



Měřicí a řídicí systém pro testování akumulátorů

Popis funkčního vzorku, výstupu projektu Technologické agentury České republiky,
programu Centra kompetence, projektu TE01020020, Centrum kompetence automobilového
průmyslu Josefa Božka

Praha, 2.12.2015

Autor:

Ing. Jindřich Sadil, PhD., sadil@fd.cvut.cz, tel. +420 224359568

Doc. Ing. Martin Leso, PhD., leso@fd.cvut.cz, tel. +420 224359555



Obsah

1	Úvod.....	4
2	Definice	5
3	Základní údaje o výsledku.....	6
3.1	Typ výsledku	6
3.2	Anotace	6
3.3	Obor, klíčová slova.....	6
3.4	Umístění, fotografie, web	6
3.5	Technické a ekonomické parametry	7
3.6	Licence a poplatek	7
4	Podrobný popis výsledku	8
4.1	Koncepce systému	8
4.2	Omezení pracoviště	8
4.3	Přístrojové vybavení	9
4.3.1	Programovatelný zdroj A6kW.....	9
4.3.2	Programovatelná zátěž EL-9080-400.....	9
4.3.3	Programovatelný oběhový termostat F33-MA.....	9
4.3.4	16-bitová karta DAQ PCIe 6341	10
4.3.5	Použité senzory	10
4.3.6	Výkonová dioda	10
4.3.7	Bezpečnostní obvod	11
4.3.8	Řídicí PC	11
4.4	Použitý software	11
4.5	Parametry testování	12
4.6	Testovací schémata.....	13
4.6.1	Krátkodobé měření jednoho cyklu	13
4.6.2	Krátkodobé měření vnitřního odporu a napětí naprázdno.....	13
4.6.3	Dlouhodobé cyklické měření (měření opotřebení).....	15
4.6.4	Komplexní test	16
4.6.5	Zákaznický test.....	17
4.7	Vyhodnocení testů	17
4.7.1	Krátkodobé měření jednoho cyklu	17
4.7.2	Krátkodobé měření vnitřního odporu a napětí naprázdno.....	18



4.7.3	Dlouhodobé cyklické měření (měření opotřebení).....	25
4.7.4	Komplexní test	28
5	Závěr.....	29
6	Reference.....	30
6.1	Použité zdroje, odkazy.....	30
6.2	Seznam použitých zkratk	30
6.3	Seznam obrázků.....	30
6.4	Seznam tabulek.....	31



1 Úvod

Tento dokument vznikl v rámci řešení výzkumného projektu TE01020020 „Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka“ a zabývá se popisem funkčního vzorku Měřicího a řídicího systému pro testování akumulátorů. V rámci projektu se jedná o výsledek označovaný jako TE01020020V089, v rámci pracovního balíčku jako WP19V003. Aktivita spojené s výzkumem funkčního vzorku probíhaly v období od 1. 7. 2012 do 30. 11. 2015 a jsou podrobněji popsány v dílčích dokumentech [3] až [6].

Měřicí a řídicí systém pro testování akumulátorů je součástí automatizovaného pracoviště pro testování elektrických akumulátorů. Systém je schopen pořídit detailní záznam krátkodobého i dlouhodobého (cyklického) provozu elektrochemického akumulátoru nebo superkapacitoru. Je možné měřit až 6 článků zároveň. Měřením jsou získány hodnoty, časové průběhy a charakteristiky, které jsou při vybíjení resp. nabíjení elektrických akumulátorů podstatné. Výsledkem měření jsou rovněž parametry pro matematický model akumulátoru.



2 Definice

V tomto dokumentu jsou použity veličiny dle následující tabulky.

Tabulka 1: Definice veličin.

Označení	Jedn.	Název	Význam	Zdroj
C_n	Ah	Zaručená kapacita článku	Hodnota kapacity (náboje) článku určená za stanovených podmínek a deklarovaná výrobcem.	[1]
$U_{\max}$	V	Konečné nabíjecí napětí	Napětí dosažené na konci nabíjecí fáze při stanoveném konstantním proudu (maximální napětí akumulátoru).	[1]
$U_{\min}$	V	Konečné (vybíjecí) napětí	Stanovené napětí článku, při kterém se ukončuje vybíjení (minimální napětí akumulátoru).	[1]
U_n	V	Jmenovité napětí akumulátoru	Vhodná přibližná hodnota napětí používaná k označení nebo identifikaci článku.	[1]
U_{acc}	V	Svorkové napětí akumulátoru	Napětí, které lze naměřit na svorkách akumulátoru.	
I_d	A	Vybíjecí proud	Někdy se proud uvádí jako násobek kapacity akumulátoru (jednotka $\times CA^1$).	
I_{ch}	A	Nabíjecí proud	Někdy se proud uvádí jako násobek kapacity akumulátoru (jednotka $\times CA$).	
I_{ChEnd}	A	Konečný (minimální) nabíjecí proud	Proud, po jehož podkročení se v režimu zdroje CV (konstantní napětí) ukončuje nabíjení.	
I_{acc}	A	Proud akumulátoru	Proud tekoucí akumulátorem, kladná hodnota odpovídá vybíjení akumulátoru.	
DOD	%	Hloubka vybíjení	Poměr vybitého náboje během vybíjení k zaručené kapacitě.	
SOC	%	Stav nabití	Poměr náboje uloženého v akumulátoru k zaručené kapacitě.	
SOH	%	Stav zdraví	Poměr kapacity článku využitelné během vybíjení z plného nabití k zaručené kapacitě.	
ϑ_d	$^{\circ}\text{C}$	Vybíjecí teplota	Teplota během vybíjení na pouzdře akumulátoru.	
ϑ_{ch}	$^{\circ}\text{C}$	Nabíjecí teplota	Teplota během nabíjení na pouzdře akumulátoru.	
$NoCS$	-	Počet článků v sérii	Počet článků, které v sériovém řazení tvoří měřenou baterii.	

¹ Pokud je např. kapacita akumulátoru $C_n = 90$ Ah, proud $0,5 CA$ znamená proud rovný 45 A.



3 Základní údaje o výsledku

3.1 Typ výsledku

Měřicí a řídicí systém pro testování akumulátorů je výsledkem výzkumu a vývoje typu G, funkční vzorek.

3.2 Anotace

Měřicí a řídicí systém pro testování akumulátorů (dále v anotaci jen Systém) je součástí automatizovaného pracoviště pro testování elektrických akumulátorů. Systém je schopen pořídit detailní záznam krátkodobého provozu akumulátoru (1 cyklus vybití a nabití) i dlouhodobého provozu akumulátoru (v závislosti na parametrech cyklování stovky až tisíce cyklů), který je podstatný pro stanovení cyklové životnosti akumulátoru. Je možné měřit elektrochemické akumulátory a superkapacitory, principiálně lze měřit i palivové články. Je možné měřit zároveň sériovou kombinací až 6 článků. Měřením jsou získány hodnoty, časové průběhy a charakteristiky, které jsou při vybíjení resp. nabíjení elektrických akumulátorů podstatné. Výsledkem měření jsou rovněž parametry pro matematický model akumulátoru. Novost spočívá v programovatelnosti libovolných testovacích schémata a v automatizované kalibraci vlastního výpočetního modelu akumulátoru.

3.3 Obor, klíčová slova

Hlavní obor: JB – Senzory, čidla, měření a regulace.

Vedlejší obor: JE – Nejaderná energetika, spotřeba a užití energie.

Klíčová slova: Automatizace měření; Pořizování dat; DAQ; Baterie; Elektrický akumulátor; Stavový automat; Model; Kalibrace modelu

3.4 Umístění, fotografie, web

Umístění: Zkušební laboratoř Fakulty dopravní, Konviktská 20, 11000 Praha 1



Obr. 1: Fotografie funkčního vzorku měřicího a řídicího systému pro testování akumulátorů

Webový odkaz: <http://www.lss.fd.cvut.cz/Members/sadil/testovani-akumulatoru>



3.5 Technické a ekonomické parametry

Technické parametry:

- Rozměry pracoviště: 2 m x 1 m x 0,8 m (šířka x hloubka x výška);
- Počet přístrojů s cenou přesahující 100 000 Kč: 3;
- Měřené veličiny: napětí a proud baterie, jednotlivých článků, zdroje a zátěže, teplota pouzdra, teplota lázně, čas;
- Dopočtené veličiny: stav nabití; výkon a energie baterie, jednotlivých článků, zdroje a zátěže;
- Provozní parametry: nastavitelný rozsah proudů, napětí a teplot daný výrobcem;
- Výsledek využívá pouze příjemce pro výzkum.

Ekonomické parametry:

- Pořizovací cena přístrojů: cca 500 000 Kč.
- Odhad souvisejícího výzkumu: cca 3000 osobohodin
- Odhad úspory nákladů díky včasnému změření a volbě správné technologie
 - pro výrobce/prodejce baterií: v řádu desítek tisíc Kč až desítek milionů Kč
 - pro uživatele baterií: v řádu jednotek tisíc Kč až milionů Kč

3.6 Licence a poplatek

Licence: využití výsledku jiným subjektem je možné bez nabytí licence.

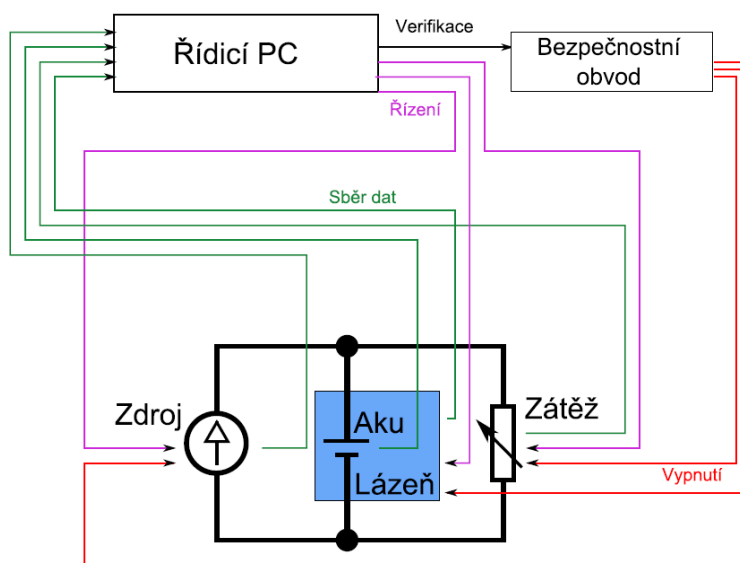
Poplatek: poskytovatel licence na výsledek nepožaduje licenční poplatek.



4 Podrobný popis výsledku

4.1 Koncepce systému

Měřicí a řídicí systém pro testování akumulátorů je součástí automatizovaného pracoviště pro testování elektrických akumulátorů. Principiální schéma měřicího a řídicího systému je uvedeno na Obr. 2. Celý proces řízení a měření je ovládán z řídicího počítače pomocí SW vyvinutého v prostředí LabVIEW. Počítač je pomocí sériové komunikace RS-232 spojen s přístroji, které ovládá a vyčítá z nich jimi naměřené hodnoty. V počítači je na sběrnici PCIE umístěna multifunkční karta DAQ. Do analogových vstupů v diferenciálním módu jsou přivedeny signály napětí měřených na jednotlivých člancích baterie a signál proudu snímaného pomocí čidla HT300M. Digitální vstupy karty slouží pro vyhodnocení teploty pouzdra baterie snímané pomocí teplotního čidla SMT160. Analogový výstup karty poskytuje signál pro bezpečnostní obvod. Pokud řídicí SW přestane pracovat, bezpečnostní obvod zajistí vypnutí přívodu napájení přístrojů pomocí odpadu stykače, čímž se měřená baterie uvede do stavu naprázdno.



