

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE

Studijní program:

Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor:

Technologické systémy



DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOMATIZOVANÁ STANICE PRO TESTOVÁNÍ BATERIÍ (SAM 3)

Autor práce: Bc. Michal Hruška

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

2020



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hruška** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **434864**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Automatizovaná stanice pro testování baterií (SAM 3)

Název diplomové práce anglicky:

Automated Battery Testing Station (SAM 3)

Pokyny pro vypracování:

- Sestavte testovací pracoviště (SAM 3) pro měření velkokapacitních akumulátorových článků:
 - Vyberte, případně navrhnete vhodný HW,
 - realizujte SW řešení automatizovaného systému pro parametrizaci velkých akumulátorových článků.
- Provedte rešerši již realizovaných akademických prací v rámci laboratoře LFSEZ, postupy a metody uvedené v pracích analyzujte a vybrané metody diagnostiky implementujte do vámi navrhovaného testovacího pracoviště SAM 3

Seznam doporučené literatury:

- [1] Reichl, T.; Hrzina, P. Study of the Current Value Influence on the Internal Resistance Value In: Proceedings of Advanced Batteries Accumulators and Fuel Cells – 19th ABAF. Brno: Brno University of Technology, 2018. p. 176-179. ISBN 978-80-214-5651-8.
- [2] Reichl, T.; Hrzina, P. Capacity Detection of Internal Short Circuit Journal of Energy Storage. 2018, 2018(15), 345-349. ISSN 2352-152X.
- [3] REDDY, Thomas B. a David LINDEN. Linden's Handbook of Batteries. 4. New York: Mc Graw Hill, 2008. ISBN 978-0-07-162419-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **20.09.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2021**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za odborné vedení, jeho pomoc, čas a cenné rady, které mi při zpracování této práce věnoval.

Prohlášení

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

V Praze dne 1.1.2020

Michal Hruška

Anotace

Součástí diplomové práce je dokumentace postupného rozvoje stanice automatického měření (S.A.M.3), jehož cílem je pracoviště pro parametrizaci velkokapacitních akumulátorových článků. Na základě provedené rešerše akademických prací LFSEZ jsou implementovány metody a postupy, jak z hlediska softwarového, tak hardwarového. V případě hardwarového jsou naznačeny jednotlivé funkční bloky stanice. Z hlediska softwarového jsou popsány vytvořené Labview aplikace pro parametrizaci akumulátorových článků. Jedním z přínosů je implementace impulzní diagnostiky, která se řadí mezi méně probádané oblasti pro testování. Teoretický základ impulzní diagnostiky je rozšířen o znalosti elektrostatických modelů s popisem mechanismu přenosu elektrického náboje.

Klíčová slova

ATE systém, S.A.M.3, LabVIEW, diagnostika, elektrochemické zdroje, impulzní odezva

Annotation

This thesis covers documentation of the gradual development of the automatic measurement station also called S.A.M.3. The main focus is a workplace for parameterization of large-capacity accumulator cells. Based on the research of LFSEZ's academic papers. Methods and procedures are implemented. In the case of hardware, individual function blocks of the station are documented. From the software point of view, created LabVIEW applications for parameterization of accumulator cells are described. One of the contributions is the implementation of impulse diagnostics, which can be classified as a less explored area on the field of diagnostics. On the theoretical level, impulse diagnostics is extended by a description of electrostatic models describing the mechanism of electric charge transfer.

Keywords

ATE system, S.A.M.3, LabVIEW, diagnostics, electrochemical sources, impulse response

Obsah

1	<i>Na úvod</i>	13
1.1	Současný projekt	13
1.2	Návaznost projektu	13
1.3	Testovací metody od napětí ke spektroskopii	14
2	<i>Testování v rámci laboratoře LFSEZ</i>	16
2.1	Diplomové práce LFSEZ	16
2.1.1	Impulzní charakteristika baterií	16
2.1.2	Ampérhodinové zkoušky	17
2.1.3	Automatizace laboratoře.....	18
2.1.4	Elektrochemická impedanční spektroskopie – EIS.....	18
2.1.5	Vliv teploty na parametry baterií.....	19
2.2	Komplexní testování trakčních lithium iontových akumulátorů	20
3	<i>Elektrostatické modely elektrodového rozhraní</i>	21
3.1	Helmholtzův model (1879)	22
3.2	Gouy-Chapman Model (1910-1913)	23
3.3	Sternův model (1924)	24
3.4	Grahamův model (1947)	25
3.5	Bockris, Devanathan, and Muller Model (1963)	26
4	<i>Mechanismus přenosu elektrického náboje</i>	27
5	<i>Základní prvky S.A.M.3</i>	28
5.1	Testovací zátěž IT8800	28
5.1.1	Parametry.....	28
5.1.2	Vlastnosti	30
5.2	Testovací zátěž IT8500	35
5.2.1	Parametry.....	35
5.3	Testovací zdroj IT6500	36
5.3.1	Vlastnosti	36
5.3.2	Paralelní chod	36
5.3.3	Parametry přístroje IT6522A.....	37
5.4	Teplotní senzor one-wire (DS18B20)	38

5.5	Příkazy SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments).....	40
5.5.1	Vznik SCPI	40
5.5.2	Struktura zpráv	41
5.5.3	Tvar a typy zpráv SCPI.....	43
6	<i>Současný stav.....</i>	44
6.1	Bezpečnostní stykač Albright SW204A.....	44
6.2	Výroba svorkovnice	44
6.3	Nouzové STOP tlačítko.....	44
6.4	Proudový bočník	44
6.5	Řídicí jednotka Arduino Nano.....	46
6.5.1	Reset jednotky	47
6.6	Snímání teploty.....	48
6.7	Ventilace	49
6.8	Řídicí počítač	49
7	<i>Labview aplikace pro automatickou parametrizaci článků</i>	50
7.1	Kapacitní měření.....	50
7.1.1	Configuration window.....	51
7.1.2	Stages (přenasazení parametrů měření)	52
7.1.3	Předdefinované testovací parametry.....	52
7.1.4	Ukládání měřených dat.....	53
7.1.5	Hlavní rozhraní.....	53
7.1.6	Typy konfigurací SAM3 pro kapacitní měření.....	54
7.2	Zobrazení dat (Data Adjust).....	54
7.3	Správa teplotních senzorů	55
7.4	Měření vnitřního odporu dle ČSN.....	56
7.4.1	Pokyny pro měření vnitřního odporu	56
7.5	Impulzní diagnostika	57
7.5.1	Princip měření	57
7.5.2	Popis aplikace.....	58
7.5.3	Testované vzorky	59
7.5.4	Parametry impulzu	59
7.5.5	Naměřené hodnoty	61
7.5.6	Vyhodnocení měření	62
7.5.7	Shrnutí.....	66
7.5.8	Optimalizace měření	66
7.5.9	Vylepšení pulzní metody.....	68
8	<i>Závěrem</i>	69

9	<i>Bibliografie</i>	71
9.1	Seznamy	76
9.1.1	Seznam obrázků.....	76
9.1.2	Seznam tabulek.....	78
9.1.3	Seznam grafů	78
10	<i>Přílohy</i>	79
10.1	Detail Ventilačního potrubí.....	79
10.2	Vzor XML formátu pro Battery parameters	80
10.3	Rozbočovač RJ11 pro teplotní senzory OneWire	81
10.4	Vzorový příklad ze souboru dat pro měření vnitřního odporu	82
10.5	Vzorový příklad ze souboru dat pro kapacitní měření	83
10.6	GUI pro kapacitní měření.....	85
10.7	GUI aplikace Data Adjust.....	86
10.8	GUI pro měření vnitřního odporu dle ČSN	87
10.9	GUI pro Impulzní testování.....	88
10.9.1	Grafické zobrazení naměřených hodnot impulzního diagnostiky	89
10.10	Vyhodnocení měření TodVpulse main	91

NA ÚVOD

1.1 SOUČASNÝ PROJEKT

Současná třetí verze pracoviště je výsledkem postupného zdokonalování jednotlivých součástí stanice, které jsou doprovázeny společně s rozvojem laboratoře elektrochemických zdrojů (LFSEZ) na katedře elektrotechnologie ČVUT. Rozvoj pracoviště je reakcí na novodobou poptávku testovacích měření elektrochemických zdrojů.

To je dáno přirozeným vývojem a snahou zvýšení ampérhodinové kapacity bateriových článků, kdy s nástupem vysokokapacitních elektrochemických článků se dostávají do popředí nově aplikovatelné testovací metody. V zájmu laboratoře je rozvíjet tyto metody krok po kroku.

S nárůstem ampérhodinové kapacity článků je nutné dosažení odpovídajícího proudového zatížení. Takovéto testy vyžadují vytvořit pracoviště s důrazem na bezpečnostní rizika, jak z hlediska testovaného zařízení, tak z pohledu laboranta. Cílem stanice je poskytnutí zatěžovacích proudů dosahujících hodnot 200 A. Tento požadavek je v celku specifický při uvážení dnes často využívaných článků s nízkou napět'ovou úrovní do 5 V. Nutnost dimenzování komponent musí být zejména na základě proudového působení, které může působit svými elektrickými, teplotními či silovými účinky.

1.2 NÁVAZNOST PROJEKTU

Návaznost projektu započala na základě bakalářské práce, kdy vznikla první verze stanice (S.A.M.). Tato stanice byla jednoduchým aparátem pro cyklování elektrochemických zdrojů v programovém prostředí Labview.

V druhé verzi došlo k následnému vylepšení stanice. Příkladem je dosažení značné přesnosti měření za použití multimetrů Agilent 34410A, jednak pro snímání průběhu napětí a také pro snímání proudu. Za pomoci proudového bočníku bylo docíleno navýšení proudového rozsahu. Detailní popis z hlediska HW a SW je obsažen v bakalářské práci autora [1]

Začátkem semestru v akademickém roce 2017/18 proběhlo výběrové řízení na přístroje splňující testovací parametry zmíněné v části 1.1. Na úkor tohoto řízení se naskytla příležitost spolupodílet se na vývoji této stanice s pracovním názvem nesoucí své prototypové číslo S.A.M.3.

V souvislosti s cílem předcházející bakalářské práce bylo také úspěšně zacíleno na kritérium pro vytvoření testovacího programu dostatečně modulárního a obecného, aby bylo možno implementovat libovolné přístroje do řídicího programu v krátkém časovém horizontu. Díky tomuto řešení bylo možno přikročit k tvorbě stanice a přispět tedy do kontinuálního rozvoje laboratoře pod dohledem *Ing. Pavla Hrziny, Ph.D.*

Je nutno zmínit, že míra nabraných zkušeností a znalostí jak z hlediska HW, tak SW byla postupným procesem od vzniku S.A.M.1.

Poslední verze je tedy využití ustálených a osvědčených metod z předchozích let a není zde prostor pro detailnější rozbor. At už jde o absolvování semestrálního předmětu grafického programování (A0B38GRP) pod vedením Ing. Pavla Mlejníka, Ph.D., dále pak kurz bioelektrochemie v rámci programu Erasmus+ pod vedením prof. Dr. Ana Maria Oliveira Brett nebo navázání na bakalářskou práci autora [1].

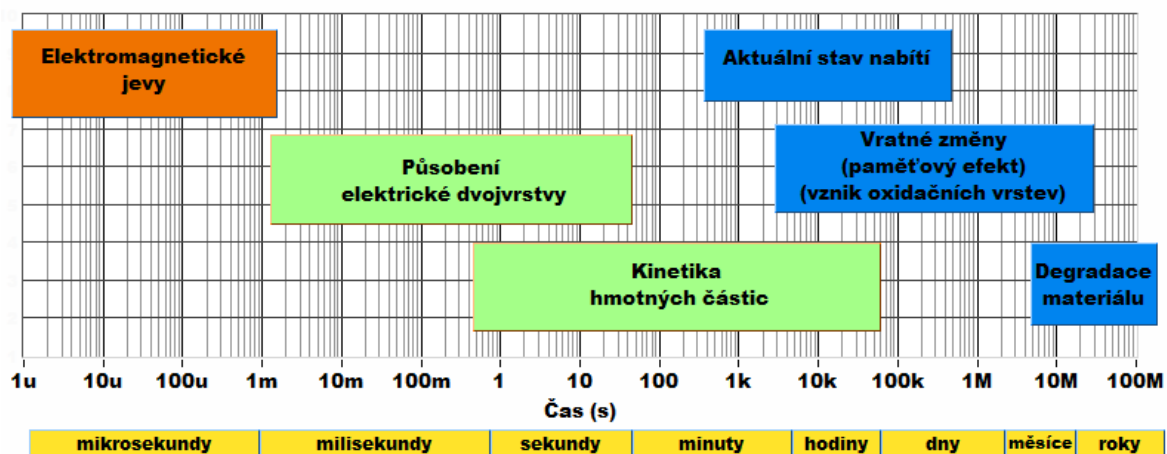
Z posledního zmíněného zdroje byla využita značná část kostry programu. Základ programu byl dále rozvíjen a vylepšován, dle požadavků na testovací metody a záznam dat odpovídající fakultního testovacího pracoviště.

1.3 TESTOVACÍ METODY OD NAPĚTÍ KE SPEKTROSKOPII

S postupným rozvojem elektrochemických článků a stále širším uplatněním se zvyšují nároky na jejich testování. Jako jeden z mála zdrojů uchovatelné elektrické energie zajišťují spolehlivost funkce mnoha zařízení. Sofistikovanější metody diagnostiky jsou aplikovány v dnešním praktickém životě.

Základními parametry článků je zejména sledování parametrů stavu nabití. Označováno jako SoC (State of Charge) a stupeň degradace baterie, také známé jako SoH (State of health).

Pro podrobnější rozbor těchto veličin je nutná znalost uloženého náboje neboli kapacita často udávaná v mAh, vnitřní odpor vypovídající o proudové zatížitelnosti a v neposlední řadě hodnota samovybíjení popisující samotnou mechanickou celistvost článku. Tyto parametry můžeme hodnotit z pohledu dynamiky procesu jako veličinami statickými [2]. Dále pak rozlišujeme parametry dynamické, o kterých je více popsáno v [3] [4] [5] [6] a bude rozebráno v dalších kapitolách.



Obr. 1: Přehled dynamiky elektrochemických procesů

Testovací metody se dnes postupně rozvíjejí a možno je seřadit dle komplexnosti. Od základního měření napětí přes stanovení vnitřního odporu [5] [7], využití impedanční spektroskopie, zkráceně EIS [8] [9] [10], až po současně využívané detailní analýzy s využitím výpočetních algoritmů a aplikování matematických modelů [11].

Avšak každá metoda poskytuje popis pouze části spektra diagnostiky. Velikost napětí na svorkách a vnitřní odpor článku nevypovídá o aktuální kapacitě článku. Ačkoliv plné cyklování stanoví přesnou kapacitu, jde o invazivní metodu. Ani metoda EIS není absolutním diagnostickým ukazatelem. Proto je nutno rozvíjet všechny metody pro možnost kvalitního vývoje laboratoře. V tabulce jsou shrnuty testovací metody dle [2]

Napětí	Napětí naprázdno (V_{oc}) v ustáleném stavu v některých případech vypovídá o stavu nabití. Přesnějším diagnostickým nástrojem v tomto případě může být stanovení V_{CCV} .
Vnitřní odpor	Vnitřní odpor reflektuje kvalitu vyrobeného článku, případně mechanické závady či míru koroze elektrod. V případě Li-Ion technologie nemusí být pokles kapacity podmíněn nárůstem vnitřního odporu.
Uzavřený cyklus	Za uzavřený cyklus baterie se považuje návrat do odpovídajícího elektrochemického rovnovážného stavu. Cyklus je rozdělen na fázi nabíjení a vybíjení. Postup cyklování článků poskytuje nejpřesnější údaje o stavu kapacity, avšak způsobuje degradaci článku.
Dynamické metody	Metody založené na generování charakteristických pulzů či napěťových skoků. Mezi tyto metody patří impulzní diagnostika a EIS, které mají široký záběr v rámci dalšího výzkumu. Na základě těchto měření je možno aplikovat další pokročilé technologie rychlého testování za pomoci komplexních diagnostických programů.
Coulombická účinnost	Je možné uplatnit vysoké coulombické účinnosti pro Li-Ion články dosahujících 99 %. Na základě monitorování prošlého náboje je možné vyhodnotit stav baterie.
BMS	Dnes široce využívané BMS, dle kterých možno vyhodnotit stav baterie. Většina systémů pro správu baterií odhaduje SoC monitorováním napětí, proudu a teploty. Některé BMS pro Li-ion články využívají bilanční výpočet elektrického náboje. Vzhledem k již vysoké coulombické účinnosti dosahujících 99 %.
SoH (State of Health)	Indikátor stavu života odhaduje životnost baterií spočítáním celkového počtu cyklů, které může baterie během své životnosti dodat. Nová baterie začíná na 100 %. Na základě dodaného náboje je posouzen stupeň degradace až po vyřazení článku. Predikce životnosti se stanoví výpočtem bilance náboje v jednom cyklu na základě specifikací výrobce (V , Ah) a poté vynásobením čísla daným počtem cyklů. Příkladem může být technologie SOLI, vyvinutá společností Cadex.

Tab. 1: Klasifikace diagnostických metod [2]

2 TESTOVÁNÍ V RÁMCI LABORATOŘE LFSEZ

Jak již bylo zmíněno, vývoj laboratoře je založen na postupném vývoji pracovníků katedry technologie a dále také na tvorbě akademických prací v rámci fakulty. Podrobný výčet by byl zbytečně zdlouhavý, nicméně některé práce z pohledu autora tvoří slibný základ pro budoucí vývoj elektrochemických článků.

