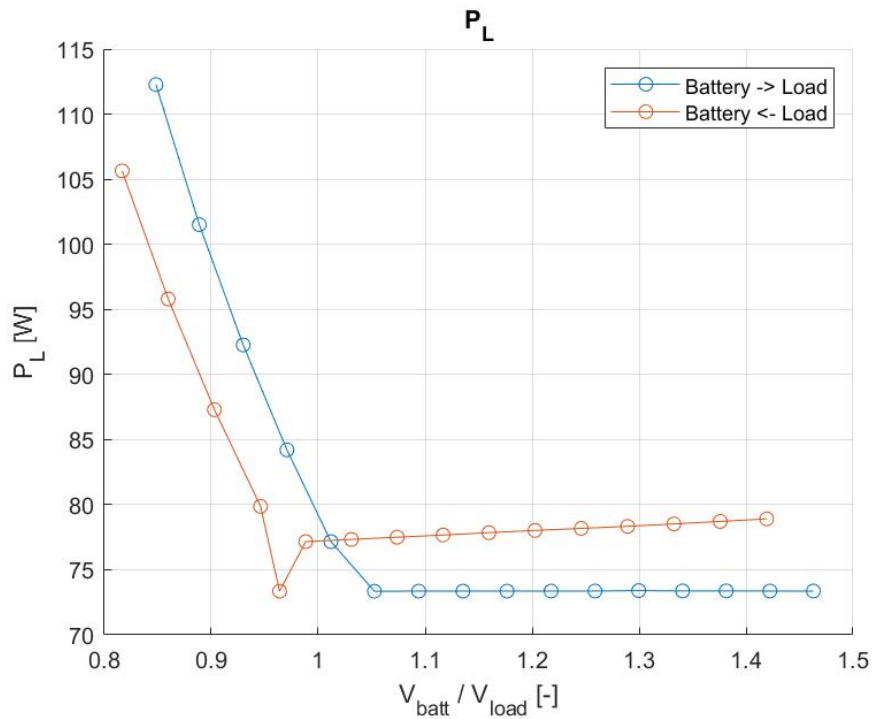
**Obrázek 6.72:** Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu tranzistoru M2 na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



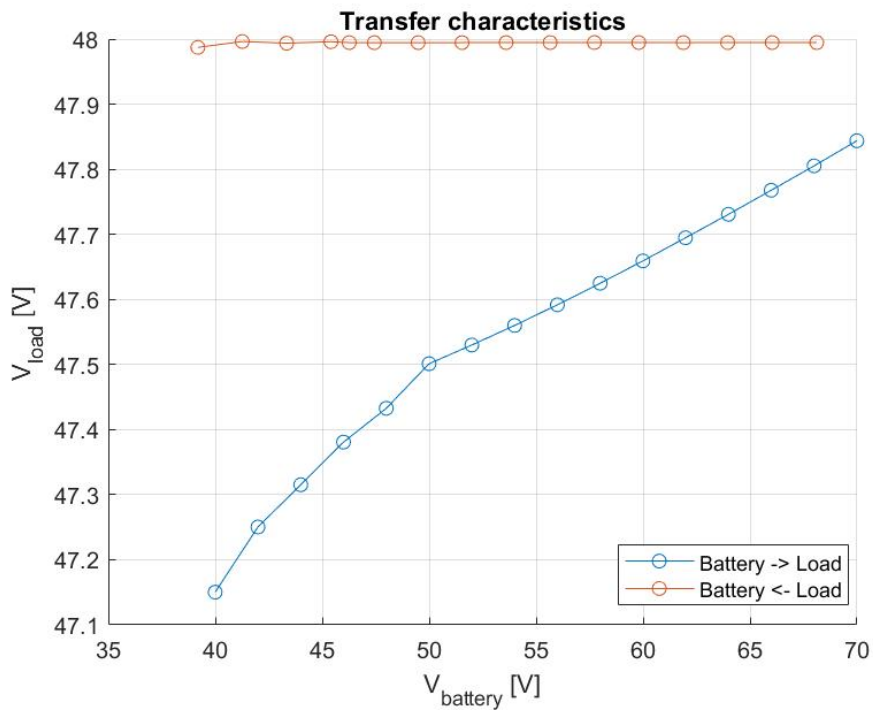
**Obrázek 6.73:** Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu tranzistoru M3 na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



**Obrázek 6.74:** Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu tranzistoru M4 na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



**Obrázek 6.75:** Závislost efektivní hodnoty ztrátového výkonu induktoru L na poměru napětí  $V_{bat}$  a  $V_{load}$  podle směru toku výkonu.



**Obrázek 6.76:** Převodní charakteristika pulzního stabilizátoru podle směru toku výkonu.