Obr. 2: Principiální schéma měřicího a řídicího systému pro testování akumulátorů

4.2 Omezení pracoviště

Měřicí a řídicí systém charakterizují následující (omezující) parametry:

- Maximální počet článků, které v sériovém řazení tvoří měřenou baterii je 6.
- Maximální proud nabíjení je 300 A.
- Maximální proud vybíjení je 400 A.
- Maximální napětí nabíjení je 18,5 V.
- Minimální teplota lázně je -30 °C.
- Maximální teplota lázně je +150 °C.
- Maximální rozměr vzorku ponořeného v lázni je 15,5 x 14,5 x 17 cm (šířka x délka dna nádoby x hloubka ponořené části)



- Maximální rozměr vzorku při pokojové teplotě je 80 x 200 x 200 cm
- Minimální doba potřebná pro pořízení dat je 10 ms.
- Minimální doba potřebná pro změnu nastavení přístrojů je 100 až 500 ms.

4.3 Přístrojové vybavení

Měřicí a řídicí systém pro testování akumulátorů využívá přístrojů představených v této kapitole.

4.3.1 Programovatelný zdroj A6kW

Jako programovatelný zdroj je použit A6KW od německého výrobce PCE Powercontrol. Tento zdroj dává maximální napětí 20 V, maximální proud 300 A a jeho maximální výkon je 6000 W.



Obr. 3: Programovatelný zdroj A6KW, výrobce PCE Powercontrol.

4.3.2 Programovatelná zátěž EL-9080-400

Jako programovatelná zátěž je použita EL-9080-400 od německého výrobce Elektroautomatik. Tato elektronická zátěž dovoluje maximální vstupní napětí při zatížení 80 V, maximální vstupní proud při zatížení 400 A a maximální výkon 4800 W.



Obr. 4: Programovatelná zátěž EL-9080-400, výrobce Elektroautomatik.

4.3.3 Programovatelný oběhový termostat F33-MA

Programovatelný oběhový termostat německého výrobce Julabo umožňuje nastavit teplotu lázně v rozsahu od -30 °C do 200 °C, což výrazně převyšuje rozsah provozních teplot, jímž jsou akumulátory běžně vystaveny. Lázeň uvnitř oběhového termostatu má ovšem omezené rozměry, maximální rozměr vzorku ponořeného v temperační kapalině je 15,5 x 14,5 x 17 cm (šířka x délka dna nádoby x hloubka ponořené části). Jako temperační kapalina je použita podle aplikace jedna z možností:

- směs vody s etylenglykolem v poměru cca 30:70 (více glykolu) pro teplotní rozsah od -30 do +50 °C,
- temperační kapalina H5 dodaná výrobcem oběhového termostatu pro teplotní rozsah od -50 do +105 °C.



Obr. 5: Programovatelný oběhový termostat F33-MA, výrobce Julabo.

4.3.4 16-bitová karta DAQ PCIe 6341

Pro přímé měření veličin je použita 16-bitová měřicí karta DAQ PCIe-6341 od amerického výrobce National Instruments. Její analogové vstupy slouží k měření napětí a proudu akumulátoru a její digitální vstup k vyhodnocení měření teploty pomocí senzoru SMT 160. Tato karta dále na svém analogovém výstupu generuje signál pro bezpečnostní obvod.



Obr. 6: 16-bitová karta DAQ PCIe 6341, výrobce National Instruments.

4.3.5 Použité senzory

Měřicí systém používá následující senzory:

- HT300M: převodník proudu s Hallovou sondou, výrobce TELCON. Rozsah proudu převodníku je 400 A, napájecí napětí ± 15 V, pracovní teplota od -10 °C do $+85$ °C².
- SMT160: převodník teploty na střidu. Rozsah teplot převodníku je od -45 do $+130$ °C, je použito pouzdro TO220

4.3.6 Výkonová dioda

Z důvodu vnitřní konstrukce zdroje A6KW používaného pro nabíjení by byl při vypnutí zdroje akumulátor vybíjen a při připojení akumulátoru k vypnutému zdroji by docházelo k jiskření. Tento nežádoucí stav je možné eliminovat pomocí nastavení vyššího napětí zdroje než je napětí baterie, při tom však nelze nastavit proud menší než cca 100 mA. Problém byl nakonec vyřešen použitím výkonové diody zapojené mezi zdroj a akumulátor. Nevýhodou

² převodník je umístěn mimo lázeň, takže lze měřit akumulátory i při nižších teplotách



tohoto řešení je pouze nutnost nastavit zdroj na napětí vyšší než je požadované napětí akumulátoru a tím také zmenšení maximálního nabíjecího napětí o úbytek napětí na diodě maximálně cca 1,5 V.

4.3.7 Bezpečnostní obvod

Kontrolní bezpečnostní obvod vyhodnocuje obdélníkové napětí generované analogovým výstupem měřicí karty DAQ, čímž kontroluje správnou funkci řídicího počítače. Toto obdélníkové napětí je v bezpečnostním obvodu převedeno pomocí převodníku frekvence/napětí na stejnosměrné napětí, které je zpožděno RC členem a po zesílení přivedeno na cívku stykače, přes jehož silové kontakty jsou napájeny programovatelná zátěž a programovatelný zdroj. V případě, že dojde k přerušení programu spuštěného na řídicím počítači nebo poruše měřicí karty DAQ na dobu delší než cca 15 s, nebude po tuto dobu generováno obdélníkové napětí pro stykač a ten se rozpojí, čímž odpojí výkonové přístroje od zdroje napětí. Nastane tak bezpečný stav, kdy se testovaný akumulátor uvede do stavu naprázdno.

4.3.8 Řídicí PC

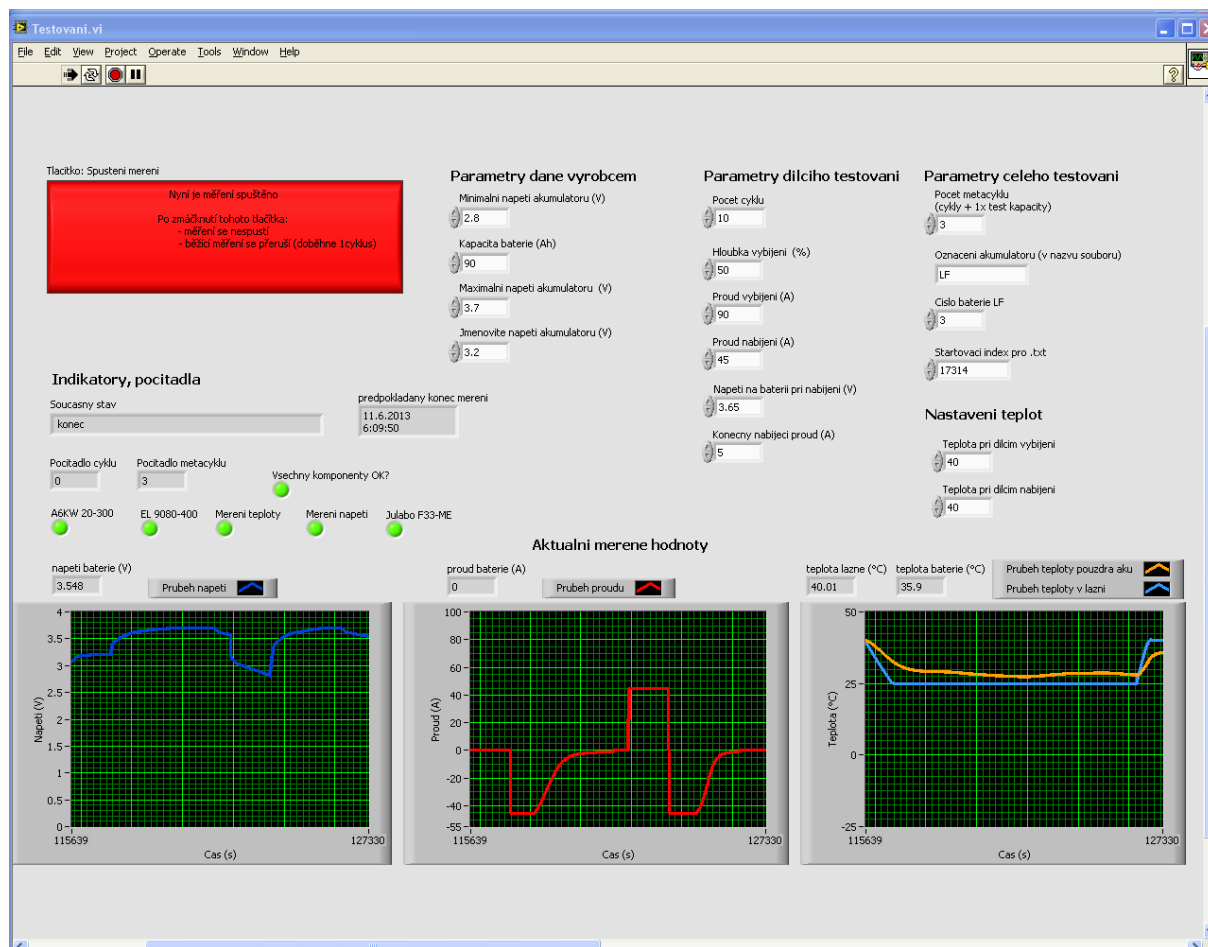
Jako řídicí počítač je použit PC s následujícími vlastnostmi:

- procesor Intel(R) Core(TM) i3-4130T CPU @ 2.9 GHz,
- nainstalovaná paměť: 8 GB RAM,
- 64-bitový operační systém Windows 7.

4.4 **Použitý software**

Celý proces řízení a měření je ovládán z řídicího počítače pomocí SW vyvinutého v prostředí LabVIEW v 64-bitové verzi 2013 SP1. Software pro řízení procesu měření je založen na struktuře stavového automatu (State Machine). Mezi hlavní funkce řídicího software patří:

- možnost zadání parametrů testování,
- ovládání přístrojů (zdroj, zátěž, oběhový termostat, multifunkční karta),
- vyčítání dat z přístrojů,
- zobrazení aktuálních měřených a vypočtených hodnot formou indikátorů a grafů,
- předzpracování pořízených dat a
- správa datových souborů.



Obr. 7: Ukázka grafického uživatelského rozhraní SW modulu cyklického testování.

4.5 Parametry testování

Nezávisle na konkrétním testovacím schématu lze definovat několik společných parametrů používaných pro řízení procesu měření:

Obecné parametry

- Vzorkovací perioda T_S [s] pro pořizování a ukládání dat.
- Maximální povolená teplota na pouzdře baterie ϑ_{Max} [°C].
- Jmenovitá (zaručená) kapacita akumulátoru C_n [Ah].
- Počet sériově řazených článků v baterii $NoCS$ [-].
- Označení akumulátoru v názvech datových souborů.

Parametry vybíjení

- Teplota při vybíjení ϑ_{Dis} [°C].
- Vybíjecí proud I_{Dis} [A].
- Minimální napětí akumulátoru U_{Min} [V].
- Hloubka vybíjení DOD [%].
- Časová prodleva po vybití TD_{Dis} [s].

Parametry nabíjení



- Teplota při nabíjení ϑ_{Ch} [°C].
- Nabíjecí proud I_{Ch} [A].
- Maximální napětí akumulátoru U_{Max} [V].
- Konečný (minimální) nabíjecí proud I_{ChEnd} [A].
- Časová prodleva po nabití TD_{Ch} [s].

Další parametry testování souvisejí s konkrétním testovacím schématem.

4.6 Testovací schémata

4.6.1 Krátkodobé měření jednoho cyklu

Provede se jeden cyklus vybití a nabití. Na začátku testu se předpokládá plně nabitá baterie. Režim vybití a nabíjení je specifikován prostřednictvím grafického uživatelského rozhraní programu pomocí parametrů testování uvedených v odstavci 4.5.