2.1 DIPLOMOVÉ PRÁCE LFSEZ

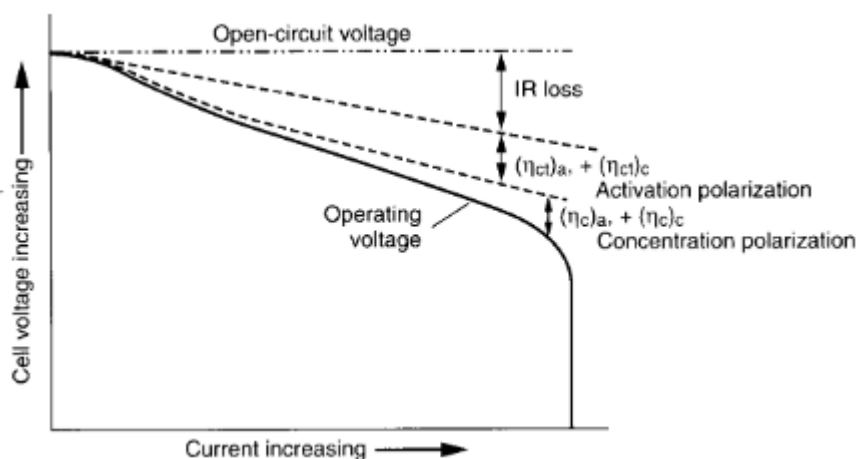
Obdobou S.A.M 3 by mohla být považována diplomová práce [12] Ing. Matěje Kmínka. Tato práce byla dovedena do funkční podoby v roce 2012, dále prošla úpravou v roce 2015 pod rukou Ing. Viktora Ptáčka, [13] kdy bylo dosaženo automatického cyklování a měření baterií dle požadavků ČSN. Do dnešní doby je stanice provozuschopná, avšak je limitována svým proudovým omezením 100 A. Tato stanice je výsledkem dvou bakalářských a dvou výše zmíněných diplomových prací. Do budoucna je zde dalšího prostoru ke zlepšení pro další adepty.

2.1.1 Impulzní charakteristika baterií

Na poli impulzní diagnostiky sepsal Ing. Tomáš Reichl [5] svou práci, která obsahuje, jako jedna z mála česky psaných zdrojů, popis elektrochemického přenosu iontů odehrávající se při elektrochemickém ději. Na základě teoretických poznatků je experimentálně aplikována měřicí metoda impulzní diagnostiky. Další vývoj této metody je v rámci dalšího výzkumu.

Metoda prokázala možnost v krátkém časovém intervalu otestovat kvalitu a stav elektrochemického článku na základě určení vnitřního odporu vzorků.

Práce obsahuje popis vlivu polarizace kapacitní dvojvrstvy na rozhraní mezi elektrodou a elektrolytem. Rozbor několika druhů přepětí (v anglické literatuře overpotential) způsobující napěťové poklesy oproti V_{oc} .



Obr. 2: Napěťové ztráty způsobené vnitřním odporem a polarizačními ději převzato [3] [5]

Diplomová práce je rozebrána na základě literatury [3] (LINDEN, David. a Thomas REDDY. *Handbook of batteries*. 3rd ed.) Jde o velmi komplexní literaturu s podrobným popisem o rozsahu 1500 stran. Bez základní znalosti problematiky je obtížné probíranému tématu porozumět.

Na základě uvedené diplomové práce [5] bude popis dynamického elektrochemického děje dále doplněn o širší vysvětlení. Pro detailnější seznámení s problematikou autor absolvoval kurz bioelektrochemie v rámci studijní programu Erasmus+. Základ tvoří studijní materiály bioelektrochemie, vyučované na portugalské universitě v Coimbre [10].

Dynamický proces je popsán pomocí celé řady rovnic, z nichž nejdůležitějším je popis pomocí Gibbsovy, Nerstovy a Tafelovy rovnice [5] [3]. Dále pak formulace pro transport elektronového přenosu může být popsán pomocí dvou Fickových zákonů, které popisují difuzní děj, a s ním pohyb částic se změnou koncentračního gradientu. Třetím pilířem je popis a definice rychlostních konstant pro anodickou a katodickou výměnu náboje. Tato definice je dána Buttlerovou-Volmerovou formulací [10].

k_0 ... standartní rychlostní konstanta	
k_c, k_a ... rychlostní konstanta anoda, katoda	
$\alpha_{c,a}$... měrný přenos elektronového náboje anoda/katoda	$k_c = k_0 \exp\left(-\frac{\alpha_c n F (E - E^\phi)}{RT}\right)$
n ... počet přenesených elektronů	$k_a = k_0 \exp\left(-\frac{\alpha_a n F (E - E^\phi)}{RT}\right)$ 1)
E^ϕ ... standartní potenciál elektrody	
F ... Faradayova konstanta	
R ... molární plynová konstanta	[m s ⁻¹]
T ... termodynamická teplota	

2.1.2 Ampérhodinové zkoušky

V práci s názvem *Bateriové systémy – ampérhodinové zkoušky* (Ing. Michal Jacko) [14] se autor věnuje způsobům provádění ampérhodinových zkoušek dle norem ČSN pro články i velké bateriové systémy, zejména pak články založené na lithiové a olovené technologii. Teoretická část se zaměřuje na rozdíly mezi technologiemi baterií a dále řeší relevantní platné normy pro postupy zmíněných měření. V praktické části je provedeno porovnání dostupných přípravků k měření ampérhodinových zkoušek a rozšíření o testovací software na skupině přístrojů AkkuMaster C5.

TESTOVACÍ PŘÍPRAVKY

Autor vyhodnotil vytvořenou stanicí S.A.M. 2 jako kvalitně zpracovanou a velmi přesnou, nicméně s uživatelsky složitým rozhraním. Výstupní data byla hodnocena jako velice přehledná a snadná ke zpracování a může to být považováno za jeden z prvních kroků k unifikaci měření laboratoře pro elektrochemické články.



Obr. 3: Testované přípravky v rámci [14]

Z hlediska hodnocení norem, autor je názoru, že normy zabývající se technologie na bázi lithia nestačí držet krok s prudkým rozvojem na trhu. Znižuje nedostatek množství norem a rozsah aplikace, které dnes lithiové články pokrývají. Dále podotýká odlišnosti mezi lithiovými a olověnými akumulátory.

„Normy pro konvenční olověné akumulátory použít z velké části nejde právě kvůli zmíněným odlišnostem.“

Vliv může mít také náchylnost elektrochemického procesu, kdy změna okolního prostředí či nedostatečná relaxace článku vedla k lišícím se výsledkům měření.

2.1.3 Automatizace laboratoře

Zvýšením bezpečnosti a automatizace laboratoře se zabývala práce Ing. Václava Sándora [15]. V rámci diplomové práce zavedl elektronický docházkový systém, zvyšující bezpečnost práce v laboratoři. Systém registruje všechna spuštění, nouzová zastavení a ukončení do textového souboru v paměti operačního panelu vybaveného PLC a grafickým rozhraním díky HMI panelu.

Díky tomuto systému se naskytuje příležitost komunikace a propojení se stanicí S.A.M. 3 pomocí programového prostředí Labview, ve kterém je software vyvinut. Vzájemná komunikace poskytuje možnosti rozpoznání uživatele a případné třídění naměřených dat dle uživatele, zakázky či projektu.

2.1.4 Elektrochemická impedanční spektroskopie – EIS

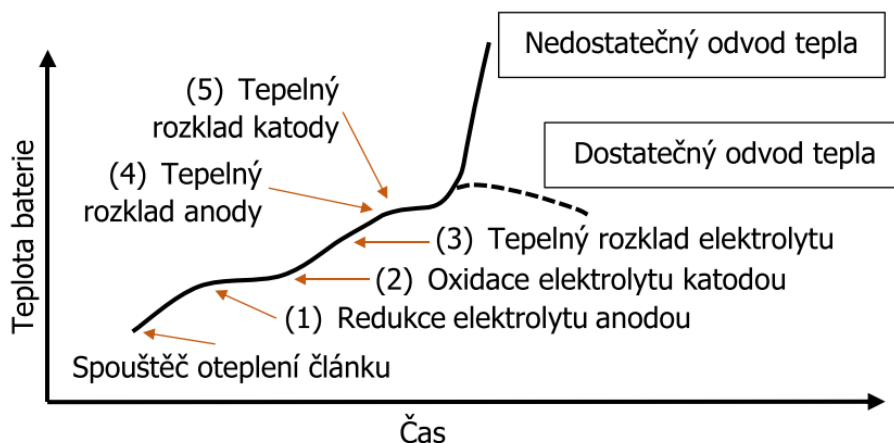
V rámci laboratoře tato metoda neprošla výraznějším rozvojem. Jedna z prvních prací, která se zabývá metodou EIS a byla úspěšně aplikována, je diplomová práce Ing. Adama Podhrázkého [9]. V rámci práce provedl lehkou rešerši na toto téma v rámci diagnostiky elektrochemických zdrojů. Dále navrhl měřicí obvod pro tento účel, zaměřený na cylindrické články 18650 typu Li-Ion, jejichž uplatnění nabývá na významu. Na základě měření byly články rozděleny do jednotlivých kvalitativních skupin.

V práci není výrazně popsána elektrochemická podstata článků a byl zvolen přístup pochopitelně více elektrotechnického směru se zaměřením na měřicí metody a vyhodnocení obvodu. Články byly posléze členěny na základě vnitřního odporu a nebyl brán v potaz vliv kapacity elektrické dvojrstvy [16]. Tento poznatek by mohl zajistit kvalitnější členění z hlediska degradace článků [17].

2.1.5 Vliv teploty na parametry baterií

Práce Ing. Vojtěcha Knotka [18] se soustředila na možné vlivy teplot na baterie. Důraz byl kladen na snížení životnosti elektrochemických článků se zvýšením či snížením teploty od optimální hodnoty okolo 20°C a vliv na jejich aktuální ampérhodinovou kapacitu. Dále pak jsou zmíněny podmínky nabíjení či vybíjení za extrémních teplot.

V případě vysokých teplot je zde věnována kapitola riziku vzplanutí a výbuchu baterie. Je zde popsán samotný mechanismus nadměrného oteplení článku a proces jednotlivých exotermických reakcí, které následují před prohořením.



Obr. 4: Mechanismus oteplení článku převzato z [18]

Autor navazuje simulací oteplení LiFePO₄ prizmatického článku. Model zdůrazňuje vliv vysokého tepelného odporu obalu článku, díky kterému dochází k vyššímu rozdílu teplot mezi vnější a vnitřní vrstvou. Zvýšená teplota ve vnitřních vrstvách článku pak může vést ke zkrácení životnosti akumulátoru.

2.2 KOMPLEXNÍ TESTOVÁNÍ TRAKČNÍCH LITHIUM IONTOVÝCH AKUMULÁTORŮ

Další obdobou diplomové práce pro automatické testování akumulátorů je práce Ing. Jana Antoše [19], která byla vypracována pod fakultou dopravní, v rámci oboru Inženýrské informatiky v dopravě a spojích. Na první pohled, z hlediska software, se jedná o vypracování s pouze základní znalostí v Labview, kdy uživatelé často dopouští tzv. „špagetového stylu“. Program není tříděn do subVIs. Pro další úpravy je diagram velice nepřehledný, o to hůře modifikovatelný, v dalších etapách vývoje.

Z pohledu HW měl autor k dispozici velmi kvalitní aparát s dosahujícím výkonovými parametry jak zátěže, tak zdroje až 6 kW. Bohužel programovatelný zdroj A6KW není schopný dosáhnout nabíjecího napětí vyššího než 20 V. Tato skutečnost může být s budoucím rozvojem akumulátorů limitujícím faktorem. Pokud uvážíme například úvahy automobilového průmyslu s nízkonapěťovými obvody na úrovni 48 V.

Autor měl k dispozici také programovatelný oběhový termostat *Julabo F 33 – MA* [20], který umožňuje měřit charakteristiky akumulátorů v teplotním rozsahu -30 °C až 200 °C [19].

V rámci LFSEZ zde byly pokusy sestavit obdobný oběhový termostat v rámci akademické práce. Tento pokus dosud nebyl dotažen do zdárného konce. Pořízení takového přístroje přímo od oficiálního výrobce bylo zatím mimo finanční možnosti laboratoře a mohlo by být předmětem dalšího vypracování.

Jednou z výhod S.A.M. 3, oproti výše zmíněného pracoviště, je pak vyšší mobilnost, kdy celou stanici je možné přesunout bez jakékoli komplikace pro měření „v terénu“.

3 ELEKTROSTATICKÉ MODELY ELEKTRODOVÉHO ROZHŘANÍ

Elektrodové rozhraní je možno rozlišit na základě báze, kde z hlediska pevné elektrody se jedná o vzniku prostorově orientovaného náboje (space-charge region).

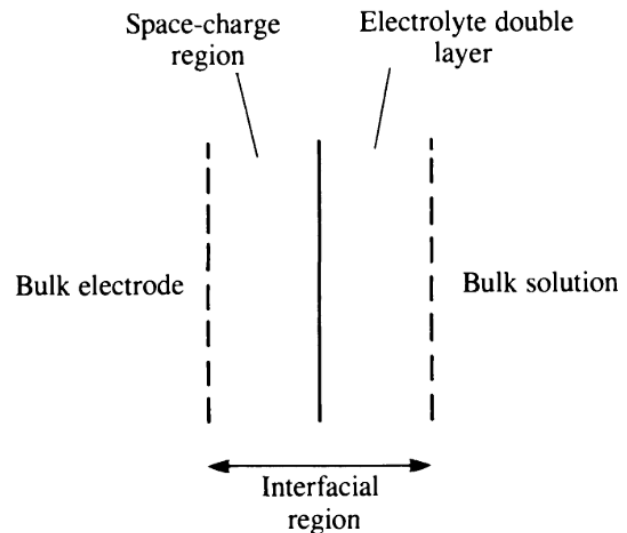
Z hlediska elektrolytu můžeme mluvit o seskupení ve formě elektrické kapacitní dvojvrstvy (double layer region).

V této oblasti vzniká spád elektrického potenciálu, což vede ke vzniku elektrického napětí. Na tomto rozhraní dochází k tvorbě kapacitní dvojvrstvy.

Ve zjednodušené formě může být definováno jako $Q = C \times U$. Tedy konstanta odpovídající úměrnosti mezi elektrickým nábojem a napětím. Velikost kapacity je možno stanovit na základě impedančního měření. Příkladem je využití impedanční spektroskopie. Další možností je na základě měření elektro-kapilární křivky. [5] [10]

Elektrostatické modely názorně zobrazují mechaniku procesů, které se odehrávají na elektrodovém rozhraní. S postupným historickým vývojem jednotlivé modely byly zdokonalovány, kdy s prvním základním vysvětlením přišel Helmholtzův model (1879), jehož přínosem bylo rozlišení pozitivně a negativně nabitých částic. Následně model byl upravován v pořadí Gouy-Chapman (1910-1913), Stern (1924), Grahame (1947), Bockris-Devanathan-Müller model (1963). Modely odráží postupný vývoj a s ním jednotlivé děje, které lze pozorovat při elektrochemické výměně, a proto budou postupně vysvětleny.

**Tento popis je cílen jako rozšíření teoretického základu na základě práce [5] Ing. Tomáše Reichla*

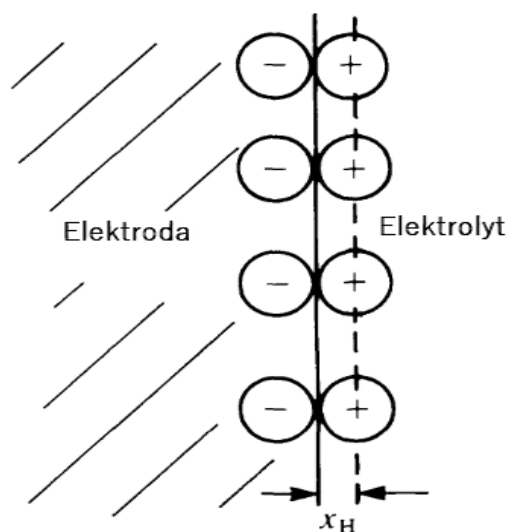


Obr. 5: Rozhraní elektrolyt-elektroda [10]

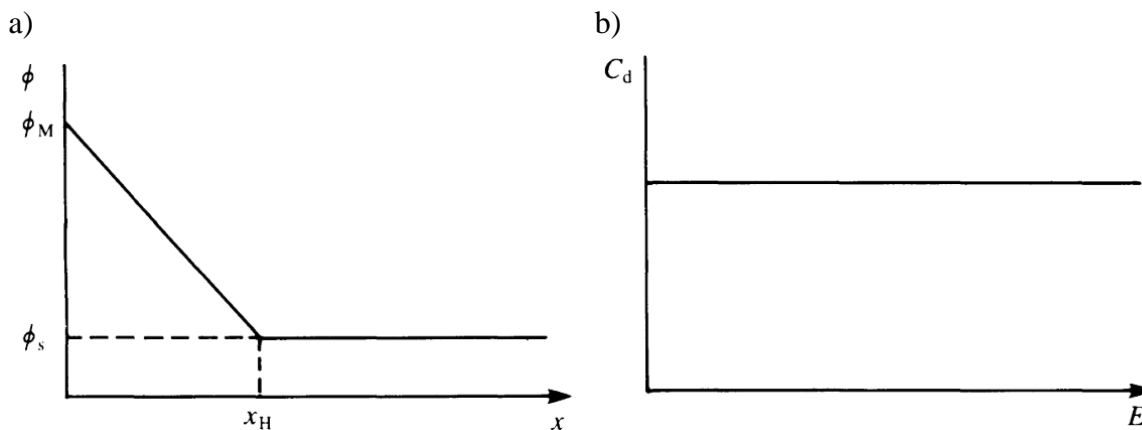
3.1 HELMHOLTZŮV MODEL (1879)

Model je doslova přímočarým vysvětlením změny elektrického potenciálu. Rozlišuje uspořádání kladných a záporných nábojů na obou stranách rozhraní. Pro uspořádání byl zanesen název „dvojitá vrstva“ (také kompaktní vrstva). Interakce elektrolytu není zahrnuta v modelu.

Modelu lze přirovnat náhradní paralelní schéma ztrátového kondenzátoru. Tedy paralelní RC uspořádání. Elektrodové desky jsou tvořeny z jedné strany kontaktním povrchem elektrody, z druhé strany jsou tvořeny ionty opačně nabitých částic, z elektrolytu pevně svázaných s elektrodou. Druhou elektrodu si tedy můžeme představit jako rovinu promítnutou středy nabitých částic.



Obr. 6: Zobrazení Helmholtzova modelu [10]



Obr. 7: a) Lineární závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti od elektrody
b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle HM [10]

Pak platí:

$$C_{d,H} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{x_H}$$

ϵ_r ... relativní permitivita

ϵ_0 ... permitivita vakua

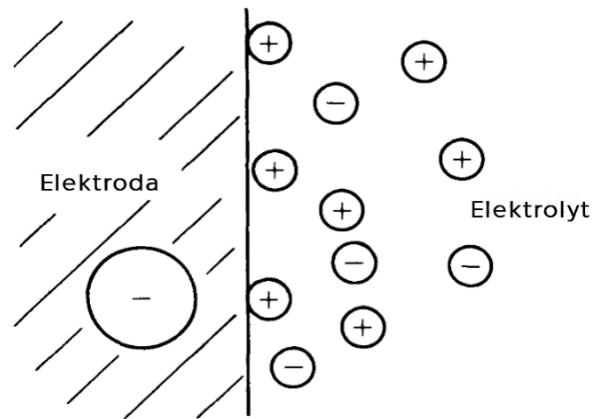
x_H ... vzdálenost mezi opačně nabitými náboji

2)

Model zanedbává interakce ve vzdálenější oblasti od elektrody. Dále není zahrnut vliv změny koncentrace elektrolytu. Tedy není nelze brát v platnost vliv difúzních procesů, které je možno popsat pomocí Fickových zákonů.

3.2 GOUY-CHAPMAN MODEL (1910-1913)

Model bere v potaz vliv aplikovaného potenciálu na elektrodě a také vliv koncentrace elektrolytu. Oba případy ovlivňují velikost elektrické dvojvrstvy. Šířka vrstvy se v tomto případě odvíjí od exponenciálního rozložení částic v okolí elektrody. Rozložení částic se řídí dle Boltzmanova zákona.



Obr. 8: Zobrazení modelu dle Gouye-Chapmanana [10]

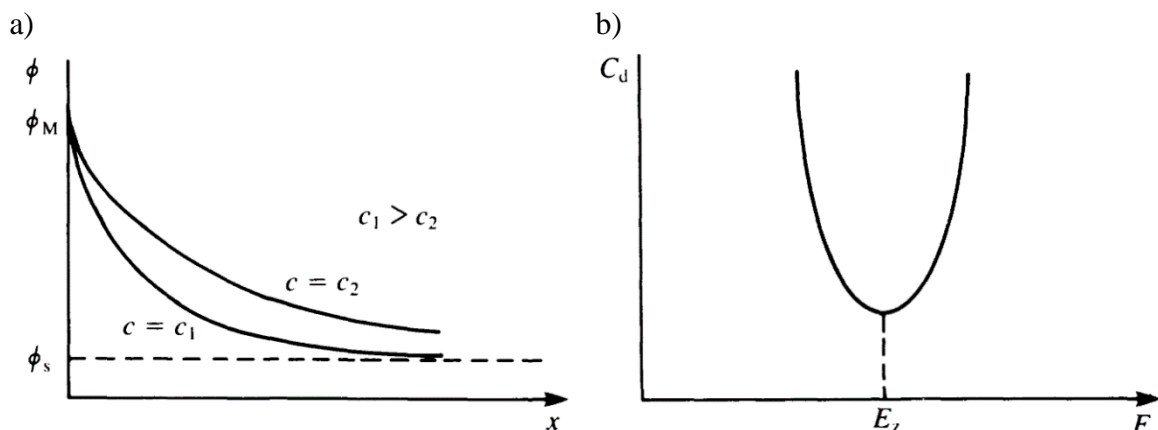
$$n_i = n_i^0 \exp\left(\frac{-z_i e \Phi_{\Delta}}{k_b T}\right) \quad 3)$$

n_i^0 ... koncentrace částic ve stabilním elektrolytu
 z ... náboj částice
 Φ_{Δ} ... rozdíl potenciálů
 k_b ... konstanta přenosu
 T ... termodynamická teplota

Na základě tohoto předpokladu lze odvodit velikost kapacitní dvojvrstvy. Dvojvrstva je závislá na velikosti aplikovaného potenciálu [10] str.46-48.

$$C_{d,GC} = \left(\frac{2z^2 e^2 \epsilon_r \epsilon_0 n_i}{k_b T}\right) \cosh\left(\frac{z_i e \Phi_{\Delta,0}}{2k_b T}\right) = a * \cosh(b * \Phi_{\Delta,0}) \quad 4)$$

Grafický popis je pak možno zakreslit následovně.



Obr. 9: a) Exponenciální závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti od elektrody při odlišných koncentracích elektrolytu

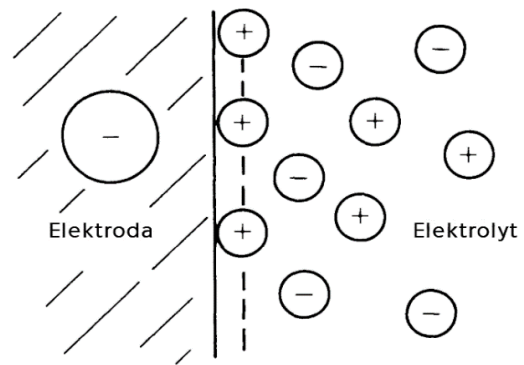
b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle GCM [10]

V tomto případě není uváženo, že v blízkém okolí elektrody, vzniká stabilní mono-vrstva, která skutečně má kapacitní vlastnosti a chová se dle Helmholtzova modelu.

3.3 STERNŮV MODEL (1924)

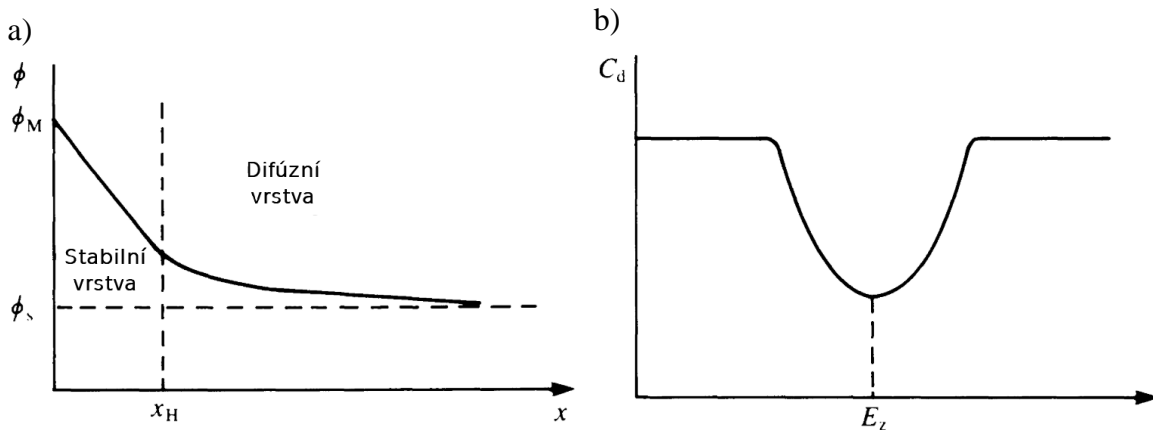
Kombinací dvou předchozích modelů, získáme formulaci, která vysvětluje chování při potenciálu vzdálenému hodnoty E_z . Předchozí model popisoval velmi strmý nárůst kapacity v oblastech vzdálených od E_z , čímž se vzdalujeme od skutečnosti.

Model se tedy skládá z kompaktní vrstvy v blízkosti elektrody. Poté se dostává do popředí vliv difúzního procesu a rozptýlení částic dle exponenciálního rozdělení, kde postupně dochází k ustálenému stavu koncentrace v elektrolytu.



Obr. 10: Zobrazení Sternova modelu [10]

Lze tedy možno konstatovat, že v blízkosti E_z se dvojvrstva chová dle GC M. V opačném případě je možno chování přirovnat k HM.



Obr. 11: a) Závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti dle SM
b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle SM [10]

V matematické pojetí to lze přirovnat ke dvou kapacitorům zařazených v sérii. Kapacita C_H , reprezentující stabilní vrstvu v blízkosti elektrody a kapacita C_{GC} reprezentující difúzní vrstvu.

$$\frac{1}{C_d} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{GC}} = \frac{x_H}{\varepsilon_r \varepsilon_0} + \frac{1}{(2z^2 e^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 n_i / k_b T) \cosh(z_i e \Phi_{\Delta,0} / 2k_b T)} \quad 5)$$

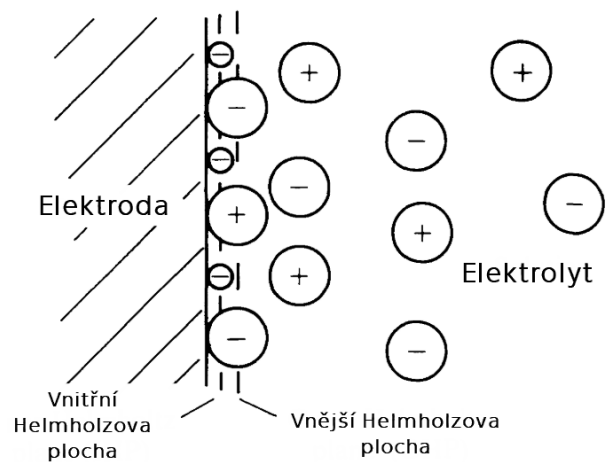
A platí tedy:

$$\begin{aligned} \text{V blízkosti } E_z, & \quad C_H \ll C_{GC} \Rightarrow C_d \sim C_{GC} \\ \text{Mimo } E_z & \quad C_H \gg C_{GC} \Rightarrow C_d \sim C_H \end{aligned}$$

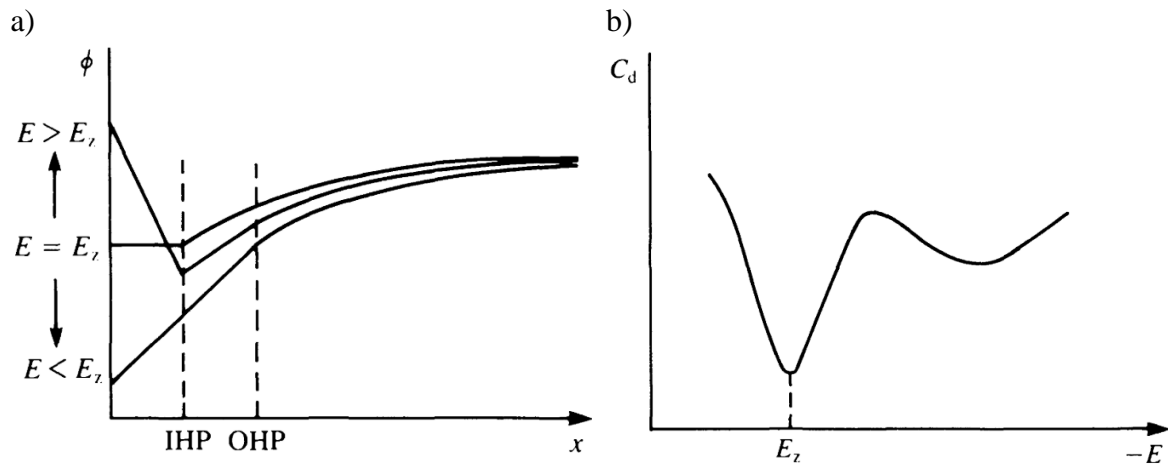
S vyšší koncentrací elektrolytu klesá tloušťka difúzní vrstvy. To následně vede k rychlejšímu napěťovému poklesu v závislosti na vzdálenosti od elektrody. Stabilní vrstva bývá také nazývána jako Helmholtzova plocha, která je nadále rozdělována na vnitřní a vnější část.

3.4 GRAHAMŮV MODEL (1947)

Model rozlišuje stabilní vrstvu na vnitřní a vnější část, přičemž vnitřní část podléhá takzvané charakteristické adsorpci. V této části dochází k iontové výměně a nabitě částice ztrácejí vlastní solvataci („své obalení molekulami“). Vnější vrstva pak obsahuje ionty, již jsou ne zcela adsorbovány. Obě vnitřní vrstvy se chovají lineárně v závislosti potenciálu na vzdálenosti od elektrody.



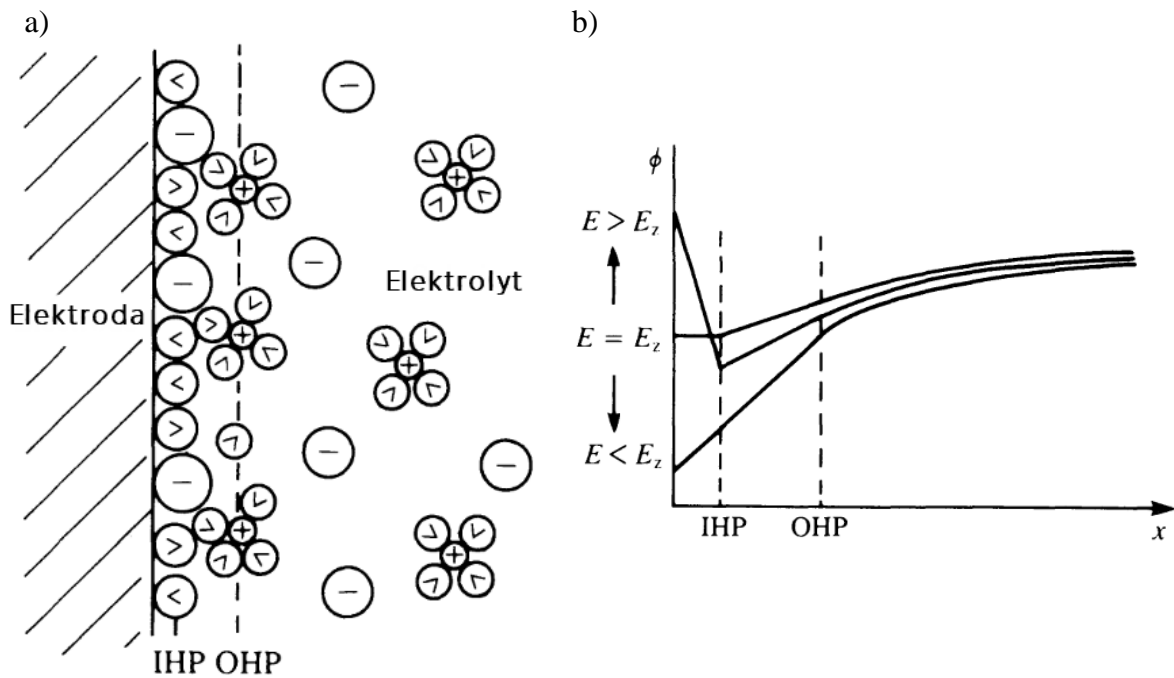
Obr. 12: Zobrazení Grahamova modelu [10]



Obr. 13: a) Závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti dle GM
b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle GM [10]

3.5 BOCKRIS, DEVANATHAN, AND MULLER MODEL (1963)

Poslední model bere úvahu reálnou velikost molekul a vliv polarizačních jevů. Tedy molekuly jsou rozměrově větší v porovnání s nabitými částicemi. Ve vnější stabilní části vrstvy dochází k polarizačním dějům, a tedy k natažení elektrických dipólů dle polarity náboje. Zahrnutím velikost molekul je nutno uvažovat prodloužení šířky vnější stabilní vrstvy (OHP). Vzorovým příkladem jsou molekuly vody (H_2O), které jsou uvažovány na Obr. 14.



Obr. 14: a) Zobrazení B-D-M modelu
b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle B-D-M modelu [10]

4 MECHANISMUS PŘENOSU ELEKTRICKÉHO NÁBOJE

Elektrostatické modely poskytují náhled na jednotlivé jevy, které působí na přenos elektrického náboje. Modely jsou pouze statickým zobrazením výměny elektrického náboje. V následující kapitole bude lehce pojednáno o kinetice elektronového přenosu. V tomto případě zanedbáme chemickou stránku věci. Nebude brán v úvahu chemický děj, tedy vznik či zánik chemických vazeb.

Jak je zmíněno v literatuře [5], [10], [3], transport částic je zprostředkován pomocí kladně, záporně či neutrálně nabitých částic. Tyto částice pak mohou být přeneseny do místa elektronové výměny třemi způsoby.

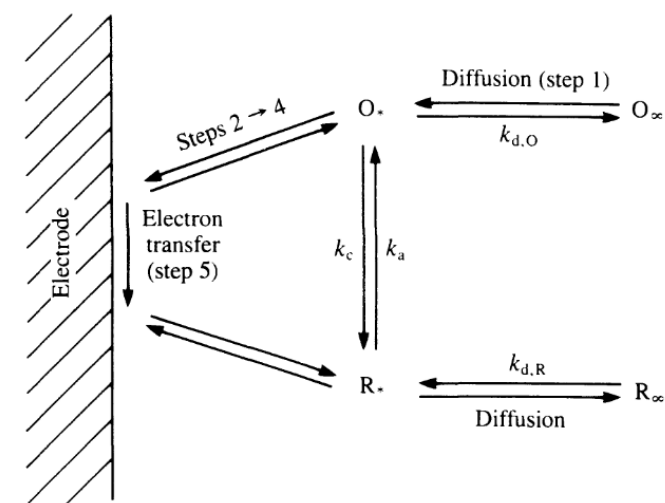
Pomocí difúze, kdy je uplatněna změna koncentrace roztoku. Dále konvekcí, kdy částice jsou unášeny kinetickým pohybem roztoku. Posledním jevem je migrace, která je dána gradientem elektrického pole.

Uvažujeme případ oxidace/redukce na elektrodě bez chemické transformace, jako příklad dle [10]



K elektronovému přenosu dojde v následujícím pořadí.

1) Difuze částic do prostoru v okolí elektrody	
2) Přeskupení iontové struktury	10^{-8} s
3) Reorientace solvatovaných dipólů	10^{-11} s
4) Oscilace mezi centrálními ionty a ligandy	10^{-14} s
5) Elektronová výměna	10^{-16} s
6) Ustálení přenosu	



Obr. 15: Schéma elektronové výměny v okolí elektrody převzato [6]

Koeficient přenosu k_d popisuje rychlost difúze uvnitř difúzní vrstvy. Veličiny k_c a k_a jsou rychlostní konstanty elektrodové reakce pro redukci a oxidaci. Míra redukce či oxidace se řídí dle Butlerovy-Volmerovy rovnice.

5 ZÁKLADNÍ PRVKY S.A.M..3

Pro zajištění odpovídající úrovně testovacího měření velkokapacitních akumulátorů je nutné k mít k dispozici přístroje splňující odpovídající parametry. Cílovou metou byla proudová úroveň pro nabití/vybití 200 A. Na základě tohoto požadavku byly v rámci výběrového řízení vybrány následující zařízení.