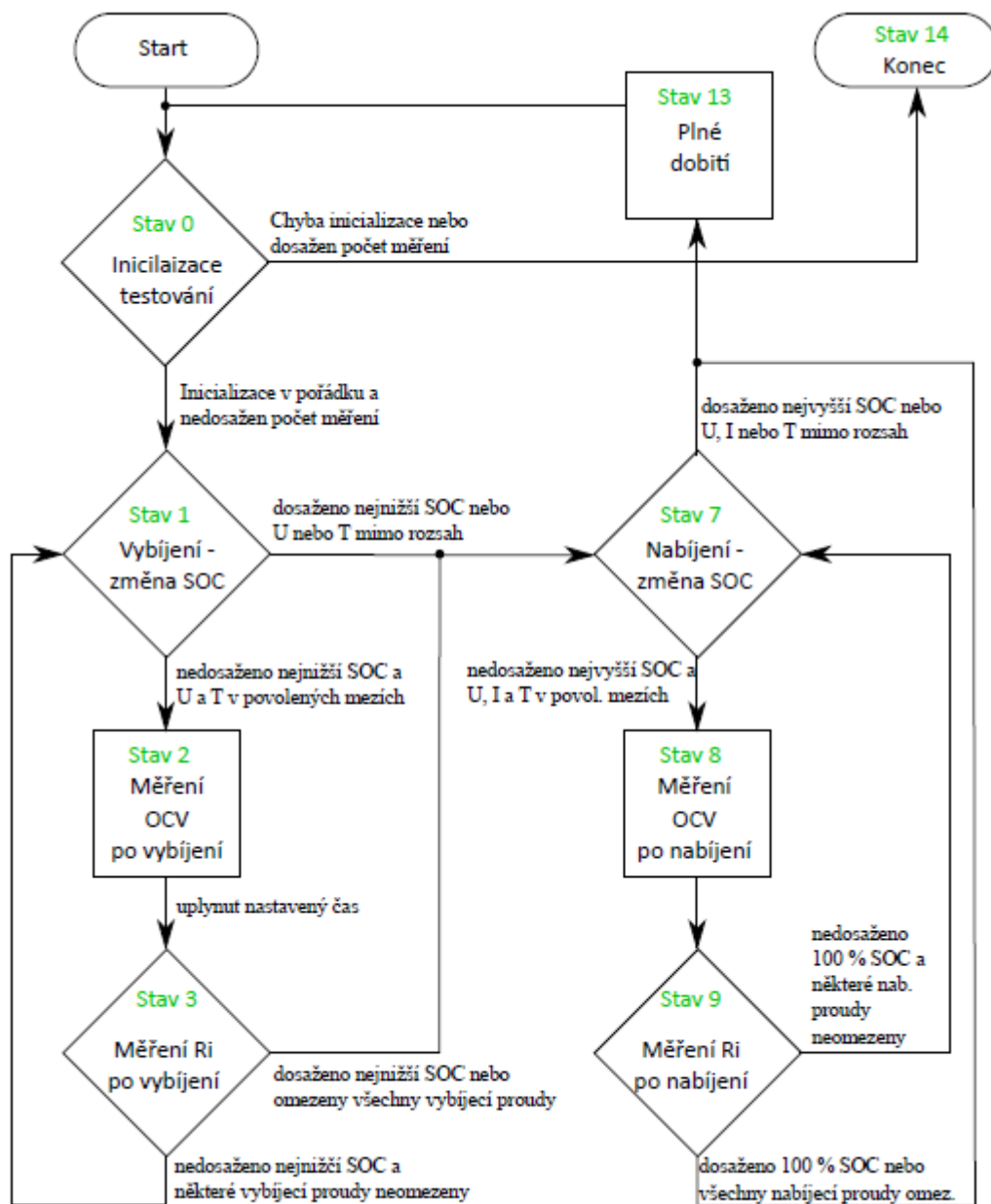
4.6.2 Krátkodobé měření vnitřního odporu a napětí naprázdno

Cílem tohoto krátkodobého měření je v čase maximálně jednotek dnů získat o akumulátoru informace o krátkodobém chování potřebném pro model akumulátoru.

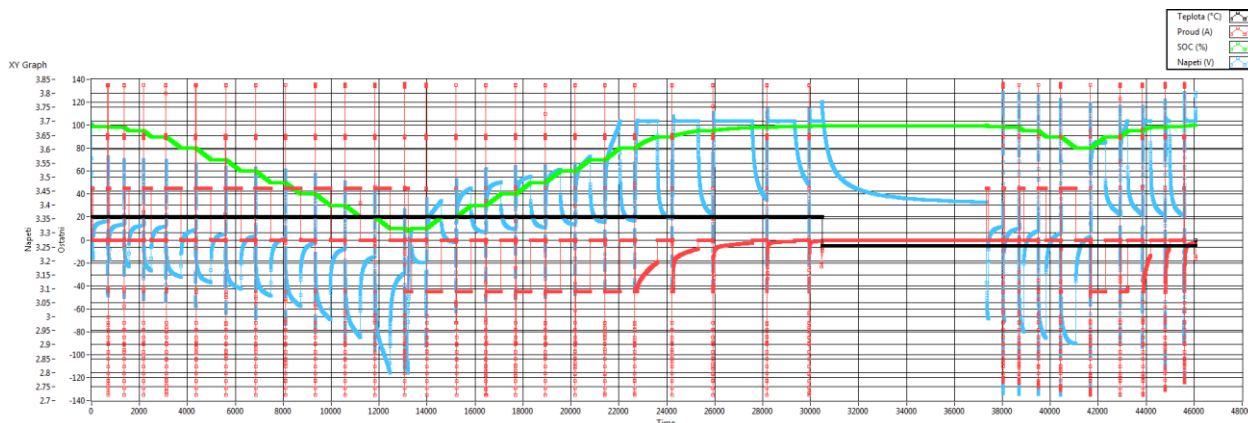
Pro zadané hodnoty teplot a stavů nabití se provádí:

- měření vnitřního odporu – baterie je vystavena zadanému průběhu proudů, jejichž trvání je krátké, aby byla minimálně ovlivněna aktuální hodnota stavu nabití. Zadané proudy mohou být kladné, záporné i nulové, hodnoty proudů se aplikují postupně, každá z nich trvá po dobu cca 2 sekundy.
- Měření napětí naprázdno – baterie je na definovanou dobu ve stavu naprázdno a je měřen průběh napětí. Doba stavu naprázdno bývá obvykle nastavena od 15 minut do 2 hodin.

Celé měření vnitřního odporu a napětí naprázdno zahrnuje také nastavení zadaných hodnot teplot a stavů nabití baterie. Celý proces krátkodobého měření vnitřního odporu a napětí naprázdno je detailně patrný ze schématu stavového automatu na Obr. 8. Obr. 9 je ukázkou průběhu nejdůležitějších měřených a dopočítaných veličin při krátkodobém měření vnitřního odporu a napětí naprázdno. Způsob vyhodnocení tohoto měření je uveden v odstavci 4.7.2.



Obr. 8: Schéma stavového automatu krátkodobého měření vnitřního odporu a napětí naprázdno.



Obr. 9: Ukázka průběhu nejdůležitějších veličin při krátkodobém měření vnitřního odporu a napětí naprázdno.

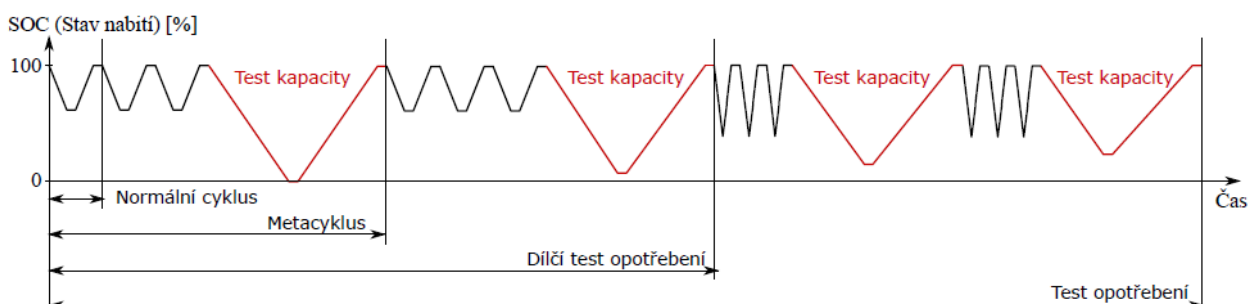
4.6.3 Dlouhodobé cyklické měření (měření opotřebení)

Cílem dlouhodobého cyklického měření je v čase jednotek týdnů stanovit opotřebení baterie, tj. postupné snižování stavu zdraví (SOH) baterie v závislosti na prováděných parametrech vybíjení a nabíjení uvedených v odstavci 4.5.

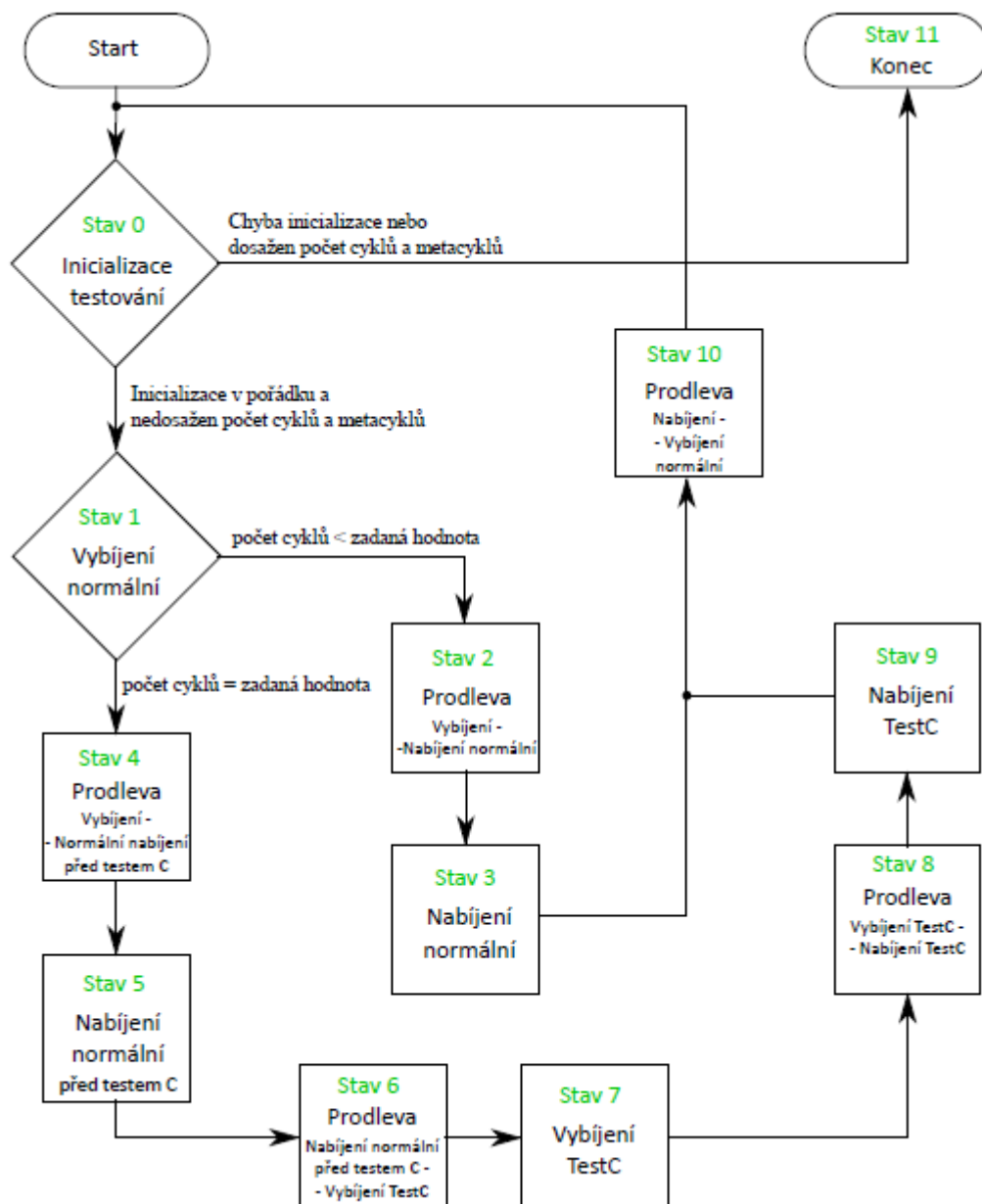
Celé měření opotřebení se skládá ze zadaného počtu *dílčích měření opotřebení*. Dílčí měření opotřebení se skládá ze zadaného počtu *metacyklů*. Metacyklus se skládá ze zadaného počtu *normálních cyklů* a jednoho *testu kapacity*. Význam uvedených názvů je patrný z Obr. 10.

Změna SOH se stanoví porovnáním vybitého náboje dvou následujících testů kapacity. Parametry vybíjení a nabíjení se pro jednotlivé dílčí testy opotřebení mění pouze u *normálních cyklů*, všechny *testy kapacity* mají parametry vybíjení a nabíjení shodné po celou dobu měření opotřebení.

Celý proces dlouhodobého cyklického měření je detailně patrný ze schématu stavového automatu na Obr. 11.



Obr. 10: Pojmenování jednotlivých částí měření opotřebení pomocí průběhu stavu nabití.



Obr. 11: Schéma stavového automatu dlouhodobého cyklického měření.

4.6.4 Komplexní test

Cílem komplexního testu je získat o akumulátoru informace o krátkodobém i dlouhodobém chování akumulátoru. Komplexní test spojuje předcházející testovací schémata do jediného testovacího schématu. Automatizovaně se postupně provádí:

- první měření vnitřního odporu a napětí naprázdno podle odstavce 4.6.2
- měření opotřebení podle odstavce 4.6.3
- druhé měření vnitřního odporu a napětí naprázdno podle odstavce 4.6.2
- vyhodnocení provedených měření podle odstavců 4.7.2 a 4.7.3.



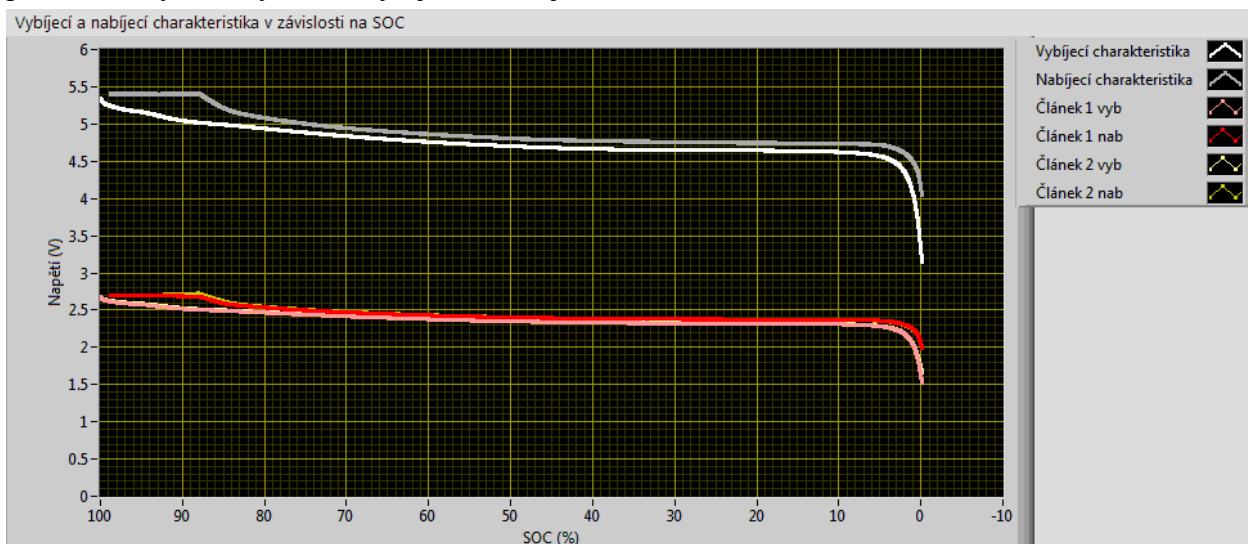
4.6.5 Zákaznický test

Díky modularitě používaného SW a univerzalitě používaných přístrojů lze v relativně krátkém čase vyvinout SW pro zabezpečení testovacího schématu podle přání zákazníka. Je však třeba respektovat omezení pracoviště uvedená v odstavci 4.2. Způsob vyhodnocení testu je individuální, z toho důvodu není uveden v odstavci 4.7.

4.7 Vyhodnocení testů

4.7.1 Krátkodobé měření jednoho cyklu

Výsledkem tohoto testu jsou průběhy měřených a vypočtených veličin, z nichž lze např. získat vybíjecí a nabíjecí charakteristiku baterie a jejích jednotlivých článků pro konkrétní parametricky zadaný režim vybíjení a nabíjení.



Obr. 12: Ukázka vybíjecí a nabíjecí charakteristiky pro baterii tvořenou 2 sériovými články technologie $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.

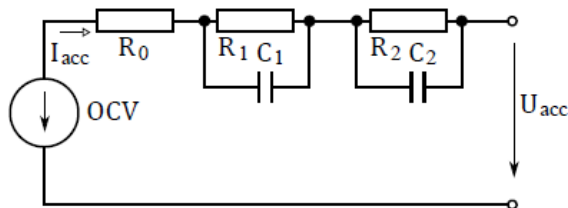
Dále lze pro daný měřený cyklus automatizovaně vyhodnotit pro celou baterii, jakož i pro její jednotlivé články charakteristické hodnoty dle následující tabulky.

**Tabulka 2: Ukázka výsledků krátkodobého měření jednoho cyklu pro článek technologie $\text{LiMn}_2\text{O}_4 + \text{LiNiO}_2$.**

Index	Název	Jednotka	Příklad hodnoty	Příklad hodnoty
0	Číslo cyklu	-	46	47
1	Test kapacity	1/0	0	1
2	Konečné vybíjecí napětí	V	3.03	3.031
3	Nastavená teplota vybíjení	°C	20	20
4	Průměrný vybíjecí proud	A	60.00	59.99
5	Náboj vybíjení	Ah	50.97	52.58
6	Energie vybíjení	Wh	192.68	198.80
7	Náboj vybíjení	%	86.79	89.55
8	Energie vybíjení	%	84.95	87.63
9	Napětí nabíjení	V	4.1	4.1
10	Nastavená teplota nabíjení	°C	20	20
11	Maximální nabíjecí proud	A	60.01	60.03
12	Průměrný nabíjecí proud	A	24.45	27.63
13	Konečný nabíjecí proud	A	0.49	0.99
14	Náboj nabíjení	Ah	52.64	52.39
15	Energie nabíjení	Wh	207.51	206.24
16	Náboj nabíjení	%	93.47	92.90
17	Energie nabíjení	%	87.73	87.31
18	Nábojová účinnost	%	96.83	100.36
19	Energetická účinnost	%	92.85	96.39
20	Průměrná měřená teplota pouzdra	°C	40.93	38.90
21	Průměrná měřená teplota nabíjení	°C	40.98	40.24
22	Průměrná měřená teplota vybíjení	°C	40.87	37.55
23	Konečná měřená teplota vybíjení	°C	43.08	40.71
24	Verze SW	-	5.6oD	5.6oD
25	Datum a čas	d.m.r h:m:s	17.7.2015 20:01	17.7.2015 22:58
26	Označení vzorku	-	LMNP1Cell1	LMNP1Cell1

4.7.2 Krátkodobé měření vnitřního odporu a napětí naprázdno

Výsledkem tohoto krátkodobého měření jsou závislosti parametrů náhradního obvodu akumulátoru uvedené níže v tabulce na stavu nabití a na teplotě. Náhradní obvod, který je použit pro model akumulátoru ukazuje následující obrázek. Zdroj napětí OCV je ideálním zdrojem napětí, vnitřní odpor akumulátoru je reprezentován pomocí rezistorů R_0 až R_2 . Speciálně rezistory R_1 a R_2 reprezentují polarizační odpor akumulátoru. Pomocí dvou RC členů přítomných v náhradním obvodu se reprezentují dvě různé rychlosti ustalování přechodných dějů, každý z RC členů má jinou časovou konstantu. Uvedený obvod používaný pro náhradní model akumulátoru je kompromisem mezi složitostí a věrohodností modelu.



Obr. 13: Náhradní obvod akumulátoru použitý pro model akumulátoru.

Tabulka 3: Vyhodnocované parametry náhradního obvodu při krátkodobém měření vnitřního odporu a napětí naprázdno.

Parametr náhradního obvodu	Popis
OCV	Napětí naprázdno
R_0	Odpor rezistoru R_0
R_1	Odpor rezistoru R_1
R_2	Odpor rezistoru R_2
C_1	Kapacita kapacitoru C_1
C_2	Kapacita kapacitoru C_2

Všechny uvedené parametry jsou ještě rozlišeny podle toho, zda platí pro vybíjení nebo pro nabíjení. Model následně rozlišuje hodnoty OCV pro vybíjení a pro nabíjení. Ostatní hodnoty, tj. odpory a kapacity náhradních prvků se průměrují a výsledná průměrná hodnota se použije jak pro vybíjení, tak pro nabíjení.

Parametry se stanovují na základě citlivostní analýzy. Výchozími hodnotami jsou jmenovité hodnoty napětí OCV, pro odpory rezistorů se pro lithium-iontové akumulátory o kapacitě cca 100 Ah použije výchozí hodnota 1 mΩ. Výchozí hodnoty kapacit jsou 10 kF a 1 MF.

Pro citlivostní analýzu se použijí měřené průběhy proudu a napětí popsané v odstavci 4.6.2. na Obr. 9., případně ještě další jednodušší průběh normálního cyklu podle odstavce 4.6.1. Na začátku cyklu se předpokládá stav nabití SOC = 100 %. Změřený průběh proudu se zadá jako vstup pro model akumulátoru, výstupem modelu použitým pro citlivostní analýzu je vypočítaný průběh napětí akumulátoru.

Pro jednotlivé teploty se v jednotlivých iteracích výpočtu pro různé stavy nabití postupně pro každý parametr zvlášť sleduje rozdíl modelem vypočteného průběhu napětí od skutečně změřeného průběhu napětí podle následujících vztahů:

$$RMSE_+ = \sum_{t=1}^n (U_{meast})^2 - (U_{modelt})^2 \quad (1)$$

kde je pro daný parametr použita hodnota $par + \Delta par$.

$$RMSE_- = \sum_{t=1}^n (U_{meast})^2 - (U_{modelt})^2 \quad (2)$$

kde je pro daný parametr použita hodnota $par - \Delta par$.

Pro další iteraci je použita hodnota parametru na základě podmínky:



Pokud je $\min(RMSE_+, RMSE_-, RMSE_i) = RMSE_+ : par_{i+1} = par_i + \Delta par$
 Pokud je $\min(RMSE_+, RMSE_-, RMSE_i) = RMSE_- : par_{i+1} = par_i - \Delta par$
 Pokud je $\min(RMSE_+, RMSE_-, RMSE_i) = RMSE : par_{i+1} = par_i$, kde
 index i je použit pro jednotlivé iterace. (3)

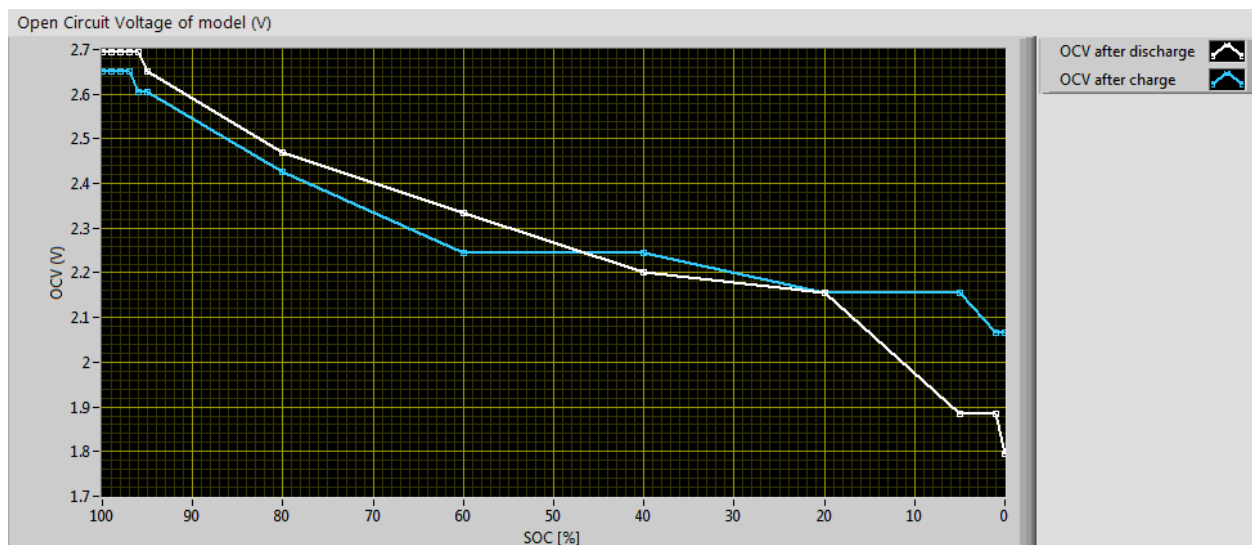
Příklad výsledných vyhodnocených parametrů pro akumulátor technologie $Li_4Ti_5O_{12}$ ukazují následující tabulky a obrázky. Každá tabulka platí pro daný akumulátor pro určitou teplotu, nezávislou proměnnou v tabulce je stav nabití SOC.