Obr. 16: Počáteční stav S.A.M.3

5.1 TESTOVACÍ ZÁTĚŽ IT8800

5.1.1 Parametry

Na základě výběrového řízení byla vybrána zátěž společnosti *ITECH electronic incorporation. Ltd.* Jedná se o model z řady IT8800 verzi IT8814C, jejíž parametry jsou shrnuty v tabulce Tab. 2 až Tab. 5. [21] [22]

Model		IT8814C	
Jmenovitá hodnota (0-40 ° C)	Vstupní napětí	0–120 V	
	Vstupní proud	0–24 A	0–240 A
	Příkon	1500 W	
	Min. provozní napětí	0,15 V/24 A	1,5 V/240 A
Režim konstantních o napětí	Rozsah	0,1 - 18 V	0,1 - 120 V
	Rozlišení	1 mV	10 mV
	Přesnost	± (0,025 % + 0,05 % FS)	± (0,025 % + 0,05 % FS)
Režim konstantních o proudu	Rozsah	0–24 A	0–240 A
	Rozlišení	1 mA	10 mA
	Přesnost	± (0,05 % + 0,1 % FS)	± (0,05 % + 0,1 % FS)
Režim konstantních o odporu	Rozsah	0,01 Ω–10 Ω	10 Ω - 7,5 k
	Rozlišení	16 bitů	
	Přesnost	0,01 % + 0,08 S * 2	0,01 % + 0,0008S
Režim konstantních o výkonu	Rozsah	1500 W	
	Rozlišení	100 m	
	Přesnost	0,2 % + 0,2 % FS	

Tab. 2: Základní parametry zátěže IT8814C [21]

Kýženým cílem bylo dosažení testovacích proudových zatížení dosahujících 200 A. Dle parametrů uvedených v manuálu výrobce je zátěž schopna dosáhnout testovacích parametru až 240 A/120 V s maximálním výkonem 1500 W. Tyto hodnoty by měly být postačující pro budoucí laboratorní testování objemnějších velkokapacitních článků

Zařízením lze operovat při dvou odlišných rozsazích, kdy při nižším rozsahu je možno dosáhnout vyšší přesnosti měření.

Dynamický režim		
Režim CC		
T1 a T2	20uS – 3600S / Res: 1 uS	
Přesnost	5uS ± 100 ppm	
Vzestupně / sestupně	0,0001 - 0,25 A / μS	0,001 - 2,5 A / μS
Minimální doba náběhu	60μS	60μS

Tab. 3: Dynamické parametry zátěže IT8814C [21]

Dynamické parametry jsou důležité zejména při testování přechodných dějů, kdy je nutné dosáhnout definované strmosti přechodu. Příkladem může být pulzní testování článků, o kterém bylo pojednáno v části 2.1.1. O této problematice pojednává literatura [3] [5].

Měřicí rozsah			
Zpětné měření napětí	Rozsah	0 - 18V	0 - 120V
	Rozlišení	0,1 mV	1 mV
	Přesnost	± (0,025% + 0,025% FS)	
Zpětné měření proudu	Rozsah	0 - 24A	0 - 240A
	Rozlišení	1 mA	10 mA
	Přesnost	± (0,05% + 0,05% FS)	
Zpětné měření výkonu	Rozsah	1500 W	
	Rozlišení	100 mW	
	Přesnost	± (0,2% + 0,2% FS)	

Tab. 4: Nejistoty měření zátěže IT8814C [21]

V Tab. 4 jsou shrnuty nejistoty měření zátěže. O stanovení nejistot měření předchozích verzí S.A.M. bylo pojednáno v bakalářské práci [1] a také pro předmět fyzika 2 pro EEM je k dispozici příručka [23] (*Zpracování fyzikálních měření*).

Rozsah ochran		
Ochrana nadvýkonu	1550 W	
Ochrana nadproudu	26,4 A	264 A
Ochrana nadpětí	130 V	
Ochrana přehřátí	85 °C	

Tab. 5: Mezní hodnoty ochran zátěže IT8814C [21]

Vyjma mezních hodnot ochran je k dispozici nastavitelná ochrana overprotection, která slouží k ochraně právě testovaných článků a v případě nehody zařízení pohotově odpojí testovaný vzorek.

5.1.2 Vlastnosti

Na rozdíl od předchozích verzí S.A.M nejsou přístroje jednoúčelovými zařízeními, které by byly schopny operovat pouze na úrovni konstantního napětí či proudu, jak tomu bylo v předchozí verzi S.AM.2. Jejich vlastnosti nabízejí mnoho funkcí, které je možno využít pro testování, a rozšířit tak škálu nabízených metod diagnostiky. Cílem je podat přehledný popis o možnostech použití přístrojů. Pro snadné vyhledání podrobnějších informací v manuálu jsou záměrně zachovány jejich anglické názvy. Dle [21] zátěž nabízí následující funkce:

- **Switching of local/remote operation modes**
- **Constant-status operation mode**
- **Input control function**
- **Keyboard locking function**
- **Dynamic simulation function**
- **System menu function**
- **Configuration menu function**
- **Triggering function**
- **Dynamic test function**
- **OCP test function (Over Current protection)**
- **OPP test function (Over power protection)**
- **Battery discharge test function**
- **CR-LED function**
- **Measurement of voltage rise time**
- **Save function**
- **VON function**
- **Protective function**
- **List function**
- **Terminal function of rear board**
- **Auto test function**

Mnoho funkcí je primitivních, jejichž funkce plyne z názvu.

Další jsou typické pro testovací účely jako například Constant-status operation mode, kdy máme na výběr zatížení konstantním proudem, napětím, výkonem či konstantním odporem (zkratky CC, CV, CW, CR).

Těmito funkcemi není nutné se dále zabývat.

Jako třetí skupinou jsou vlastnosti, které je možno aplikovat pro budoucí testování, a jsou vhodné pro detailnější popis pro budoucí využití.

5.1.2.1 *Dynamic test function*

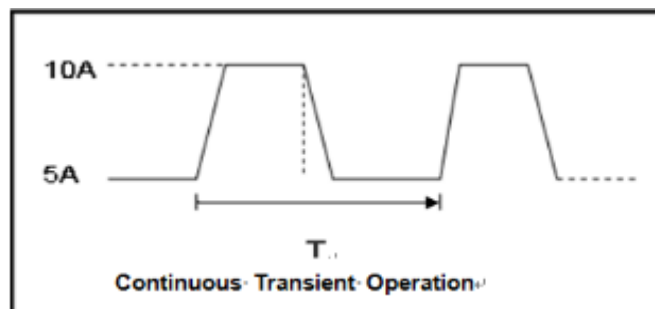
Testování dynamických přechodných dějů se nabízí zejména u testování pulzní metodou [3] [5], simulaci spínaného zařízení připojeného k akumulátoru či stanovení napěťové křivky naprázdno v závislosti na SOC (tzv. OCV curve) [24].

Uplatnění pulzního testování je ve velké míře popsáno v literatuře [25]. Jedná se o příručku od Ministerstva energetiky Spojených států, která obsahuje popis mnoha diagnostických metod pro startovací baterie.

Spojité mód (Continuous mode)

Dochází k přepínání mezi dvěma hodnotami **A** a **B** s definovanou periodou **T** s danými parametry:

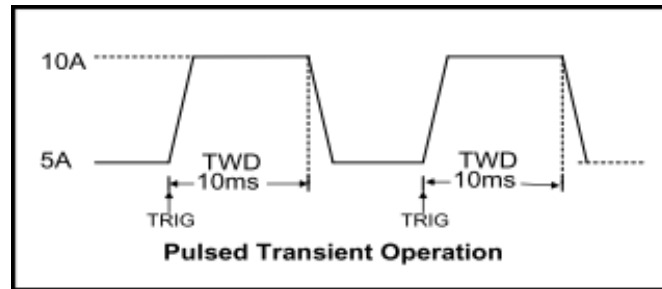
- **Typ zatížení**
 - Pulzy je možné generovat v režimu CC, CV, CW, CR viz 5.1.2
- **Rozsah:**
 - Viz Tab. 2: Základní parametry zátěže IT8814C
- **Strmost náběžné a sestupné hrany pulzu:**
 - Viz Tab. 3: Dynamické parametry zátěže IT8814C
- **Velikost proudu úrovně A a B**
- **Spínací frekvence pulzů**
 - 0,01-25000 Hz
- **Střída**
 - 0,1%-99,9%



Obr. 17: Příklad průběhu spojitě módu [21]

Pulzní mód

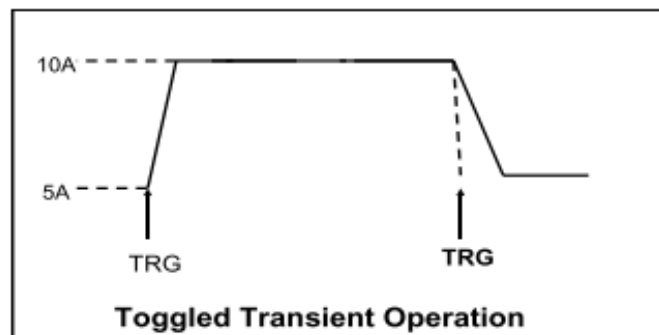
Pulzní mód reaguje na předdefinovaný typ spouště, která odstartuje pulz s předem definovanou délkou. Po uplynutí časové periody dojde k přechodu na původní úroveň. Zbylé parametry pulzu jsou shodné s předchozím případem.



Obr. 18: Příklad pulzního módu [21]

Plně spínaný pulz

Řízení pulzu je zcela závislé na připojeném spouštěcím signálu, který řídí spínání mezi přednastavenými hladinami.



Obr. 19: Příklad spínaného pulzu [21]

5.1.2.2 **Testování nadproudové ochrany zdrojů** (**Overcurrent protection function, OCP test**)

Test započne splněním definované napěťové hladiny (Von value). Po splnění napěťové úrovně Von value, zátěž čeká s definovaným zpožděním (Voltage on Delay). Následně je vzorek zatížen počátečním proudem (Start Current). Po uplynutí krokovací doby je vzorek otestován, zda jeho napětí nekleslo pod definovanou mez (OCP voltage). Pokud je napětí nad definovanou úrovní, dojde k navýšení proudu o definovaný krok (Step current)

Test je považován jako úspěšný, pokud vzorek dosáhne konečné proudové podmínky (End current) a jeho napětí neklesne pod stanovenou mez (OCP voltage). Přístroj zobrazí informace dle Obr. 20: Indikace úspěšného testu. V případě neúspěšného testu je test ukončen s indikací FAULT. Parametry jsou shrnuty v Tab. 6.

9.9973V	0.0005A
0.01W	5.100A PASS STOP

Obr. 20: Indikace úspěšného testu [21]

OCP Test	Recall	Recall OCP File		
	Edit	Voltage on level	Počáteční podmínka pro spuštění testu	
		Voltage on Delay	Zpoždění po splnění počáteční podmínky	
		Current Range	Pracovní proudový rozsah	
		Start Current	Počáteční hodnota proudového zatížení	
		Step Current	Navýšení velikosti proudu o krok Isc	
		Step Delay	Krokovací doba	
		End Current	Konečná proudová podmínka	
		OCP Voltage	Mezní hodnota napětí pro splnění testu	
		Max Trip Current	Maximální dosažitelná hodnota proudu	
		Min Trip Current	Minimální dosažitelná hodnota proudu	
Save OCP File (1-5)	Číslo testovacího bloku			

Tab. 6: Parametry OCP test function [21]

5.1.2.3 Testování ochrany zdrojů proti přetížení (Overpower protection function, OPP test)

Test je obdobný nadproudovému testu. Postupné krokování je v režimu konstantního výkonu, tedy i postupné zatěžování je logickými kroky navyšováním výkonu.

OCP Test	Recall	Recall OPP File		
	Edit	Voltage on level	Počáteční podmínka pro spuštění testu	
		Voltage on Delay	Zpoždění po splnění počáteční podmínky	
		Current Range	Pracovní proudový rozsah	
		Start Power	Počáteční hodnota výkonového zatížení	
		Step Power	Navýšení velikosti výkonu o krok Psp	
		Step Delay	Krokovací doba	
		End Power	Konečná výkonová podmínka	
		OPP Voltage	Mezní hodnota napětí pro splnění testu	
		Max Trip Power	Maximální dosažitelná hodnota výkonu	
		Min Trip Power	Minimální dosažitelná hodnota výkonu	
Save OCP File (1-5)	Číslo testovacího bloku			

Tab. 7: Parametry OPP function [21]

5.1.2.4 Měření ampérhodinové kapacity (Battery discharge test)

Metodika přesného měření ampérhodinové kapacity je obsažena v [26]. Tato metodika byla shrnuta v bakalářské práci autora [1].

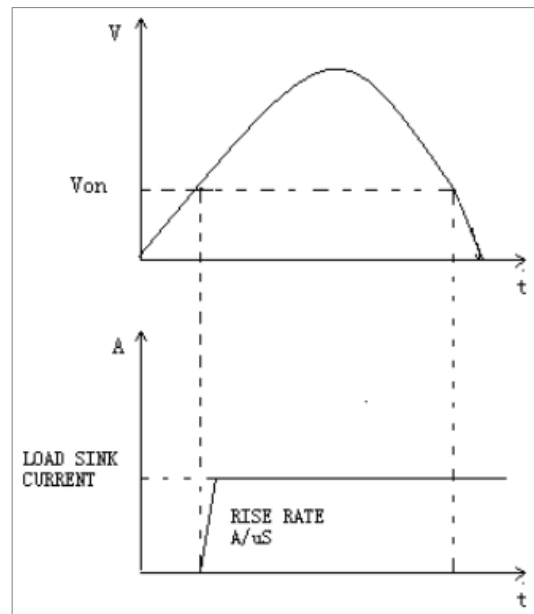
Test probíhá při zatížení konstantním proudem (CC mode). Ampérhodinová kapacita je automaticky měřena do doby ukončení měření, které nastává při splnění jedné ze tří podmínek. Jedná se podmínky napěťové, kapacitní nebo časové. Viz Tab. 8

Podmínka ukončení	Napětí	Stop Voltage
	Kapacita	Stop Capacity
	Časovač	Stop Timer

Tab. 8: Podmínky měření ampérhodinové kapacity [21]

5.1.2.5 Splnění napěťové podmínky (Von function)

Tato testovací metoda může být vhodná např. při relaxaci akumulátorů, kdy relaxace článku může být zdlouhavým procesem. Při dosažení požadované napěťové hladiny zátěž sepne. Pokud poté napětí zdroje poklesne pod napětí definované jako V_{on} , nedojde k odpojení zátěže.

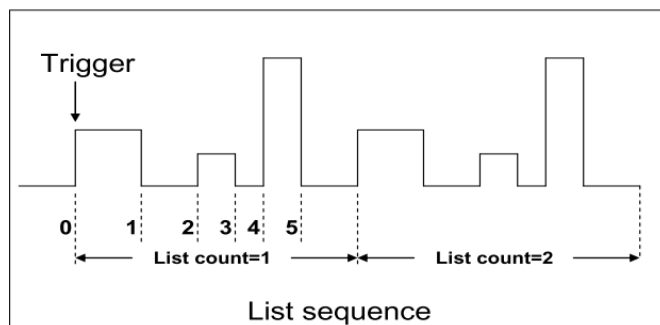


Obr. 21: Splnění napěťové podmínky V_{on} [21]

5.1.2.6 Tabulka zatížení (List operation)

Zátěž lze nakonfigurovat podle tabulky zatěžovacích pulzů, které je možno vykonat v sousledném pořadí. Každý pulz je definován svými parametry, které byly zmíněny v části 5.1.2.1.

Detailnější popis viz [21] str. 50.



Obr. 22: Tabulka zatěžovacích pulzů [21]

5.2 TESTOVACÍ ZÁTĚŽ IT8500

V průběhu projektu se naskytla příležitost doplnit stanici o další testovací zátěž. Rozměrové parametry přístroje ani jiné další překážky nebránily této instalaci. Stanice tedy byla doplněna o zátěž z řady IT8500, přesněji verzí IT8516C. Jde o sériově starší typ přístroje. Z hlediska implementace SW, do programu bylo nutné doladit knihovny pro tuto zátěž, jelikož s vyšší verzí (série IT8800) nebyla zcela kompatibilní.

5.2.1 Parametry

Již při předchozích testech byl znatelný nárůst teploty v rámci celé laboratoře při plném výkonu zátěže (1500 W). Pokud uvážíme dalších 2400 W výkonu přeměněného na tepelnou energii, nárůst okolní teploty laboratoře by mohl ovlivnit měření. Odvod generovaného tepla v rámci laboratoře byl nezbytný. To vedlo k instalaci ventilačního sání. O způsobu odvodu ztrátového tepla bude zmínka v dalších kapitolách.

Jmenovitá hodnota (0-40 ° C)	Vstupní napětí	0–120 V
	Vstupní proud	1 mA-240 A
	Výkon	2400 W

Tab. 9: Základní parametry zátěže IT8516C

	Rozsah	Rozlišení	Přesnost
Regulace zátěže	0-18 V	1mV	$\pm(0.05\%+0.02\%FS)$
	0-120 V	10mV	$\pm (0.05\%+0.025 \%FS)$
	0-24 A	1 mA	$\pm (0.1 \%+0.1 \%FS)$
	0-240 A	10 mA	$\pm (0.2 \%+0.15\%FS)$
Režim konstantního napětí	0.1-18 V	1mV	$\pm(0.05\%+0.02\%FS)$
	0.1-120 V	10mV	$\pm (0.05\%+0.025 \%FS)$
Režim konstantního proudu	0-24 A	1 mA	$\pm (0.1 \%+0.1 \%FS)$
	0-240 A	10 mA	$\pm (0.2 \%+0.15\%FS)$
Režim konstantního odporu	0.1-10 Ω	0.001 Ω	$\pm (1 \%+0.3 \%FS)$
	10-99 Ω	0.01 Ω	$\pm (1 \%+0.3 \%FS)$
	100-999 Ω	0.1 Ω	$\pm (1 \%+0.3 \%FS)$
	1 k-4K Ω	1 Ω	$\pm (1 \%+0.8 \%FS)$
Režim konstantního výkonu	0-100 W	1mW	$\pm (1 \%+0.1 \%FS)$
	100-1800 W/2400 W	100mW	$\pm (1 \%+0.1 \%FS)$
Zpětné měření proudu	0-24 A	1 mA	$\pm (0.1 \% + 0.1 \%FS)$
	0-24 A	10 mA	$\pm (0.2 \%+0.15\%FS)$
Zpětné měření napětí	0-18 V	1mV	$\pm (0.02\% + 0.02\%FS)$
	0-120 V	10mV	$\pm (0.02\% + 0.025 \%FS)$
Zpětné měření výkonu	0-100 W	1mW	$\pm (1 \%+0.1 \%FS)$
	100-1800 W/2400 W	100mW	$\pm (1 \%+0.1 \%FS)$

Tab. 10: Nejistoty měření zátěže IT8516C

5.3 TESTOVACÍ ZDROJ IT6500

Z hlediska využitelnosti byl vybrán zdroj IT6522A s maximální proudovou zatížitelností 120 A. Pro testování do požadovaných 200 A byly vybrány tyto přístroje dva, z důvodu možnosti paralelního chodu. Případně sériového řazení, kdy je možné dosáhnou maximálních nabíjecích proudů 240 A. Při testování je samozřejmě nutno zohlednit napěťové a výkonové omezení zdroje (80 V/3000 W) [27] [28] [29]

5.3.1 Vlastnosti

Seznam základních operací:

- **Local mode/Remote mode**
- **Setting voltage**
- **Setting current**
- **On/off**
- **Actual value display/setting value display**
- **Adjustment of current/voltage/power**
- **Save operation**
- **Trigger operation**
- **Menu operation**
- **Protection function**
- **Setting rising time and fall time of voltage**
- **Keylock function**
- **Functions of rear terminals**
- **Analog interfaces**
- **List operation**
- **Sequence operation**

Vlastnosti jsou obdobné zátěži a není nutné je dále rozebírat.