Tabulka 4: Výsledné parametry náhradního obvodu jako výsledek měření vnitřního odporu a napětí naprázdno pro teplotu 20 °C (interní výsledek č. 58).

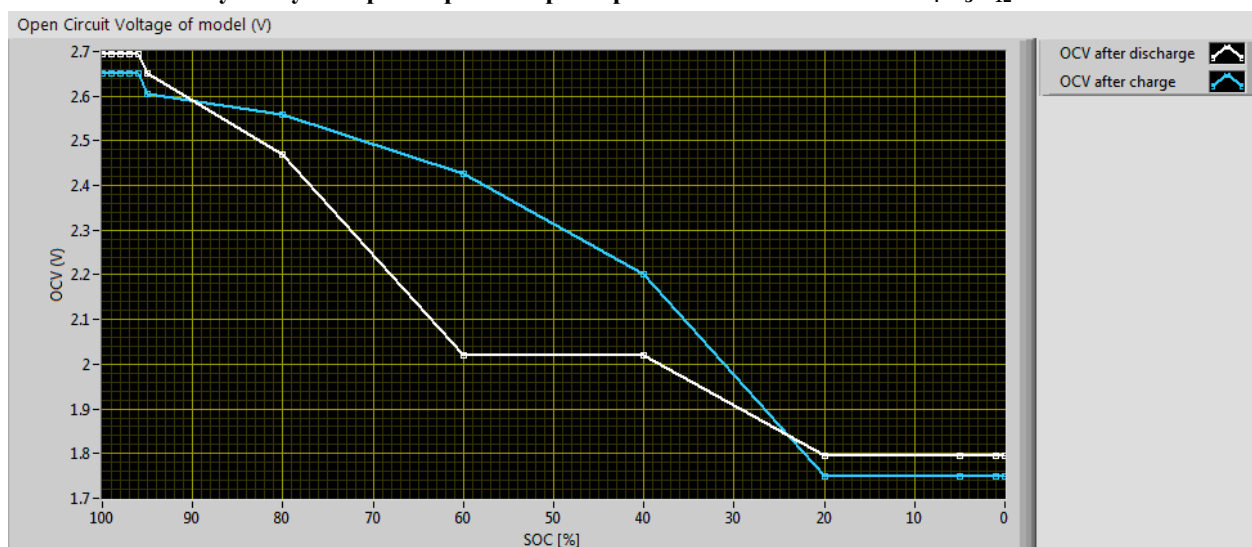
SOC [%]	0.0	1.0	5.0	20.0	40.0	60.0	80.0	95.0	96.0	97.0	98.0	99.0	100.0
OCVd [V]	1.795	1.885	1.885	2.155	2.200	2.335	2.470	2.650	2.695	2.695	2.695	2.695	2.695
R _{0d} [mΩ]	2.59	2.59	2.59	1.77	1.33	1.33	0.68	0.42	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
R _{1d} [mΩ]	2.59	2.59	2.59	1.10	1.33	0.51	0.39	0.42	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
R _{2d} [mΩ]	0.39	2.59	1.77	1.95	0.51	0.39	0.39	0.42	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
C _{1d} [kF]	0.2	0.4	0.2	1.3	0.9	0.9	576.7	384.4	113.9	576.7	576.7	576.7	576.7
C _{2d} [MF]	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.4	4.4	75.9	113.9	113.9	113.9	256.3	576.7
OCVc [V]	2.065	2.065	2.155	2.155	2.245	2.245	2.425	2.605	2.605	2.650	2.650	2.650	2.650
R _{0c} [mΩ]	2.59	2.59	2.14	1.95	1.46	2.14	0.83	1.33	2.59	1.95	1.46	0.83	2.59
R _{1c} [mΩ]	1.33	1.00	1.21	1.21	0.62	0.91	1.00	0.91	2.59	1.33	1.77	0.56	2.59
R _{2c} [mΩ]	0.39	2.14	0.47	1.95	0.47	0.39	0.39	0.42	2.59	0.39	0.39	0.39	2.59
C _{1c} [kF]	1975.0	878.0	390.0	585.0	1317.0	6667.0	173.0	390.0	173.0	173.0	2963.0	1317.0	50625.0
C _{2c} [MF]	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

Tabulka 5: Výsledné parametry náhradního obvodu jako výsledek měření vnitřního odporu a napětí naprázdno pro teplotu -5 °C.

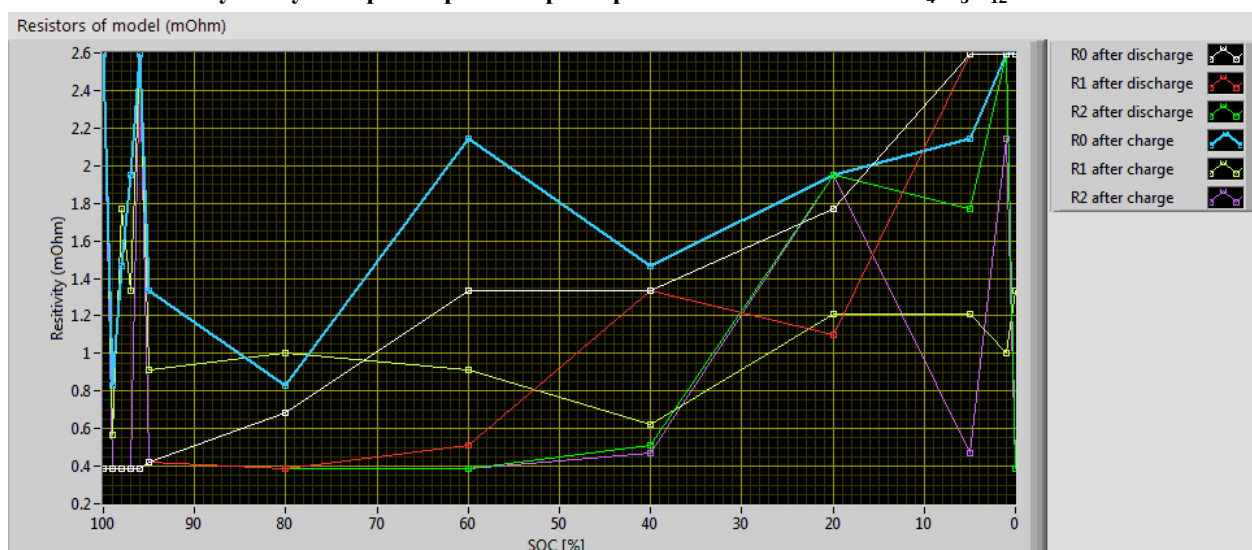
SOC [%]	0.0	1.0	5.0	20.0	40.0	60.0	80.0	95.0	96.0	97.0	98.0	99.0	100.0
OCVd [V]	1.795	1.795	1.795	1.795	2.020	2.020	2.470	2.650	2.695	2.695	2.695	2.695	2.695
R _{0d} [mΩ]	1.00	1.00	1.00	2.59	2.59	2.59	2.14	1.10	0.83	1.21	1.21	1.00	0.56
R _{1d} [mΩ]	1.00	1.00	1.00	2.59	2.59	2.14	1.77	1.33	0.83	0.83	1.21	0.68	1.10
R _{2d} [mΩ]	1.00	1.00	1.00	2.59	1.00	0.83	0.83	1.61	1.77	1.46	1.77	1.00	2.59
C _{1d} [kF]	10.0	10.0	10.0	0.2	0.2	0.4	4.4	384.4	22.5	22.5	256.3	113.9	170.9
C _{2d} [MF]	10.0	10.0	10.0	0.2	0.2	0.2	0.9	15.0	22.5	10.0	10.0	22.5	113.9
OCVc [V]	1.750	1.750	1.750	1.750	2.200	2.425	2.560	2.605	2.650	2.650	2.650	2.650	2.650
R _{0c} [mΩ]	1.00	1.00	1.00	1.00	2.59	2.59	2.59	1.95	2.59	2.59	2.14	2.14	2.59
R _{1c} [mΩ]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.46	2.59	2.59	2.36	2.59	2.14	2.59	2.59	2.59
R _{2c} [mΩ]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.21	0.83	0.83	1.61	2.59	1.46	1.77	2.14	2.59
C _{1c} [kF]	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	173.0	173.0	173.0	260.0	33750.0	878.0	878.0	878.0	33750.0
C _{2c} [MF]	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0



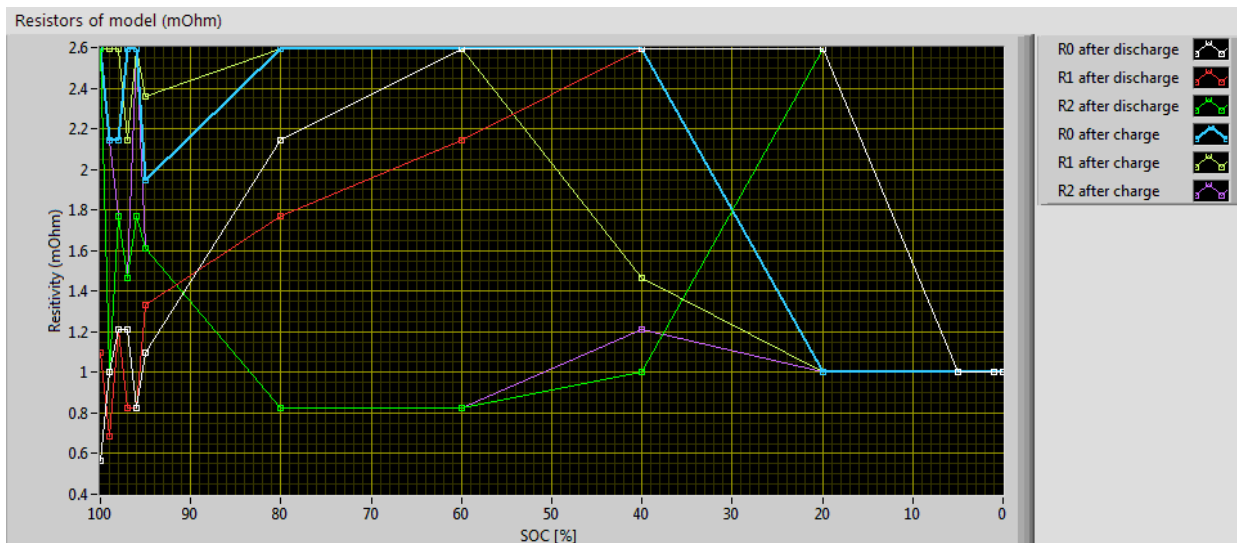
Obr. 14: Ukázka výsledných napětí naprázdno pro teplotu 20 °C akumulátoru $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.



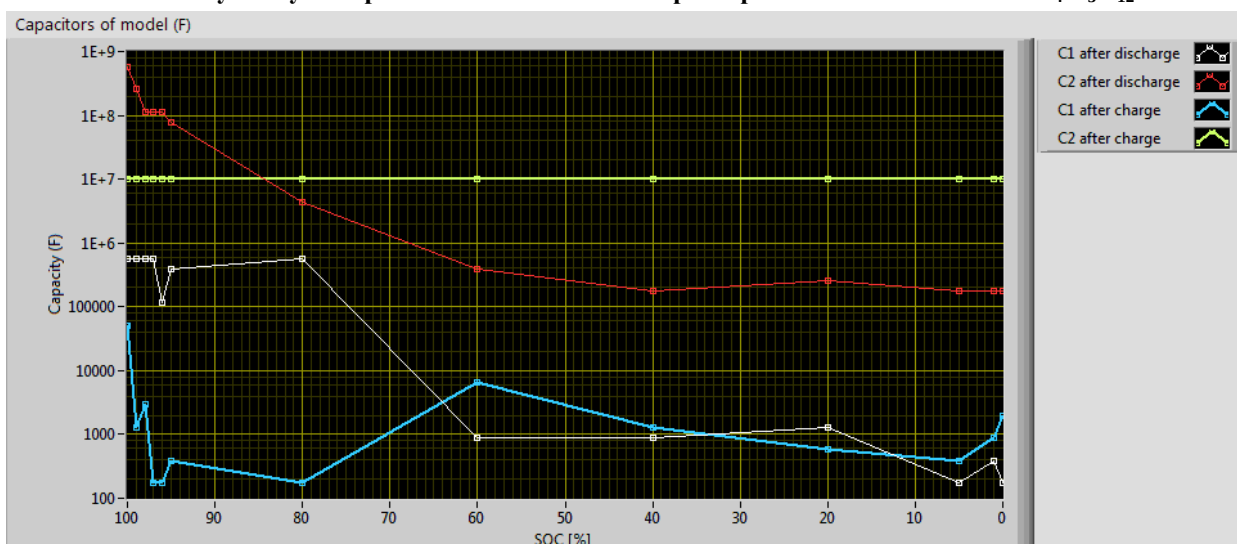
Obr. 15: Ukázka výsledných napětí naprázdno pro teplotu -5 °C akumulátoru $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.



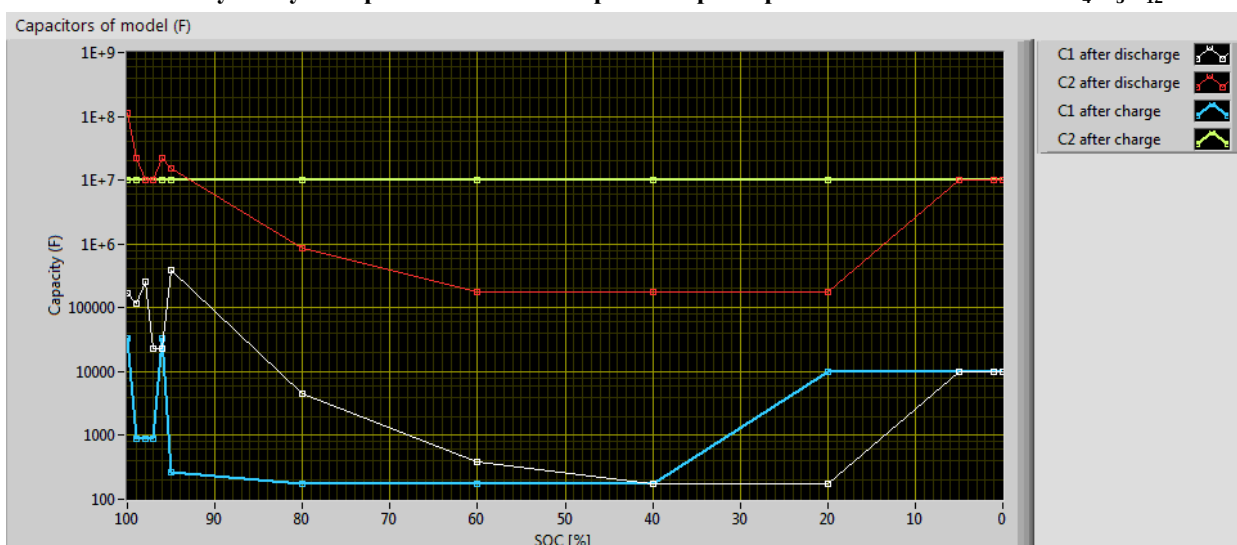
Obr. 16: Ukázka výsledných odporů náhradních rezistorů pro teplotu 20 °C akumulátoru $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.



Obr. 17: Ukázka výsledných odporů náhradních rezistorů pro teplotu -5 °C akumulátoru $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.



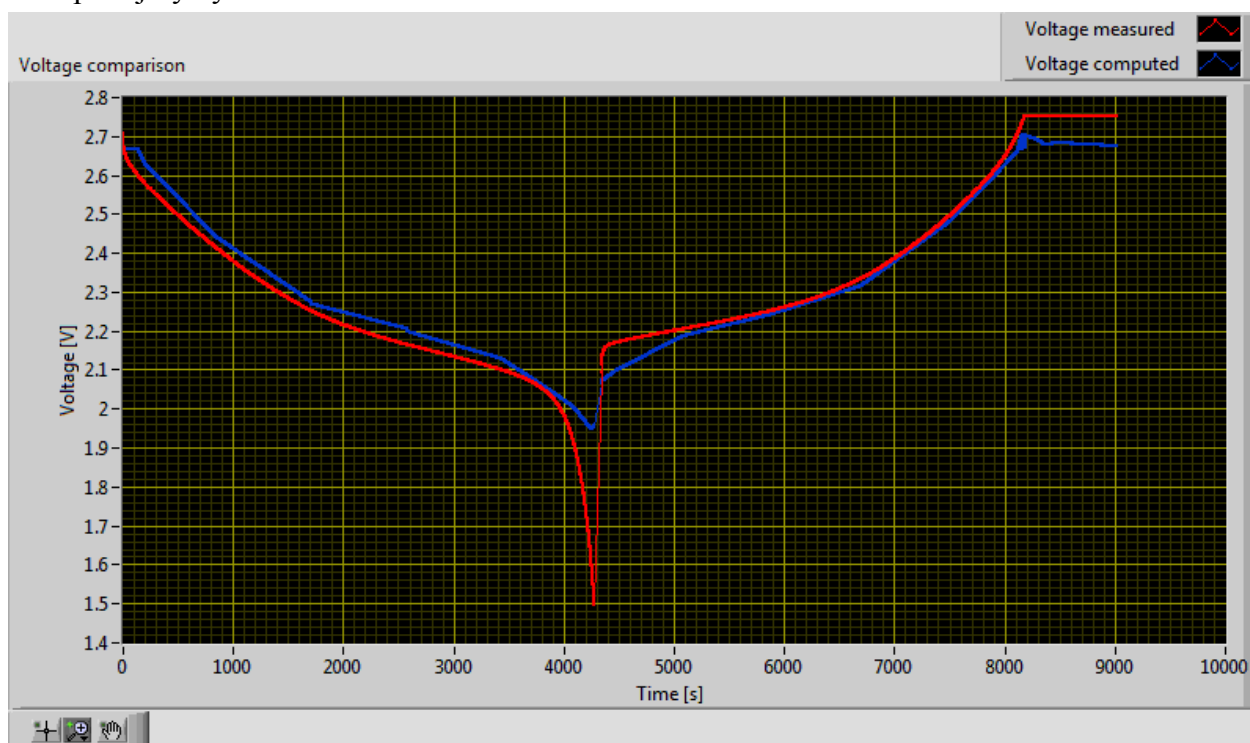
Obr. 18: Ukázka výsledných kapacit náhradních kapacitorů pro teplotu 20 °C akumulátoru $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.



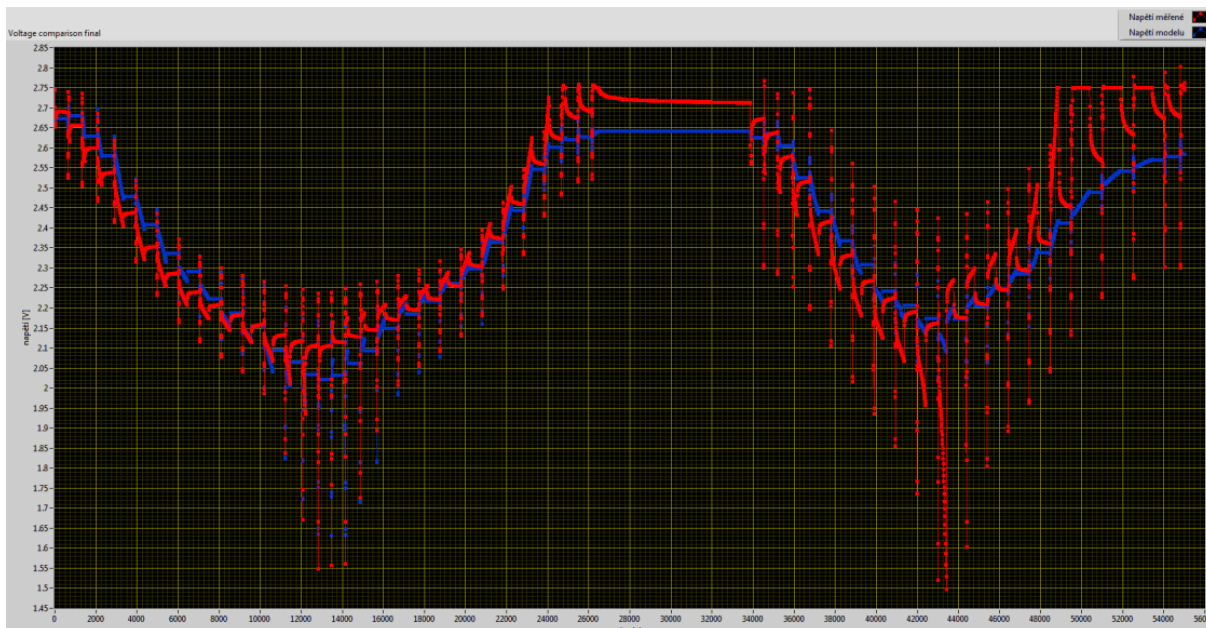
Obr. 19: Ukázka výsledných kapacit náhradních kapacitorů pro teplotu -5 °C akumulátoru $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.