Za vhodné je zmínit základní parametry přístroje a nejistoty měření plynoucí jak z nastavené hodnoty, tak z odměřené veličiny. Dále do chyby zasahuje nepřesnost plynoucí ze závislosti na teplotě.

5.3.2 Paralelní chod

Zdroje jsou schopny sério-paralelního propojení pro navýšení proudového či napěťového výstupu v master-slave konfiguraci. V tomto případě master řídí celkový využitelný výkon všech připojených zařízení.

Bylo snahou využít této funkcionality, avšak konfigurace zdrojů je možná pouze manuálním zásahem do zařízení a není možný softwarový přístup. Z tohoto důvodu není využita. Z hlediska SW je nutné ovládat zdroje jako oddělené jednotky, kde SW je řídicím členem sério paralelního režimu.

5.3.3 Parametry přístroje IT6522A

Parametry zdroje jsou shrnuty v Tab. 11.

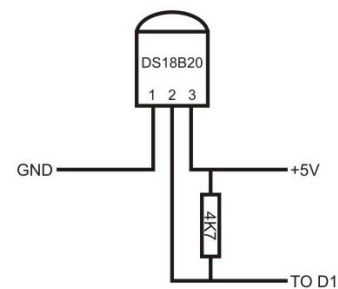
Parametry		IT6522A
Jmenovité hodnoty (0 °C–40 °C)	Napětí	0-80 V
	Proud	0-120 A
	Výkon	0-3000 W
Regulace při zatížení (pro čtyřsvorkové zapojení)	Napětí	<0.05 %+30 mV
	Proud	≤0.1 %+30 mA
Regulace při napájení (pro čtyřsvorkové zapojení)	Napětí	<0.02%+20 mV
	Proud	<0.02 %+10 mA
Nastavitelné rozlišení	Napětí	2 mV
	Proud	3 mA
Rozlišení zpětného měření	Napětí	2 mV
	Proud	3 mA
Chyba přesnosti z nastavené hodnoty (12 měsíců od kalibrace) (25 °C ± 5 °C)	Napětí	≤0.05 %+30 mV
	Proud	≤0.2 %+0.1 %FS
Chyba přesnosti z měření (12 měsíců od kalibrace) (25 °C ± 5 °C)	Napětí	≤0.05 %+30 mV
	Proud	≤0.2 %+0.1 %FS
Zvlnění (20 Hz – 20 MHz)	Napětí	≤80 mVp-p
	Proud	≤120 mArms
Teplotní závislost přesnosti regulace (0 °C–40 °C)	Napětí	<0.02 %+30 mV
	Proud	≤0.05 %+10 mA
Teplotní závislost přesnosti měření	Napětí	<0.02 %+30 mV
	Proud	≤0.05 %+10 mA

Tab. 11: Parametry zdroje IT6522A [27]

5.4 TEPLOTNÍ SENZOR ONE-WIRE (DS18B20)

Teplotní čidlo DS18B20 je často využívaným senzorem zejména z důvodu jednoduchosti zapojení a jednoduché komunikace s mikroprocesorem. Právě tyto senzory se osvědčily v rámci testování LFSEZ a budou tedy podrobeny detailnějšímu popisu.

Je zde využita sériová obousměrná half-duplex sběrnice 1-wire®. Sběrnice je typu „single master“, kdy jedno zařízení je řídicím prvkem a ostatní obvody jsou v režimu „slave“. Přenos dat a napájení je možné realizovat jedním datovým a jedním zemním vodičem.



		Podmínka	MIN	MAX	JEDNOTKA
Napájecí napětí	V_{dd}	Vzhledem k zemi			
Chyba měření	t_{ERR}	-10 °C to +85 °C		±0,5	°C
		-30 °C to +100 °C		±1	
		-55 °C to +125 °C		±2	
Logická úroveň HIGH	V_{IH}		2,2	5,5	V
Logická úroveň LOW	V_{HL}		-0,3	0,8	
Drift			±0,2		°C
Doba odměru	T_{conv}	rozlišení 9-bit		93.75	ms
		rozlišení 10-bit		187.5	
		rozlišení 11-bit		375	
		rozlišení 12-bit		750	

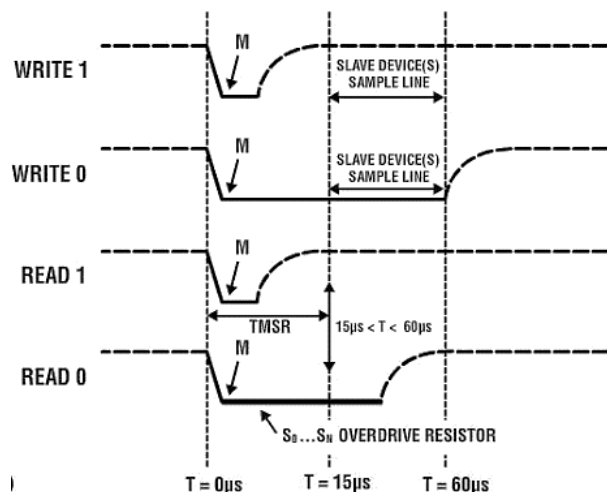
Tab. 12: Parametry senzoru DS18B20

Dle specifikací [30] v rozsahu teplot -10 až +85 °C dosahuje dané přesnosti ±0,5 °C, což zcela vyhovuje daným požadavkům snímání teploty v rámci laboratoře.

Komunikace po jediném datovém vodiči je docílena prostřednictvím rozdělení příkazů do pevných tzv. timeslotů.

Dva jsou určeny pro zápis dat dva slouží pro čtení dat. Typické průběhy timeslotů jsou zobrazeny v Obr. 23.

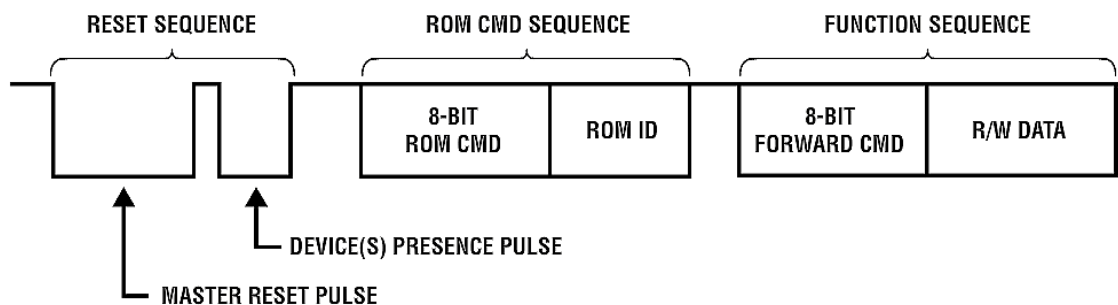
Komunikace je vždy řízena masterem ve třířázkových sekvencích. V prvním kroku dojde k reset pulzu či případné synchronizaci.



Obr. 23: Sada instrukcí pro komunikaci 1-wire [32]

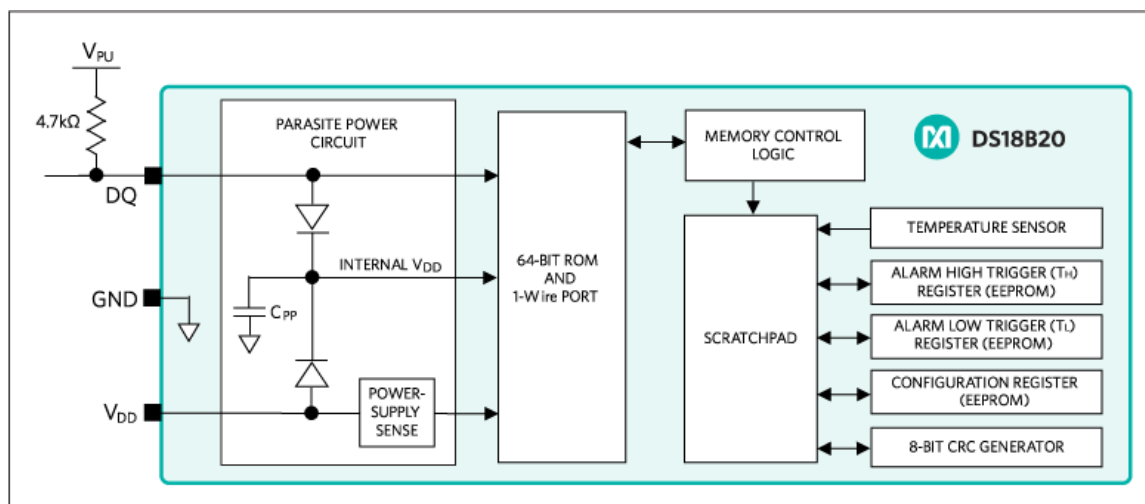
Následuje adresace zařízení tzv. „ROM-Level Command“, kdy může být vyslána plná adresa zařízení. Každé zařízení je definováno svou unikátní 64bitovou adresou označováno jako „ROM ID“. V případě, kdy nejdou známy adresy zařízení na sběrnici, je využíván sofistikovaný algoritmus pro hledání adres.

V poslední části je odeslán definovaný příkaz. V základu se jedná o funkce čtení nebo zápis přepisovatelné paměti („scratchpad“ Obr. 25: Blokové schéma senzoru DS18B20).



Obr. 24: Komunikace po sběrnici 1-wire [32]

Vnitřní kondenzátor slouží k udržení napájení. V případě logické hodnoty ve stavu HIGH dochází k nabití kapacitoru, v logickém stavu LOW napájecí funkci přebírá.



Obr. 25: Blokové schéma senzoru DS18B20 [31]

Pro stabilní komunikaci je využita řídicí jednotka Arduino viz [33]. Pro komunikaci byly využity knihovny `<OneWire.h>` a `<DallasTemperature.h>`.

Pro propojení senzoru se stanicí byl využit čtyřdrátový konektor typ R11.

5.5 PŘÍKAZY SCPI

(STANDARD COMMANDS FOR PROGRAMABLE INSTRUMENTS)

Pro dosažení odpovídající úrovně automatizace pracoviště se nabízí využití SCPI příkazů. Příkazy jsou nedílnou součástí tzv. ATE („automated test equipment“) systémů. Vzhledem k netradičnosti tohoto programovacího jazyka, bude mu věnován lehký popis. Popis je spjat se SW řešením pro programové řízení stanice.

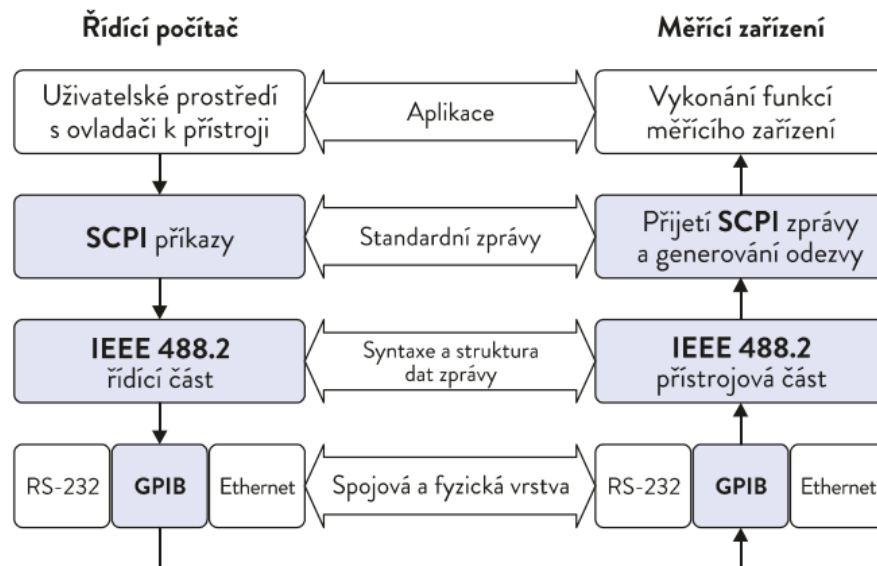
Cílem je popsat, opravdu ve stručnosti, důvod vzniku SCPI příkazů, dále jeho styl značení, a také v základu popsat syntaxi programovacího jazyka. Hlavním přímým zdrojem je příručka vydána v roce 1999 právě svolaným konsorciem pro vytvoření SCPI příkazů [34]. Dalším informačním zdrojem je diplomová práce [35] (Aplikace pro dálkové ovládání přístrojů Rohde & Schwarz), která podává strukturovaný popis pro práci s příkazy.

5.5.1 Vznik SCPI

Pod vedením IEC (Internacional Electrotechnical Commission) bylo svoláno několik nejvýznamnějších výrobců měřicí techniky pod záminkou definování světového standardu pro řízení přístrojů. Na základě tohoto sněmu byl v roce 1975 přijatý standard pod zkratkou IEEE 488, který je také označován jako *General Purpose Interface Bus (GPIB)*. Po nástupu tohoto standardu byl integrován v průběhu let do značné části měřicích zařízení. Dodnes je využívána fyzická podoba komunikačního rozhraní GPIB a patří mezi běžné vybavení společně s dalšími rozhraními, jako jsou sériová sběrnice RS-232, VXI, Ethernet nebo USB. [34] [35]

Nutno zmínit, že první verze IEEE 488 zahrnovala standardizaci z pohledu mechanického a elektrického provedení. V roce 1987 byla vydána nadstavba dnes známá jako IEEE 488.2 *Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands*. Ta nadále pak zahrnovala podobu formátu dat a přesný tvar příkazů pro obsluhu zařízení.

Rozlišení popisu těchto dvou standardů může být jasně rozlišeno zobrazením pomocí síťového modelu (Obr. 26), kdy jsou jasně rozlišeny jednotlivé vrstvy. Prvotní verze IEEE 488 byla řešena pouze na úrovni nejnižší vrstvy (fyzické a spojové).



Obr. 26: Síťový model SCPI převzato [35]

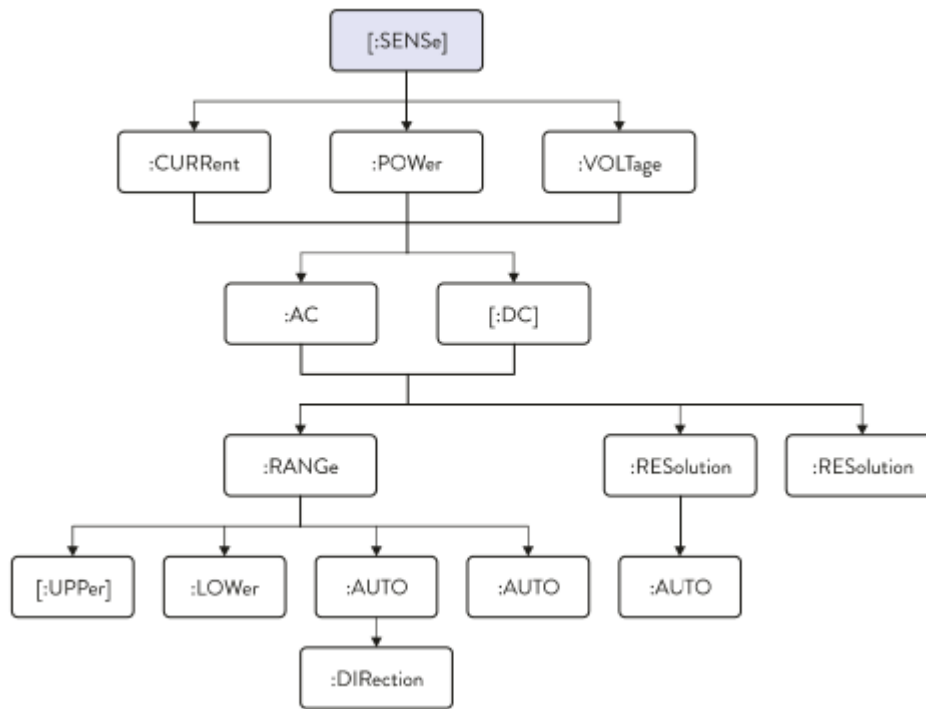
5.5.2 Struktura zpráv

Hlavním účelem zpráv je komunikace mezi řídicím počítačem a měřicím zařízením pro jeho dálkové řízení. Tím je docíleno spolehlivé a kompatibilní komunikace se zařízením bez ohledu na výrobce měřicího přístroje. Univerzálnost se také vztahuje na použití formátu dat, kdy SCPI zprávy odesílané z přístroje mají jednotnou podobu.

Ačkoliv jde o programovací jazyk, je tu značná odlišnost od běžných počítačových jazyků jako (C++, Java nebo Python). Cílem zprávy SCPI není běžný počítač, ale měřicí zařízení. Z pohledu PC jsou zprávy pouhými textovými řetězci ASCII a příkazy nejsou pro něj nikterak čitelné či srozumitelné. PC je pouhým odesílatelem či příjemcem. Obdržené textové řetězce jsou pak srozumitelné pro kontrolér měřicího zařízení, který jen vykoná definovaný příkaz.