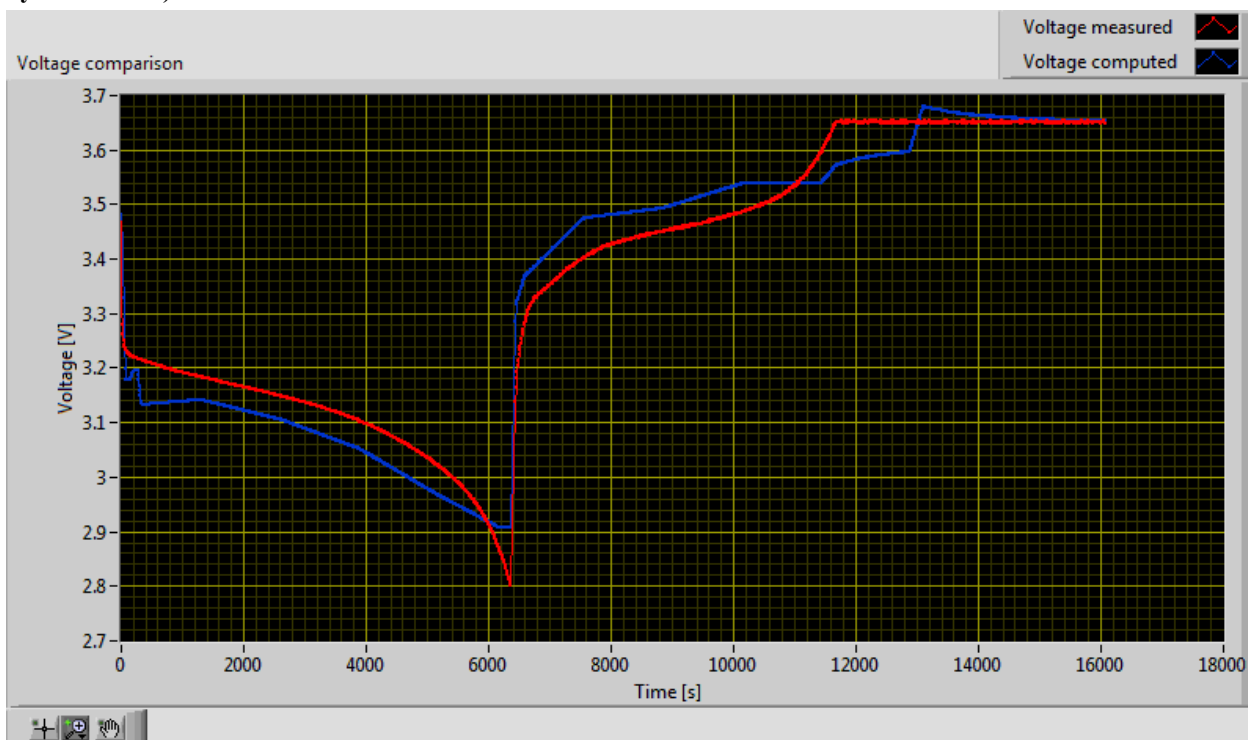
Následující obrázky ukazují porovnání průběhů měřeného napětí a napětí modelu na základě dříve popsaného postupu. Změřený průběh proudu se zadá jako vstup pro model akumulátoru, výstupem modelu použitým pro porovnání je vypočítaný průběh napětí akumulátoru. Uvedené porovnání je měřítkem kvality výsledků měření vnitřního odporu a napětí naprázdno. Chyba modelu oproti měření byla sledována na průběhu jednoho hlubokého cyklu a jednoho složitějšího cyklu se skokovými změnami proudu v různých stavech nabití (viz popis měření vnitřního odporu a napětí naprázdno v odstavci 4.6.2). Z provedených experimentů a výpočtů se ukazuje celková chyba RMSE pro sledované průběhy nižší než 100 mV, což lze považovat za uspokojivý výsledek.



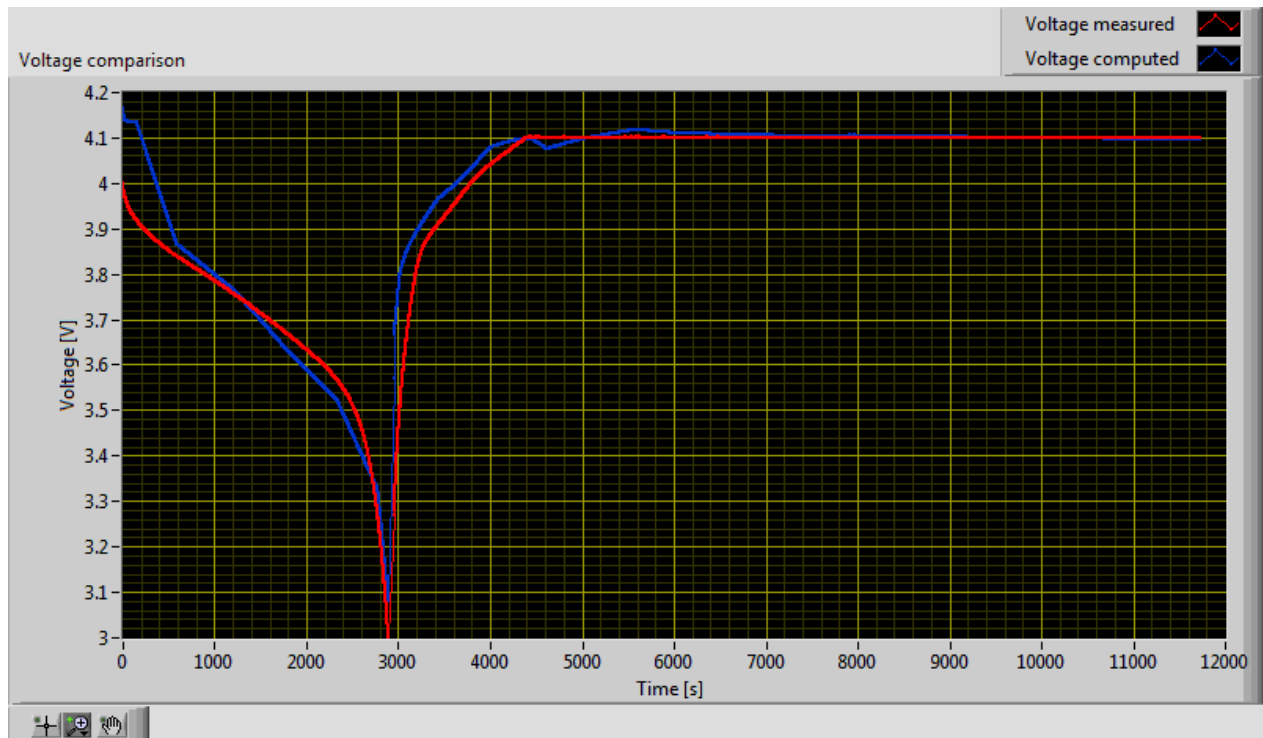
Obr. 20: Ukázka porovnání měřeného a modelovaného průběhu napětí jednoho hlubokého cyklu akumulátoru $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Parametry modelu odpovídají hodnotám uvedeným v této kapitole (interní výsledek č. 58).



Obr. 21: Ukázka porovnání měřeného a modelovaného průběhu napětí komplikovanějšího cyklu akumulátoru $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Parametry modelu odpovídají hodnotám uvedeným v této kapitole (interní výsledek č. 58).



Obr. 22: Ukázka porovnání měřeného a modelovaného průběhu napětí jednoho hlubokého cyklu akumulátoru LiFeYPO_4 (interní výsledek č. 16).



Obr. 23: Ukázka porovnání měřeného a modelovaného průběhu napětí jednoho hlubokého cyklu akumulátoru $\text{LiMnO}_2 + \text{LiNiO}_2$ (interní výsledek č. 44).

4.7.3 Dlouhodobé cyklické měření (měření opotřebení)

Výsledkem měření opotřebení je popis snižování stavu zdraví (SOH) baterie v závislosti na prováděných parametrech vybíjení a nabíjení uvedených v odstavci 4.5. platných pro jednotlivá prováděná *dílčí měření opotřebení*.

Po testu opotřebení se **vyhodnocují** a ve výsledném datovém souboru ukládají následující hodnoty charakterizující opotřebení:

- *opotřebení baterie* pro daný metacyklus

$$OP = \frac{\Delta SOH}{\sum_{i=1}^{pn} |\Delta SOCdis_i|} [-], \text{ kde} \quad (4)$$

$\Delta SOH = SOH_{\text{před metacyklem}} - SOH_{\text{po metacyklu}} [\%]$ je změna stavu zdraví během jednoho metacyklu. Shodná definice platí i pro dvě následující rovnice.

$\Delta SOCdis_i [\%]$ je změna stavu nabití během i -tého vybíjení normálního cyklu,

pn je počet normálních cyklů během jednoho metacyklu.

- *cena uložení energie* pro daný dílčí test opotřebení

$$CW = \frac{\Delta SOH \cdot (C_{New} - C_{Old})}{\sum_{i=1}^{pn} |\Delta Wdis_i| \cdot (SOH_{New} - SOH_{Old})} [\text{CZK/kWh}], \text{ kde} \quad (5)$$



ΔSOH [%] je změna stavu zdraví během jednoho metacyklu,

C_{New} [CZK] je cena za zakoupení nové baterie,

C_{Old} [CZK] je cena za odprodání staré baterie (pokud není odprodána, cena je nulová),

$\Delta Wdis_i$ [kWh] je celková vybitá energie i -tého normálního cyklu,

SOH_{New} [%] je stav zdraví nové (zakoupené) baterie³,

SOH_{Old} [%] je stav zdraví staré (odprodávané) baterie⁴,

pozn.: pokud je $\Delta SOH < 0$, ukládá se nulová hodnota ceny opotřebení.

- počet cyklů za život pro daný dílčí test opotřebení

$$NC = \frac{\Delta SOH}{(SOH_{New} - SOH_{Old})} \cdot pn \cdot pm [1], \text{ kde} \quad (6)$$

ΔSOH [%] je změna stavu zdraví během jednoho metacyklu,

SOH_{New} [%] je stav zdraví nové (zakoupené) baterie,

SOH_{Old} [%] je stav zdraví staré (odprodávané) baterie,

pn [1] je počet normálních cyklů během jednoho metacyklu,

pm [1] je počet metacyklů během jednoho dílčího testu opotřebení,

pozn.: pokud je $\Delta SOH < 0$, ukládá se nekonečná hodnota počtu cyklů za život.

Příklad vyhodnocených výsledků měření opotřebení ukazuje následující tabulka.

Tabulka 6: Ukázka vyhodnocení měření opotřebení pro akumulátor technologie $\text{LiMn}_2\text{O}_4 + \text{LiNiO}_2$.

Inab a Ivyb	DOD	U _{nab}	I _{end}	t _{vyb}	t _{nab}	OP 0-1	OP 1-2	OP 2-3	OP 0-3	Cena opotřebení	Počet cyklů za život
[xC]	[%]	[V]	[xC]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[Kč/kWh]	[-]
2.0	50	4.10	0.3077	20	20	0.00102	0.00122	0.00070	0.000981	5.62	1878
3.5	50	4.10	0.3077	20	20	0.00031	0.00068	-0.00096	0.000012	0.07	155172
1.0	50	4.10	0.3077	20	20	0.00055	0.00058	0.00040	0.000511	2.74	3612
2.0	80	4.10	0.3077	20	20	0.00064	0.00181	0.00157	0.001333	7.97	1142
2.0	10	4.10	0.3077	20	20	-0.00047	-0.00110	-0.00007	-0.000547	0.00	Inf
2.0	50	3.90	0.3077	20	20	0.00128	0.00034	0.00061	0.000744	4.64	4668
2.0	50	4.10	0.0154	20	20	-0.00088	-0.00393	0.00037	-0.001482	0.00	Inf
2.0	50	4.10	0.3077	0	0	0.00066	0.00089	0.00258	0.001416	8.55	1812
2.0	50	4.10	0.3077	40	40	-0.00064	0.00050	0.00059	0.000152	0.85	12097
2.0	50	4.10	0.3077	20	20	-0.00056	0.00039	0.00014	-0.000009	0.00	Inf

Model opotřebení akumulátoru, který je součástí výpočetního modelu akumulátoru, použije v každém výpočetním kroku vyhodnocenou hodnotu opotřebení baterie OP následovně:

- Načtou se všechny vyhodnocené hodnoty opotřebení.

³ Nově zakoupené baterie mají běžně cca o 10 procent větší kapacitu než jmenovitou.

⁴ Záleží na uživateli baterie, kdy se rozhodne baterii vyměnit. Zpravidla se dosazuje $SOH_{Old} = 80$ %. V případě čistě bateriového elektrického vozidla je stav zdraví SOH přímo úměrný dojezdu vozidla.



- Pro daný režim normálních cyklů daný pomocí parametrů vybíjení a nabíjení se stanoví průměrná hodnota opotřebení, přičemž se do průměru nezapočítává první metacyklus⁵.
- Pomocí mediánu se vyhledají výchozí parametry vybíjení a nabíjení *normálních cyklů*.
- Pro jednotlivé parametry se vyhledají řádky s hodnotami odlišnými od výchozí hodnoty, provede se jednorozměrná⁶ interpolace⁷ opotřebení pro skutečnou hodnotu příslušného *i*-tého parametru platného v aktuálním výpočetním kroku a stanoví se rozdíl opotřebení skutečné a výchozí hodnoty opotřebení podle vztahu

$$\Delta OP_{(pari)} = OP_{real(pari)} - OP_{default} [-] \quad (7)$$

- Předcházející bod se opakuje pro všechny parametry vybíjení a nabíjení, které mají na opotřebení vliv. Zpravidla je to vybíjecí a nabíjecí proud jako násobek jmenovité kapacity, hloubka vybíjení⁸ a teplota. Výsledné opotřebení pro daný výpočetní krok se určí jako

$$OP_{krok} = OP_{default} + \sum_{pari} \Delta OP_{(pari)} [-] \quad (8)$$

- Pro daný výpočetní krok se stanoví úbytek ΔSOH podle vztahu

$$\Delta SOH_{krok} = \frac{OP_{krok}}{2} \cdot |\Delta SOC_{krok}| [\%], \text{ kde} \quad (9)$$

$\Delta SOC_{krok} [\%]$ je změna stavu nabití v daném výpočetním kroku.

pozn.: výsledkem testu opotřebení je hodnota opotřebení vztažená na vybitý náboj. Vybíjení spolu s následným vybíjením tvoří cyklus. Model počítá vybíjení a nabíjení zvlášť v jednotlivých výpočetních krocích. To je důvodem dělení dvěma.

- Pro daný výpočetní krok se stanoví cena opotřebení podle vztahu

$$COP = \frac{\Delta SOH_{krok} \cdot (C_{New} - C_{Old})}{(SOH_{New} - SOH_{Old})} [CZK] \quad (10)$$

⁵ důvodem je určitá vysledovaná *setrvačnost* výsledků opotřebení. Např. pokud po náročném dílčím testu opotřebení následuje nenáročný dílčí test opotřebení, při prvním metacyklu nenáročného dílčího testu opotřebení se naměří ještě vysoké hodnoty ΔSOH , v dalších metacyklech jsou již hodnoty nižší a stálé. Poznámka platí analogicky i obráceně.

⁶ korektnější by bylo provádět vícerozměrné interpolace, to však není možné z důvodu nedostatku systémových zdrojů. Např. pro stanovení opotřebení pro pět nezávislých hodnot parametrů vybíjení a nabíjení a pouhé tři různé hodnoty jednotlivých parametrů by bylo nutné provést celkem 243 dílčích testů opotřebení. Takové měření by trvalo cca 2 roky a jeden vzorek akumulátoru by celé měření nemohl vydržet.

⁷ v případě že parametr leží mimo oblast vymezenou použitými hodnotami parametru během testu opotřebení, použije se extrapolace.

⁸ model akumulátoru určí hloubku vybíjení na začátku výpočtu pro celý zadaný průběh proudu nebo výkonu a s touto hloubkou následně počítá model opotřebení akumulátoru.



4.7.4 Komplexní test

Postupně se provádí vyhodnocení jednotlivých měření vnitřního odporu a napětí naprázdno popsané v odstavci 4.7.2 a vyhodnocení měření opotřebení popsané v odstavci 4.7.3.



5 Závěr

Funkční vzorek měřicího a řídicího systému pro testování akumulátorů byl vytvořen. Systém je schopen pořídit detailní záznam krátkodobého i dlouhodobého (cyklického) provozu elektrochemického akumulátoru nebo superkapacitoru. Měřením jsou získány hodnoty a charakteristiky, které jsou při vybíjení resp. nabíjení elektrických akumulátorů podstatné. Vyhodnocením měření jsou také parametry pro matematický model akumulátoru.

Funkční vzorek má vysokou užitnou hodnotu pro praxi. Výrobce akumulátoru, dodavatel nebo jeho uživatel mohou na několika málo vzorcích článků během relativně krátké doby odhadnout, jak se bude daný akumulátor chovat v provozu a ekonomicky zhodnotit jeho použitelnost pro očekávanou aplikaci.

Dosavadní model elektrochemických akumulátorů byl upraven na novou verzi 1.6 v návaznosti na výsledky měření funkčního vzorku měřicího a řídicího systému pro testování akumulátorů. Model pracuje na vstupu s vyhodnocenými výsledky měření provedených měřicím a řídicím systémem podle vybraných testovacích schémat.

Výsledky modelu odpovídají dobře skutečným měřeným hodnotám, ačkoliv náhradní model akumulátoru není příliš složitý (viz Obr. 13). Celková chyba *RMSE* porovnaného průběhu měřeného a modelovaného napětí se pohybuje pod 100 mV pro všechny tři testované technologie lithium iontových akumulátorů⁹, a to jak pro jednoduché cykly, tak i pro cykly komplikované.

⁹ LiFeYPO₄, LiMn₂O₄ + LiNiO₂ a Li₄Ti₅O₁₂



6 Reference

6.1 Použité zdroje, odkazy

- [1] ČSN IEC 60050-482. *Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 482: Primární a akumulátorové články a baterie*. Český normalizační institut, 2005.
- [2] Antoň J.: *Komplexní testování trakčních lithium iontových akumulátorů*. Diplomová práce, ČVUT FD, 2015
- [3] Sadil J.: *Spotřeba bateriových elektrických vozidel*. Popis SW verze 1.0, dostupný z <http://www.lss.fd.cvut.cz/Members/sadil/spotreba-bateriovych-elektrickych-vozidel> (10. 12. 2014)
- [4] Sadil J.: *Stanovení kritérií pro posouzení stavu napájecí baterie*. Výzkumná zpráva k projektu TA ČR TE01020020, 16. 1. 2014.
- [5] Sadil J.: *Ověřování doplňkových dat o účinnosti nabíjení elektrochemických akumulátorů LiFe(Y)PO_4* . Výzkumná zpráva k projektu TA ČR TE01020020, 17. 7. 2014.
- [6] Sadil J.: *Modelování účinnosti nabíjení elektrochemických akumulátorů LiFe(Y)PO_4* . Výzkumná zpráva k projektu TA ČR TE01020020, 10. 12. 2014.

6.2 Seznam použitých zkratk

CA.....jednotka elektrického proudu jako násobek zaručené kapacity
DODHloubka vybíjení (Depth of Discharge)
OCV.....napětí naprázdno (Open Circuit Voltage)
SOCStav nabití (State of Charge)
SOHStav zdraví (State of Health)
WPPracovní balíček (Work Package)

6.3 Seznam obrázků

OBR. 1: FOTOGRAFIE FUNKČNÍHO VZORKU MĚŘICÍHO A ŘÍDICÍHO SYSTÉMU PRO TESTOVÁNÍ AKUMULÁTORŮ	6
OBR. 2: PRINCIPIÁLNÍ SCHÉMA MĚŘICÍHO A ŘÍDICÍHO SYSTÉMU PRO TESTOVÁNÍ AKUMULÁTORŮ	8
OBR. 3: PROGRAMOVATELNÝ ZDROJ A6KW, VÝROBCE PCE POWERCONTROL.	9
OBR. 4: PROGRAMOVATELNÁ ZÁTĚŽ EL-9080-400, VÝROBCE ELEKTROAUTOMATIK.	9
OBR. 5: PROGRAMOVATELNÝ OBĚHOVÝ TERMOSTAT F33-MA, VÝROBCE JULABO.	10
OBR. 6: 16-BITOVÁ KARTA DAQ PCIE 6341, VÝROBCE NATIONAL INSTRUMENTS.	10
OBR. 7: UKÁZKA GRAFICKÉHO UŽIVATELSKÉHO ROZHRANÍ SW MODULU CYKLICKÉHO TESTOVÁNÍ.	12
OBR. 8: SCHÉMA STAVOVÉHO AUTOMATU KRÁTKODOBÉHO MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU A NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.	14
OBR. 9: UKÁZKA PRŮBĚHU NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH VELIČIN PŘI KRÁTKODOBÉM MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU A NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.	15
OBR. 10: POJMENOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ POMOCÍ PRŮBĚHU STAVU NABITÍ.	15
OBR. 11: SCHÉMA STAVOVÉHO AUTOMATU DLOUHODOBÉHO CYKLICKÉHO MĚŘENÍ.	16
OBR. 12: UKÁZKA VYBÍJECÍ A NABÍJECÍ CHARAKTERISTIKY PRO BATERII TVOŘENOU 2 SÉRIOVÝMI ČLÁNKY TECHNOLOGIE $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.	17
OBR. 13: NÁHRADNÍ OBVOD AKUMULÁTORU POUŽITÝ PRO MODEL AKUMULÁTORU.	19
OBR. 14: UKÁZKA VÝSLEDNÝCH NAPĚTÍ NAPRÁZDNO PRO TEPLITU 20 °C AKUMULÁTORU $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.	21
OBR. 15: UKÁZKA VÝSLEDNÝCH NAPĚTÍ NAPRÁZDNO PRO TEPLITU -5 °C AKUMULÁTORU $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.	21
OBR. 16: UKÁZKA VÝSLEDNÝCH ODPORŮ NÁHRADNÍCH REZISTORŮ PRO TEPLITU 20 °C AKUMULÁTORU $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.	21



OBR. 17: UKÁZKA VÝSLEDNÝCH ODPORŮ NÁHRADNÍCH REZISTORŮ PRO TEPLITU -5 °C AKUMULÁTORU $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.	22
OBR. 18: UKÁZKA VÝSLEDNÝCH KAPACIT NÁHRADNÍCH KAPACITORŮ PRO TEPLITU 20 °C AKUMULÁTORU $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.	22
OBR. 19: UKÁZKA VÝSLEDNÝCH KAPACIT NÁHRADNÍCH KAPACITORŮ PRO TEPLITU -5 °C AKUMULÁTORU $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.	22
OBR. 20: UKÁZKA POROVNÁNÍ MĚŘENÉHO A MODELOVANÉHO PRŮBĚHU NAPĚTÍ JEDNOHO HLUBOKÉHO CYKLU AKUMULÁTORU $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. PARAMETRY MODELU ODPOVÍDAJÍ HODNOTÁM UVEDENÝM V TÉTO KAPITOLE (INTERNÍ VÝSLEDEK Č. 58).	23
OBR. 21: UKÁZKA POROVNÁNÍ MĚŘENÉHO A MODELOVANÉHO PRŮBĚHU NAPĚTÍ KOMPLIKOVANĚJŠÍHO CYKLU AKUMULÁTORU $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. PARAMETRY MODELU ODPOVÍDAJÍ HODNOTÁM UVEDENÝM V TÉTO KAPITOLE (INTERNÍ VÝSLEDEK Č. 58).	24
OBR. 22: UKÁZKA POROVNÁNÍ MĚŘENÉHO A MODELOVANÉHO PRŮBĚHU NAPĚTÍ JEDNOHO HLUBOKÉHO CYKLU AKUMULÁTORU LiFePO_4 (INTERNÍ VÝSLEDEK Č. 16).	24
OBR. 23: UKÁZKA POROVNÁNÍ MĚŘENÉHO A MODELOVANÉHO PRŮBĚHU NAPĚTÍ JEDNOHO HLUBOKÉHO CYKLU AKUMULÁTORU $\text{LiMnO}_2 + \text{LiNiO}_2$ (INTERNÍ VÝSLEDEK Č. 44).	25

6.4 Seznam tabulek

TABULKA 1: DEFINICE VELIČIN.	5
TABULKA 2: UKÁZKA VÝSLEDKŮ KRÁTKODOBÉHO MĚŘENÍ JEDNOHO CYKLU PRO ČLÁNEK TECHNOLOGIE $\text{LiMn}_2\text{O}_4 + \text{LiNiO}_2$.	18
TABULKA 3: VYHODNOCOVANÉ PARAMETRY NÁHRADNÍHO OBVODU PŘI KRÁTKODOBÉM MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU A NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.	19
TABULKA 4: VÝSLEDNÉ PARAMETRY NÁHRADNÍHO OBVODU JAKO VÝSLEDEK MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU A NAPĚTÍ NAPRÁZDNO PRO TEPLITU 20 °C (INTERNÍ VÝSLEDEK Č. 58).	20
TABULKA 5: VÝSLEDNÉ PARAMETRY NÁHRADNÍHO OBVODU JAKO VÝSLEDEK MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU A NAPĚTÍ NAPRÁZDNO PRO TEPLITU -5 °C.	20
TABULKA 6: UKÁZKA VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ PRO AKUMULÁTOR TECHNOLOGIE $\text{LiMn}_2\text{O}_4 + \text{LiNiO}_2$.	26

6.5 Poděkování

Tento výzkum byl realizován s podporou Technologické agentury České republiky v programu center kompetence, projekt č. TE01020020 Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka. Autoři děkují za tuto podporu.