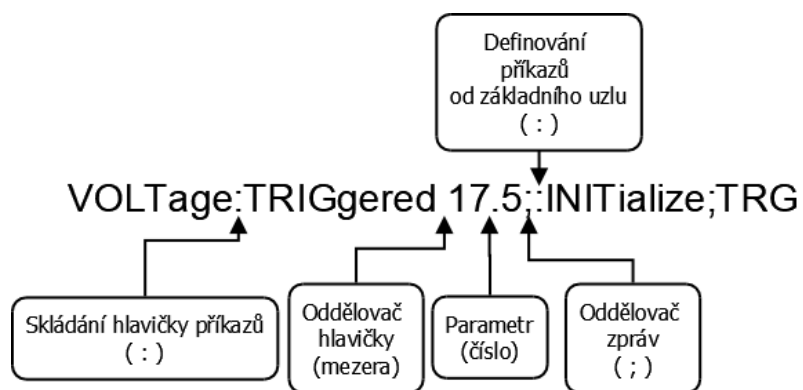
Výhodou je pak univerzálnost, kdy SCPI jsou nezávislé na použitém programovacím jazyku. Komunikaci je možné zprostředkovat například za pomoci Matlabu, Labview, Pythonu nebo dalších jiných rozhraní. Nevýhodou je pak nemožnost ladění příkazů v PC a jediným správným ověřením je testování přímo na měřicím zařízení.

Struktura zpráv je hierarchicky řazena dle stromové struktury. Jedním z příkladů může být struktura pro příkaz sense (viz Obr. 27). Pro jednodušší popis jsou struktury zobrazovány v podobě tabulky.

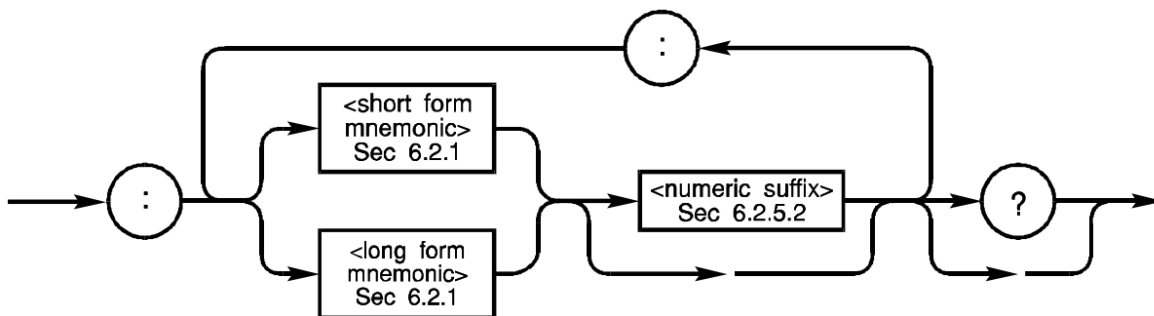


Obr. 27: Hierarchický strom uzlů pod systému SENSE [34]

Pro „pospojování“ cesty ve stromové struktuře je využit symbol dvojtečky „:“ Tím je pak definován úplný příkaz. Algoritmus pro skládání hlavičky příkazů je zobrazen na Obr. 29. Pokud za příkazem následuje číselná hodnota je využíván oddělovač hlavičky (*header separator*) formou mezery. V případě definování několika parametrů v jednom příkazu je využíván oddělovač parametrů (*data separator*) formou čárky „;“. Chceme-li oddělit jednotlivé příkazy, využíváme oddělovač zpráv (*message separator*) ve formě středníku „;“.



Obr. 28: Vzorový příklad SCPI příkazu



Obr. 29: Algoritmus skládání hlavičky příkazů převzato [34]

Skládání hlavičky příkazů je možno využít v případě, kdy cesta příkazu je pro několik koncových uzlů stejná. U prvního příkazu lze uvést cestu od základního uzlu. Pro další příkazy tato cesta zůstane platná. Pokud programátor chce zvolit příkaz z jiné větve nebo zadat cestu od základního uzlu, je nutné resetovat ukazatel předřazením dvojtečky před příkaz. Viz Obr. 28. a Tab. 13.

Cesta od základního uzlu	SENSE:FREQUENCY:START 3e9; :SENSE:FREQUENCY:STOP 5e9
Původní platná cesta	SENSE:FREQUENCY:START 3e9; STOP 5e9

Tab. 13: Stromová struktura SCPI příkazů

5.5.3 Tvar a typy zpráv SCPI

Jednou ze součástí normy jsou formáty dat. Tyto formáty jsou rozděleny na dva základní prvky příkaz (command) a dotaz (query). V prvním případě, kdy se jedná o příkaz, dojde k uložení definované činnosti nebo ke změně určitých parametrů. V případě dotazu je od měřicího zařízení očekávána odpověď v určitém formátu řetězce. Z hlediska syntaxe, je forma dotazu odlišena otazníkem („?“) na konci příkazu.

Tvar příkazů patří do skupiny „key insensitive“, a tedy není nutné rozlišovat velká a malá písmena v příkazech. Tato vlastnost nemusí být zpočátku zcela jasná. Příkazy SCPI jsou vždy psány v kombinaci velkých a malých písmen. Klíčová slova, ze kterých se skládají hlavičky příkazů, mohou být psány ve dvou formách. Například příkaz *SENSE* – celistvá verze (sense) a zkrácená verze (sens). Všechny hlavičky příkazů mají tento podvojný tvar.

6 SOUČASNÝ STAV

Technický vývoj stanice je stále v chodu. Detailnější popis a konstrukce bude rozebrána v následující kapitole.

Na počátku (září 2017) bylo nutné vytvořit veškeré elektrické pospojování, které by zajistilo modulárnost pracoviště z hlediska spolupráce jednotlivých komponent a zajištění bezpečnosti. Stanice byla vybavena následující komponenty.

6.1 BEZPEČNOSTNÍ STYKAČ ALBRIGHT SW204A

Typ SW204A společnosti Albright je elektromagnetický vzduchový stykač vybavený NO/NC pomocnými kontakty. Spínání stykače je ovládáno stejnosměrným napětím 12 V s maximální zatěžovacím proudem pomocných kontaktů 5 A. Je možno spínat přerušované/nepřerušované typy zátěží, odporového, kapacitního i induktivního charakteru. Pro přerušovaný typ zátěže je stykač dimenzován na 250 A vypínacího proudu. Při nepřerušovaném typu zátěže dokáže vypínat proud až 400 A. Jmenovitá hodnota napěťového úbytku na neopotřebovaných kontaktech je 40 mV. [36]



Obr. 30: Stykač Albright SW204A

6.2 NOUZOVÉ STOP TLAČÍTKO

Pro nouzové vypínání stanice je na vrchní desce racku instalováno STOP-tlačítko s aretací. V případě stlačení bezpečností stykač odepne hlavní svorky.

! Poznámka: V případě, kdy zdroj či zátěž není propojena přes hlavní stykač, STOP-tlačítko není aktivní. To je v případě, kdy kabeláž je vyvedena ze svorek s označením *výstup*. Svorky musí být přemostěny pasovinou. (Viz Obr. 32: Svorkovnice S.A.M.3)

6.3 PROUDOVÝ BOČNÍK

Základní proudový bočník 200 A/60 mV je umístěn přímo na výstupu ze stykače. Odtud je pak dále na vyveden na výstup svorkovnice (Obr. 32 a). Udávaná třída přesnosti je stanovena na 0,5 %. Kalibrovaná konstanta bočníku odpovídá $k = 3,4364 \text{ A/mV}$.



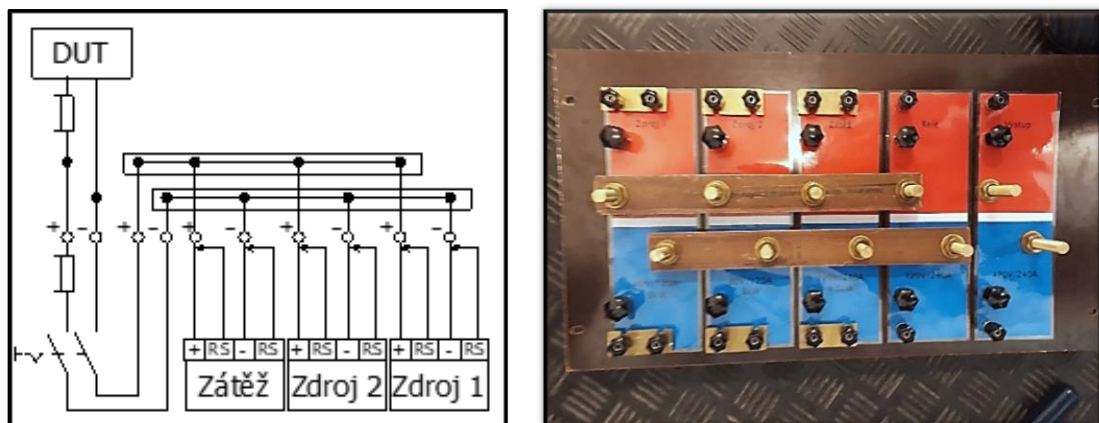
Obr. 31: Proudový bočník 200 A/60 mV

6.4 VÝROBA SVORKOVNICE

Pro možnost pospojování komponent byly vstupy/výstupy vyvedeny na svorkovnici. Svorkovnice pak byla zrealizována dle požadavků na univerzálnost. Na pertinaxovnou desku jsou vyvedeny proudové svorky vždy trojího typu vzájemně spojené, lišící se v maximálním snesitelném proudovém zatížení.

Důvodem je široká škála testovacích vzorků, kdy pro malé akumulátorové články je vhodné použití klasických banánků. V případě vysokokapacitních akumulátorů je nutné využít klasického kabelového oka s průměrem $\varnothing 10$ mm.

Další výstupem na svorkovnici je pak napěťová svorka čtyřsvorkového zapojení (tzv. remote sense). Tu je možné přemostit mosaznou destičkou, tak jak je zobrazeno na Obr. 32, v případě, kdy není nezbytné zavést napěťovou svorku až na pól baterie.



a) Obvodové schéma svorkovnice

b) Finální vzhled

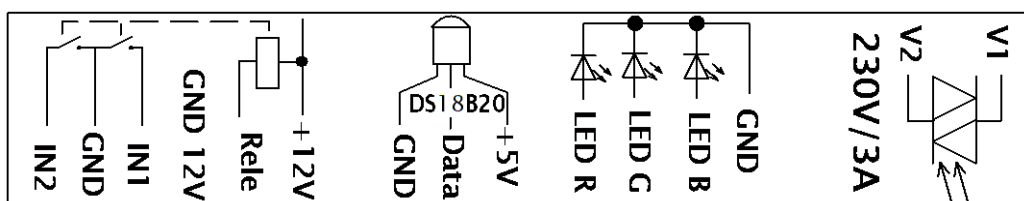
Obr. 32: Svorkovnice S.A.M.3

6.5 ŘÍDICÍ JEDNOTKA ARDUINO NANO

Jádrum jednotky je mikroprocesorová deska založenou na ATmega328. [33].

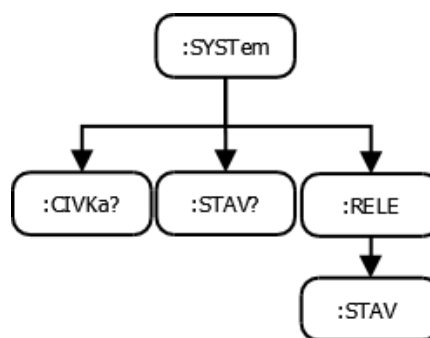
Základní parametry:

- **Digitální I/O piny:** 14
- **Analogové vstupy:** 6
- **krystalový oscilátor:** 16 MHz
- **Konektory:** USB + vlastní napájení
- **Maximální proud pro I/O piny:** 40 mA



Obr. 33: Popisový štítek pro I/O piny řídicí jednotky arduino

Vedoucí této práce provedl nezanedbatelnou část na S.A.M. 3. Její součástí bylo vytvoření samotné řídicí jednotky, která byla následně upravena v druhé verzi pro možnost měření s vícero teplotními senzory. V SW části bylo využito upravené knihovny *Vrekrer_scpi_parser.h* pro komunikaci pomocí SCPI příkazů v jednotce. Příkazy následně regulují čtyři podčásti zobrazovány v popisovém štítku (Obr. 33). V Obr. 34 je vzorově zobrazena stromová struktura od základního uzlu System. Pro stručný popis příkazů je využito zjednodušeného zápisu v textu níže.



Obr. 34: Vzor stromové struktury SYSTEM

Jednotka spíná řídicí signál 12V napájení pomocných kontaktů. V případě sepnutí dochází k ověření zpětnou vazbou, kdy jednotka monitoruje napětí na hlavních spínacích kontaktech (v Obr. 33 vstupní piny IN1 a IN2). Cívka je ovládána následujícími příkazy.

```

// SYSTEM :RELE:STAV #S   Nastavení RELE 0=OFF, 1=ON
//          :STAV?        Stav relé (MOSFET) 0=OFF, 1=ON
//          :CIVKA?       Je relé opravdu sepnuto?
  
```

Díky použité onewire sběrnici bylo možné poměrně snadno aplikovat měření s libovolným počtem teplotních senzorů. Díky unikátním 64bit adresám lze každý senzor jednoznačně odlišit. Vyhledávací algoritmus vyhledá všechny dostupné senzory na sběrnici. Lze pak například analyzovat oteplení celých bateriových modulů. Komunikace následně možná pomocí příkazů:

```
//SENSe      :TEMP?           Čte teplotu čidel Dalas DS18B20
//           :ADDRess?       Vypíše 64bit adresy čidel
//           :TEMPByIndex? #I Čte teplotu jednoho čidla dle přiřazeného indexu
```

RGB led indikuje jednotlivé stavy stanice. V případě chyby dojde k problikávání červeného signálu. Dále pak signalizuje stav stykače. Sepnutí stykače je signalizováno modrou barvou. V případě rozepnutého stavu stykače svítí barva zelená. Příkazy pro komunikaci jsou pak následující.

```
//DISPlay:LED :RGB #R #G #B   Nastavení RGB složek LED R,G,B (0-10)
//           :RGB?           Vrací aktuální nastavení RGB
//           :AUTO #S        Režim, kdy stav kontaktu RELÉ ovládá LED
//                               (0=vypnut, 1=zapnut)
//           :AUTO?         Je LED ovládaná kontakty RELÉ?
//                               (ANO=1,NE=0)
```

O spínání ventilátoru se stará SS relé S202S02. S limitními parametry 8A/600V. [37]
Ovládání ventilátoru je možno pomocí příkazů:

```
//SYSTem:    VENT:STAV #S     Zapnutí/vypnutí větráku 0=OFF, 1=ON
//           :STAV?           Ventilátor je 0=OFF, 1=ON
//           :AUTO #S        Zapnutí automatického režimu ventilátoru
//                               (0=vypnut, 1=zapnut) stav zapnuto (35°C), stav vypnuto (30°C)
//           :AUTO?         Je ventilátor ovládán automaticky? (ANO=1, NE=0)
```

Automatický režim v tomto případě má vyšší prioritu. Pokud je zapnut automatický režim nelze ventilátor ovládat příkazem SYSTem:STAV #S.

6.5.1 Reset jednotky

U jednotky Arduino docházelo opakovaným resetům programu. Připojením nového COM portu k PC docházelo resetování aktuálních proměnných. V případě, kdy byla ukončena sériová komunikace, nastaly stejné obtíže. Příčinou je DTR (data terminal ready) pin, který v případě připojení nového portu či ukončení komunikace dočasně skočí do stavu nízké úrovně. V tomto případě dojde k resetu mikrokontroléru.

Řešení problému je obsaženo na stránkách [38]. Pro řešení situace se nabízejí tři možnosti. V prvním případě se nepodařila SW úprava nastavení DTR pinu. Přímé odstranění R3 rezistoru z DPS nebylo ideálním řešením. V posledním případě se jednalo o dopájení kapacitoru mezi reset pin a zem. Kapacitor následně dokáže napájet reset pin v případě, kdy DTR pin zahlásí stav nízké úrovně.

V případě, kdy nutné nahrát novou verzi programu do mikrokontroleru, je nutný následující postup:

- Stiskněte a držte reset tlačítko
- Pozorujte LED diody RX / TX na desce
- Stiskněte tlačítko upload v prostředí Arduino IDE
- Jakmile LED dioda RX jednou zabliká, rychle uvolněte resetovací tlačítko
- Při dostatečně svižné reakci by mělo dojít ke standartní proceduře nahrávání začetím signalizace kontrolek RX / TX.

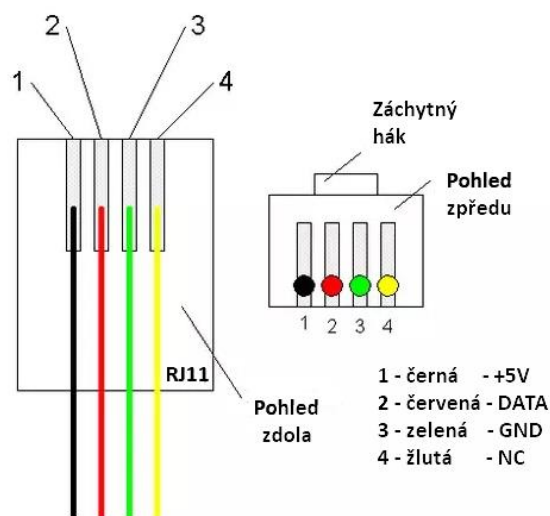
V případě, že IDE (nebo avrdude) vyvolá chybu, stačí o trochu lepší načasování.

6.6 SNÍMÁNÍ TEPLoty

V průběhu vybíjení akumulátorů je elektrická energie konvertována na ztrátové teplo, které musí být řádně odvedeno, pro případ chyby zařízení je vhodné monitorovat teplotu uvnitř racku stanice. Pro tento účel byly vybrány teplotní senzory DS18B20. K popisu senzorů byla věnována kapitola 5.4.

Dále se zde nabízí možnost teplotních měření akumulátorů v průběhu cyklů. Význam vlivů teploty na odlišné typy akumulátorů je popsán v diplomové práci [18]. Využitelnost senzorů byla uplatněna již v předchozích aplikacích.

Původně byl senzor určen pouze pro snímání teploty uvnitř stanice. K této příležitosti byla doprogramována řídicí jednotka, pro snadnou manipulaci sběrnice, byl doplněn 4-vstupový rozbočovač konektorů RJ11 do čela svorkovnice. Podobu rozbočovače je možno nalézt v příloze 10.3.



Obr. 35: Kontaktování senzorů DS18B20 pomocí RJ11

6.7 VENTILACE

Jak již bylo zmíněno v části 5.2, bylo nutné odvézt generované teplo zátěží mimo testovací laboratoř. K tomu bylo sestrojeno ventilační potrubí, které je regulováno řídicí jednotkou. V automatickém režimu je nastavena hystereze, kdy dojde k sepnutí ventilátoru při teplotě 35 °C. V případě poklesu teploty pod 30 °C ventilátor opět vypne. Pro ventilaci byl vybrán ventilátor s kuličkovými ložisky o průměru 100 mm a průtokem vzduchu 105 m³/h se síťovým napájením. [39]



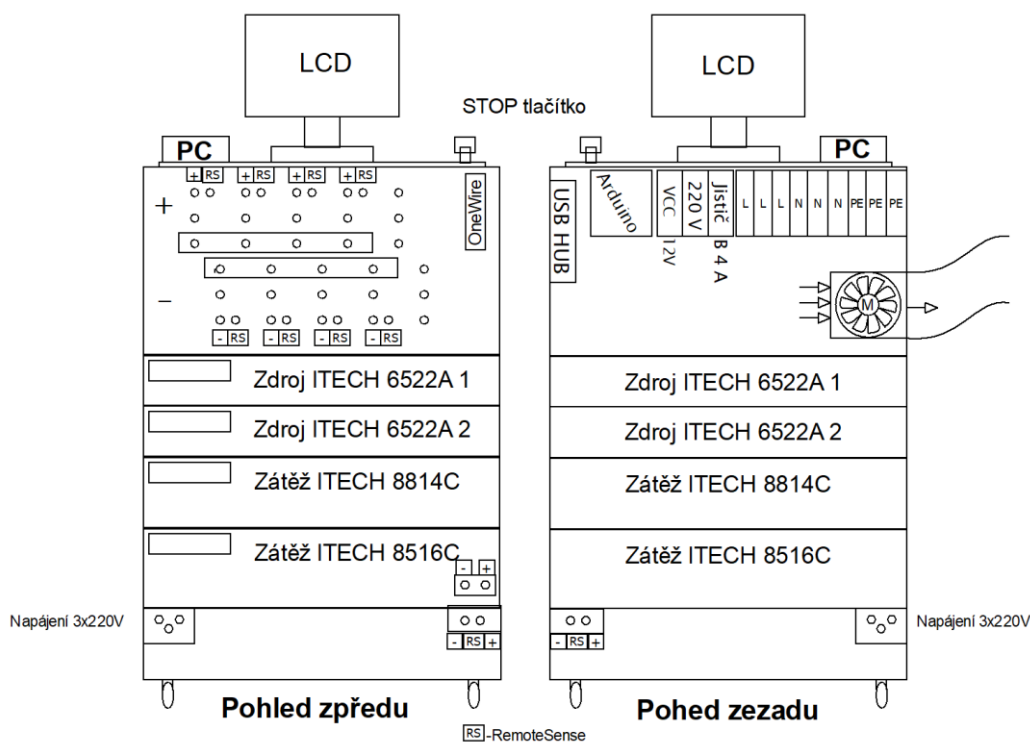
Obr. 36: Ventilátor ø100 mm

Detail ventilačního potrubí je obsažen v příloze 10.1. Kontakt s ústím odsávání je upevněn pomocí neodymovým magnetů. Odtah vedení je pak veden do venkovní fasády.

6.8 ŘÍDICÍ POČÍTAČ

PC slouží pro správu dat a programovatelnost stanice v prostředí Labview. Jednou z částí této práce je úprava vytvořeného softwaru navrženého v bakalářské práci autora [1], kterým je možno řídit cyklovací proces elektrochemických článků. Tento úkol byl potvrzením, že navržený systém v bakalářské práci byl modifikovatelný na další typy přístrojů.

V současné době je navržen systém, jak pro správu a identifikaci článků, řízení jednotky arduino pomocí příkazů SCPI, tak pro měřicí metody cyklování článků s připojenými multimetry Agilent 34410A, ale také i bez nich.



Obr. 37: Schéma stanice S.A.M. 3

7 LABVIEW APLIKACE PRO AUTOMATICKOU PARAMETRIZACI ČLÁNKŮ

Aplikace byly vytvořeny pro použití výzkumných účelů a také pro možnost případného měření pro zákazníky LFSEZ. Na základě porovnání v částech **2.1.2** Ampérhodinové zkoušky [14] a **2.2**. Komplexní testování trakčních lithium iontových akumulátorů [19] bylo možné shrnout testovací požadavky na stanici a vyhodnotit vhodnost aplikací.

Pro splnění některých testů dle norem ČSN, které jsou shrnuty v části **2.1.2** Ampérhodinové zkoušky [14], by bylo nutné zřídit temperovanou vodní lázeň, která v současné době ještě není realizována. Testy prováděné při laboratorní teplotě jsou plně k dispozici. Laboratoř byla navíc doplněna o klimatizační přenosnou jednotku. Tím je snížena pravděpodobnost teplotních výkyvů, jak v průběhu ročních období, tak generovaného tepla zátěží.

7.1 KAPACITNÍ MĚŘENÍ

V úvodu byla zmínka o tom, že hlavním stavebním článkem je vytvořená aplikace pro cyklování akumulátorových článků se zaměřením na vyhodnocení ampérhodinové a watthodinové kapacity a následným stanovením jak coulombické, tak energetické účinnosti.

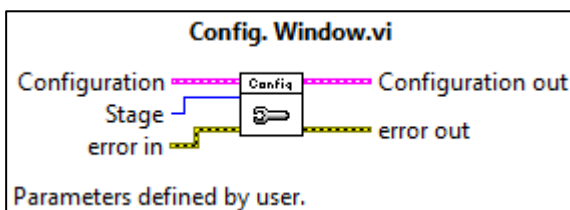
Cílem je snadné a přehledné ovládání s jasnými výstupními hodnotami měření. Přístroje poskytovaly vlastní program pro obdobné využití, avšak docházelo častému selhání běhu programu. Data nebyla jasně zaznamenána a nebylo možné případných úprav pro další účely laboratoře.

Aplikace je jednoduchým stavovým automatem, která prochází stavy inicializace, konfigurace, změny nabíjecího/vybíjecího stavu, bloku pro měření, ukládání dat, analýza dat, stavu nečinnosti a ukončovací operace. Popisy jednotlivých stavů jsou obsaženy v bakalářské práci autora [1]. V každém odpovídajícím kroku jsou následně vykonány potřebné operace.

Operace lze rozdělit do tří základních funkčních celků:

- komunikace s přístroji
- práce s datovými soubory
- operace s GUI (Graphical User Interface)

Všechny funkční bloky tzv. VIs jsou komentovány v nápovědě. Zapnutím okna nápovědy, přiblížením kurzoru myši k příslušnému bloku se zobrazí název subVI a popis daného bloku.



Obr. 38: Context Help

Následující část bude zaměřena na samotný průběh a generované výsledky vytvořené aplikace a jejího GUI. Hlavní struktura byla zachována a dokumentována v [1]. Naopak do programu byly zapracovány další funkční bloky, které rozšiřují její použitelnost.

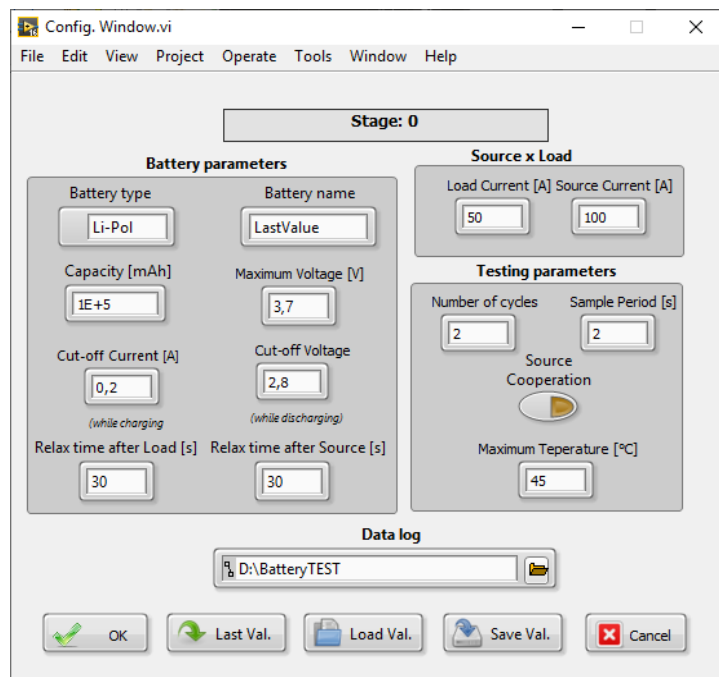
Záměrně nedošlo k vygenerování EXE aplikace pro samostatný běh. Spouštění aplikace pomocí celého projektu dává určitou volnost pro vytvoření například celé knihovny v Labview, která by sjednocovala řízení jednotlivých periférií právě pomocí Labview.

7.1.1 Configuration window

V prvním kroku po spuštění aplikace je nutné definovat parametry měření. Pro tento krok se automaticky načte dialogové okno s nastavením testovacích parametrů (viz Obr. 39).

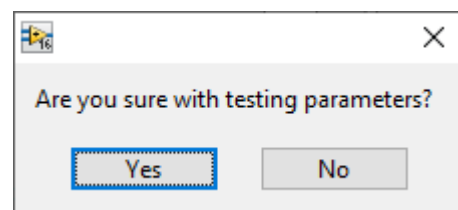
V případě volby *Battery type* je možné předdefinovat napěťové rozsahy pro jednotlivé typy článků.

Po spuštění měření je pak uložen soubor shrnující informace o nastaveném měření pro opakovatelnost pokusu. Forma zápisu souboru je ve formátu XML.(viz 7.1.3 Předdefinované testovací parametry)



Obr. 39: Nastavení testovacích parametrů

Hodnoty je možné následně upravovat dle požadavků. V případě kliknutí na tlačítko *Last Value* dochází k načtení nastavení, které bylo konfigurováno naposledy při posledním běhu testu. V případě, že předdefinované parametry uložené v souboru požadujeme přepsat je zde k dispozici tlačítko *Save Values*.



Obr. 40: Potvrzovací dialogové okno config. window

V okně je možno spravovat testovací parametry vzorků. Pomocí tlačítek *Save* a *Load* je možno spravovat testovací XML soubory pro přehlednou správu záznamech o měření.

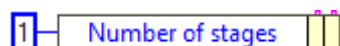
Kliknutím tlačítka *OK* nebo potvrzením tlačítkem klávesnice *Enter* se zobrazí druhé dialogové okno se sekundárním potvrzením (Obr. 40). Důvodem je zvýšení bezpečnosti měření a zabránění nechtěnému spuštění testu, které by mohl vést k nenávratnému poškození vzorku.

7.1.2 Stages (přenastavení parametrů měření)

Běžným testovacím požadavkem bývají zatěžovací testy s obvyklým proudovým zatížením okolo 1C, dále pak kapacitní testy, kdy při nízké hodnotě proudového zatížení (0,1C a níže) jsou akumulátory cyklovány pro dosažení maximální hodnoty kapacity.

Aby nebylo nutné testování vícekrát konfigurovat, aplikace dokáže nastavit N testovacích setů s odlišnými parametry (tzv. Stages). Configuration window v tomto případě proběhne N-krát po sobě s příslušně očíslovaným pořadím (Viz Obr. 39– **Stage:0**)

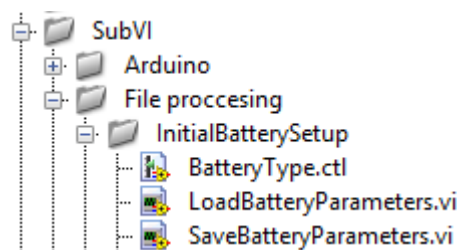
Počet těchto průchodů je možno definovat v hlavním blokovém diagramu (*Kapacitní měření AGIT- main.vi*) Na samotném počátku diagramu proměnou proměnné *Number of stages*.



7.1.3 Předdefinované testovací parametry

7.1.3.1 Typ akumulátoru (battery type)

Předdefinované úrovně napětí pro testování je možno upravovat na základě datového typu Type Def. Enum s názvem **BatteryType.ctl**, který možno nalézt v projektu pod umístěním **Project SAM3 EV-> Type Def.-> BatteryType.ctl**.



Obr. 41: Umístění Load/SaveBatteryParameters

Pokud je vytvořen nový typ v **BatteryType.ctl**, je možné vytvořit nový parametrizační soubor adresovaný v paměti dle umístění aplikace (application directory) ve složce **BatteryParameters** ve formě XML formátu. Vzor formátu je obsažen v příloze **10.1**. Podrobnější návod je obsažen v projektu.

K ukládání či načítání parametrů je slouží **Load/SaveBatteryParameters.vi** (Obr. 41).

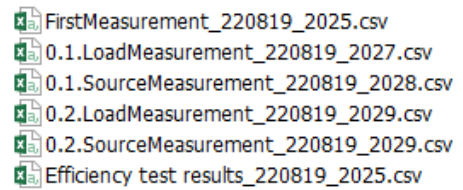
7.1.3.2 Parametry akumulátoru (battery parameters)

Parametry akumulátoru, tedy kompletní vstupní informace o měření, které jsou obsaženy v configuration window jsou ukládány společně se spuštěným měřením. Složka se uloží na stejnou adresu jako měřená data. Tedy dle udávané adresy v **DataLog** v configuration window dle Obr. 39: Nastavení testovacích parametrů.

Uložené datové soubory jsou ve formátu XML. Pomocí aplikace **Config. Window** je možné soubory nahrávat, ukládat a dále spravovat.

7.1.4 Ukládání měřených dat

Ukládání je zajištěno do textových souborů s koncovkou .csv („Comma-separated values“). Jako oddělovací znak je použit středník (;). V každém cyklu je vytvořen nový soubor, do kterého jsou data soustavně ukládána. Na konci cyklu je proveden výpočet hodnot, který je zapsán na poslední řádky tabulky dat.



Obr. 42: Vzor setu souborů pro kapacitní měření

Po úspěšně dokončeném testu je vytvořen soubor se shrnující zprávou o měření *Efficiency test results*.

Celý set souborů (Obr. 42) je ukládán do nově vytvořené složky s názvem odpovídající zvoleného názvu vzorku *Battery name*. V případě kolize s existujícím souborem je název doplněn o časový údaj ve formátu *Battery name_YYMMDD_HHMM*. Pro vyšší přehlednost jsou navíc testovací soubory označeny časovým štítkem.

Vzorové příklady obsahu souborů je možné nalézt v příloze v části **10.3**.

7.1.5 Hlavní rozhraní

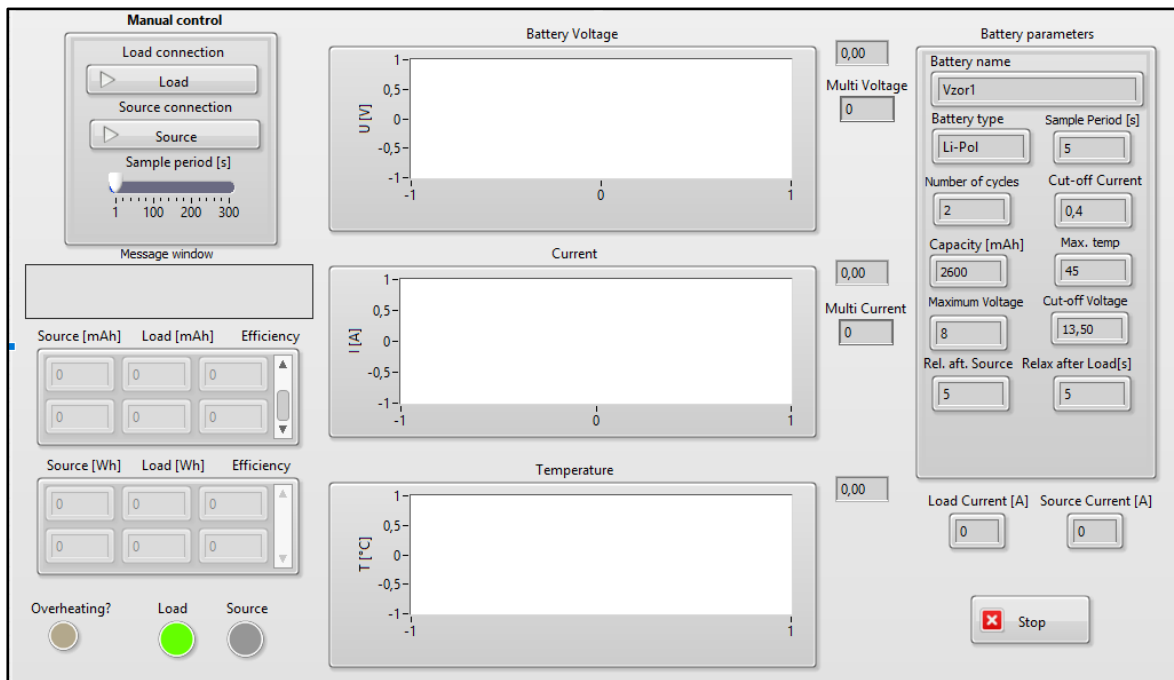
Hlavní okno programu lze rozdělit na několik částí.

V pravé části jsou nastavené parametry uživatelem, dle kterých testovací cyklus běží.

Naměřená data jsou zobrazována do grafů ve střední části okna. Pro přehlednější orientaci byly zvoleny tři nezávislé grafy, které informují o postupném průběhu teploty, proudu a napětí. V obrázku Obr. 43 si lze povšimnout proměnných *Multi Voltage*, *Multi Current*. Tyto veličiny podávají informaci o záznamu z měřicích multimetrů Agilent 34410A. V případě, že jde o sestavu měření, kdy jsou připojeny také multimetry. O typech konfigurací již pak dále v části 7.1.6 (Typy konfigurací SAM3).

V levé části okna je pak informace o aktuálním stavu. Signálky v dolní části informují o aktuálním stavu nabíjení/vybíjení. O něco výše je tabulka, která podává informaci o již dodané /vydané energii z akumulátoru a výsledné účinnosti plného cyklu. *Message window* pak následně informuje o dalších stavech testování jako například zda testování bylo již dokončeno nebo číslo cyklu, který právě probíhá.

Pro možné budoucí účely je zde panel pro manuální ovládání s upravitelnou vzorkovací periodou či přepínáním stavů mezi zdrojem a zátěží.



Obr. 43: Hlavní okno programu pro kapacitní měření

7.1.6 Typy konfigurací SAM3 pro kapacitní měření

V průběhu vytváření stanice bylo třeba SW úprav pro měření s přístroji, které jsou pravidelně kalibrovány. V tomto případě bylo vhodné využít dvou multimetrů Agilent 34410A, které již byly aplikovány v [1] s využitím proudového bočníku. Aplikaci je možné nastavit do následujících režimů.

- **POUZE ITECH**
- **POUZE MULTIMETRY AGILENT**
- **KOMBINOVANÝ REŽIM ZDVOJENÝ ZÁZNAM**

Nastavení režimů je možné v blokovém diagramu pod proměnou **Meas.Type**

Meas.Type OnlyIT

7.2 ZOBRAZENÍ DAT (DATA ADJUST)

Naměřená data je možno číst v aplikaci s názvem *Data Adjust*. Aplikace byla vytvořena pro rychlé zobrazení libovolného počtu naměřených cyklů.

Během měření se pro přehlednost jednotlivé cykly zapisují do samostatných souborů. Pro snadnější zpracování dat byla napsána tato jednoduchá aplikace pro zpracování dat. Program propojí jednotlivé cykly, dle návaznosti. Ty je možné okamžitě vykreslit do grafu dle zvolené veličiny v okně **U/I/C**. Hlavní okno pro aplikaci je možno nalézt v příloze **10.7**.

7.3 SPRÁVA TEPLOTNÍCH SENZORŮ

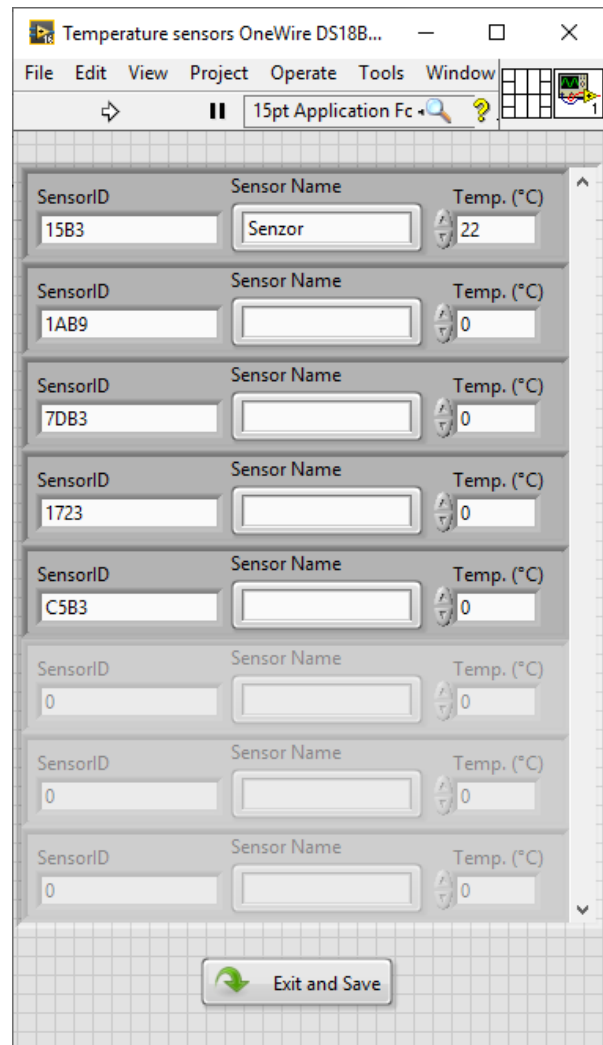
Na sběrnici onewire je možné připojit libovolné množství teplotních senzorů DS18B20. Limitujícím faktorem je pouze velikost kapacity a odporu přívodních vodičů ovlivňující časovou konstantu. Sběrnice je programově omezena na 15 senzorů.

Tato vlastnost je velmi vhodná pro měření oteplení jednotlivých částí bateriového článku či celého modulu. Z tohoto důvodu byla stanice upravena. Řídící jednotka Arduino byla doprogramována pro čtení libovolného počtu senzorů.

Díky unikátním 64-bitovým adresám každého z čidel je možné jednoznačně senzory identifikovat. Pro snadnou orientaci mezi senzory byla vytvořena další aplikace pro správu teplotních senzorů DS18B20 s názvem *Read temp-Mani.vi*.

Aplikace vyčítá pomocí SCPI příkazů informace o aktuálně připojených zařízeních na sběrnici a jejich teplotě. Každý senzor je možné libovolně pojmenovat dle potřeby. Názvy přiřazené jednotlivým senzorům jsou pak následně po stisknutí tlačítka *Exit and Save* uloženy ve formátu XML do souboru s názvem OneWireSensorList, aplikace je ukončena.

Při dalším běhu aplikace automaticky přiřadí zvolené názvy již dříve připojeným a pojmenovaným senzorům. Takto pojmenované senzory je následně možno využít při kapacitním měření. V počátečním běhu aplikace **7.1. Kapacitní měření** je zjištěno počet připojených senzorů. Zjištěná jména senzorů jsou pak zapsána v souboru o měření a jejich teploty jsou pravidelně odečítány společně s dalšími veličinami.



Obr. 44: Správa teplotních senzorů onewire

7.4 MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU DLE ČSN

7.4.1 Pokyny pro měření vnitřního odporu

1. Plně nabitá baterie je v prvním kroku měření vybíjena proudem 0,4CA po dobu 20 s
2. Poté je při tomto zatížení změřeno první napětí na svorkách U_1 a proud I_1
3. Zátěž je odpojena
4. Po regenerační době 5 min je baterie zatížena proudem 2CA a po 5 s při zatížení změřeno druhé napětí U_2 a proud I_2
5. Z rozdílu napětí a proudů je vypočtena hodnota vnitřního odporu

$$R_v = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} \quad [\Omega] \quad 6)$$

Měření má probíhat při teplotě $25 \pm 3^\circ\text{C}$, jinak je třeba provést teplotní korekci napětí.

Metodami zabývající se způsobům provádění zkoušek dle norem ČSN se zabývají akademické práce [14] [5]. Měření vnitřního odporu je základním parametrem diagnostiky. Bylo tedy nezbytné vytvořit SW řešení pro automatické stanovení vnitřního odporu dle ČSN normy.

Aplikace byla vytvořena na základě stavového automatu. S využitím klasického vzorového projektu dostupného v Labview. Vzhledem k jednoduché logice není nutné program podrobněji popisovat. Jednotné kroky následují dle 7.4.1, které jsou implementovány ve spojení s komunikací zátěže. Aplikaci je možné nalézt pod názvem *InternalResistance-Main.VI* v projektu SAM3.

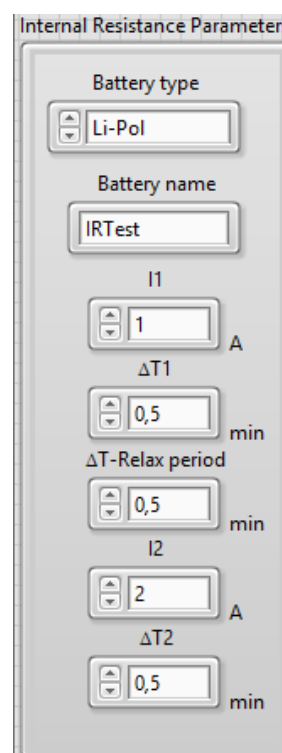
Vytvořené GUI je přiloženo v příloze v části 10.8. Na základě pokynů ČSN je možné pro měření volit časové intervaly ΔT_1 , ΔT_2 , které určují doby zatížení proudem I_1 a I_2 . ΔT – Relax period pak definuje regenerační doby mezi zatíženími.

Po uskutečnění měření jsou naměřená data zapsána do souboru ve formátu csv dle vzoru:

Vzor: InternalResistanceTest-BatteryName_YYDDMM_HHMM

Příklad názvu: InternalResistanceTest-IRTest_190830_1804.csv

Strukturu samotného CSV souboru je pak možné nalézt v příloze s 10.4



Obr. 45: Parametry pro měření vnitřního odporu IR

7.5 IMPULZNÍ DIAGNOSTIKA

Na základě části 2.1.1 bylo možné aplikovat měření pomocí impulzní metody dle vlastností přístrojů popsaných v části 5.1 a 5.2.

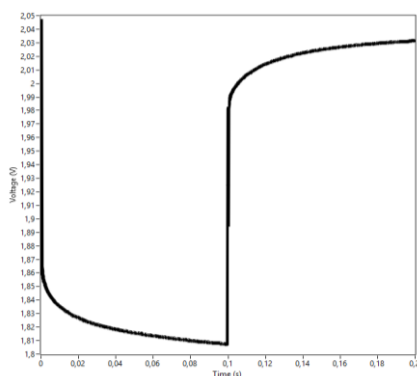
7.5.1 Princip měření

Pro impulzní diagnostiku byly využity dynamické parametry zátěže. V tomto případě byl využit pulzní mód s předem definovanou délkou pulzu. Testování bylo zacíleno na dosažení mezních hodnot zátěže pro co možná nejpřesnější záznam přechodného děje.

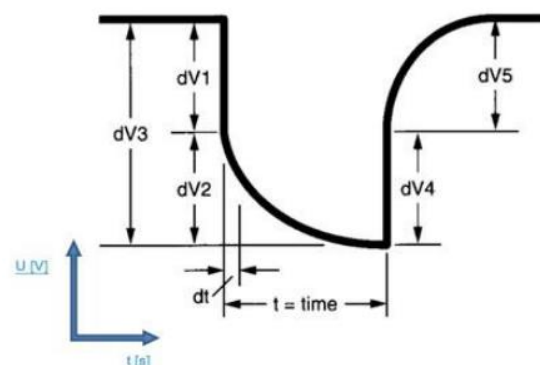
Omezujícím faktorem byla velikost vnitřního bufferu zátěže, která je schopna uchovat maximálně 1000 vzorků. Dále pak maximální vzorkovací frekvence vnitřního bufferu je omezena hodnotou 5 kS/s.

Na základě těchto parametrů byl zvolen testovací pulz konstantního proudu. Zatížení po dobu 0,1 s a dále pak 0,1 s pro stav relaxace. Proudová strmost zátěže je závislá na zvoleném rozsahu dle Tab. 3: *Dynamické parametry zátěže IT8814C*. Při nízkém zvoleném rozsahu je maximální proudová strmost 0,25 A/μs, pro vyšší rozsah je to 2,5 A/μs s minimální dobou náběhu 60 μs.

Na popis impulzní diagnostiky byla soustředěna diplomová práce Ing. Tomáše Reichla [5], která měla za úkol rozpoznat vícero parametrů z naměřeného pulzu. Autor se věnoval teoretickému základu, které aplikoval ve dvou experimentálních metodách. Měřicí metody v diplomové práci nedosahovaly dostatečně rychlých záznamů a nebylo možné vyhodnotit celý pulz. Díky výše popsaným přístrojům tato metoda nyní může být vylepšena. Kompletní průběh pulzu je možné zaznamenat se vzorkovací frekvencí 5 kS/s.



Obr. 46: Vzor naměřeného pulzu



Obr. 47: Ukázka zatěžovacího pulzu dle [3] [5]

Cílem pulzní diagnostiky je rozlišení vnitřního odporu a polarizační složky děje. Vnitřní odpor je úměrný přepětí dV1 a dV4, zatímco míra polarizačních dějů je dána přepětím dV2 a dV5. Teoretická část kapitoly 3. (*Elektrostatické modely elektrodového rozhraní*) nám dávají představu o polarizačních procesech udávající se na elektrodě. Míra polarizačních procesů by mohla mít vliv na aktuální stav akumulátorového článku.

7.5.2 Popis aplikace

Podoba samotného GUI je přiložena v příloze v části **10.9**. Každé konfigurovatelné okno (viz Obr. 48) je doplněno nápovědou stejným způsobem jako je zmíněno u Obr. 38: Context Help, pro detailnější dokumentaci. V následujících řádcích bude zmíněno pouze základní nastavení, které bylo využito při měření.

Number of points udává počet uložených hodnot v zásobníku (bufferu) zátěže. Maximální velikost bufferu je v tomto případě 1000 hodnot. **Storage type** rozhoduje, pokud budou ukládány hodnoty napětí či proudu. Vzhledem velmi prudké strmosti proudu v rámci desítek mikrosekund, můžeme považovat průběh za skokovou změnu viz Obr. 49. **Time interval** definuje vzorkovací periodu. Buffer strádá data až do naplnění konfigurovaného zásobníku. Doba měřeného pulzu je pak dána součinem

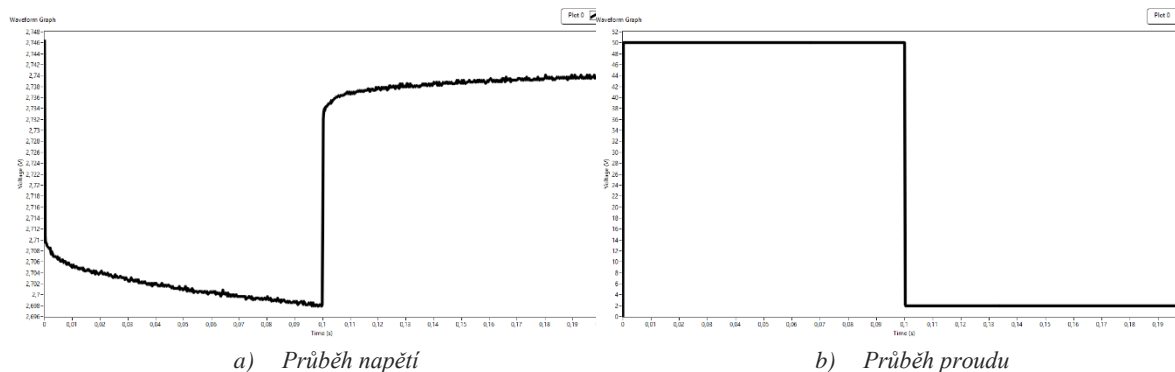
$$\text{Number of Points} \times \text{Time Interval}. \quad 7)$$

Jak bylo vysvětleno v části **5.1.2.1**, pulzní mód přepíná mezi testovací úrovní **A** a ustálenou hodnotou **B** po uplynutí definovaného časového intervalu **Pulse Width**. **B Level value** je tedy hodnota zatěžovacího proudu, která je nastavena po uplynutí časového intervalu **Pulse Width**.

Transient Type v našem případě byl testován pouze v režimu konstantního proudu tak jak je navrhováno v literatuře [5]. V části **5.1.2** bylo zmíněno že, zátěž je schopná režimů CC, CV, CR, CW. Průběh testovacího pulzu v těchto režimech by mohl být také předmětem dalšího testování.

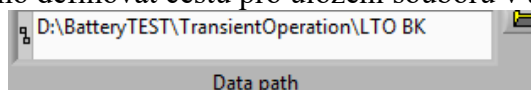
Load current (I_{LC}) udává velikost proudového zatížení. Dle počtu **Test cycles** je proveden odpovídající počet pulzů. Velikost proudového zatížení potom narůstá s každým cyklem přímo úměrou se součinem:

$$I_{zILC} = I_{Load\ Current} \times i_{Test\ cycle}. \quad 8)$$

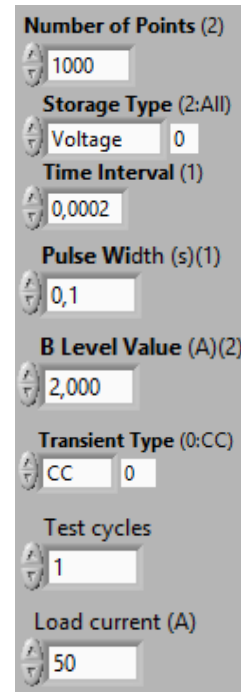


Obr. 49: Porovnání průběhu napětí a proudu při proudovém impulsu

Jako poslední krok je nutno definovat cestu pro uložení souboru v adresáři.



Obr. 50: Data path pro impulzní měření



Obr. 48: Parametry impulsu

7.5.3 Testované vzorky

V rámci testování byly zvoleny následující vzorky:

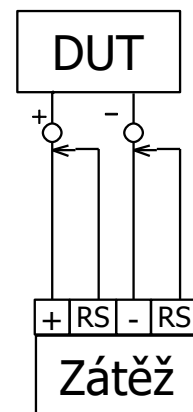
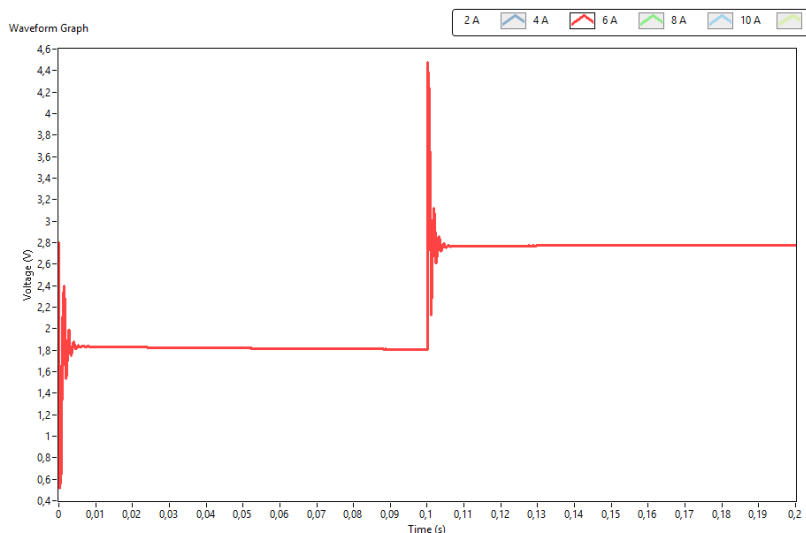
- **Ni-Cd baterie Ferak KPL10 10Ah/1,4V [40]**
- **Olověná baterie Graupner 10Ah/2V (Datasheet nenalezen)**
- **LTO baterie Headway HW 38120S 10Ah/3,7V [41]**

Vzorky byly vybrány pro odlišení rozdílů jednotlivých chemických složení se shodnou ampérhodinovou kapacitou.

7.5.4 Parametry impulzu

Kromě již zmíněných parametrů, každý článek byl testován testovacími pulzy se zatěžovacím proudy 2 A, 4 A, 6 A, 8 A, 10 A při stavu plného nabití.

V případě, kdy nebyly aktivovány napěťové svorky, označené jako RS (Remote Sense), docházelo k nežádoucím záskmitům (viz Graf 1). Problém byl způsoben špatnou SW konfigurací. Tato chyba byla detekována i v dřívějších měření je vhodné na toto upozornit.



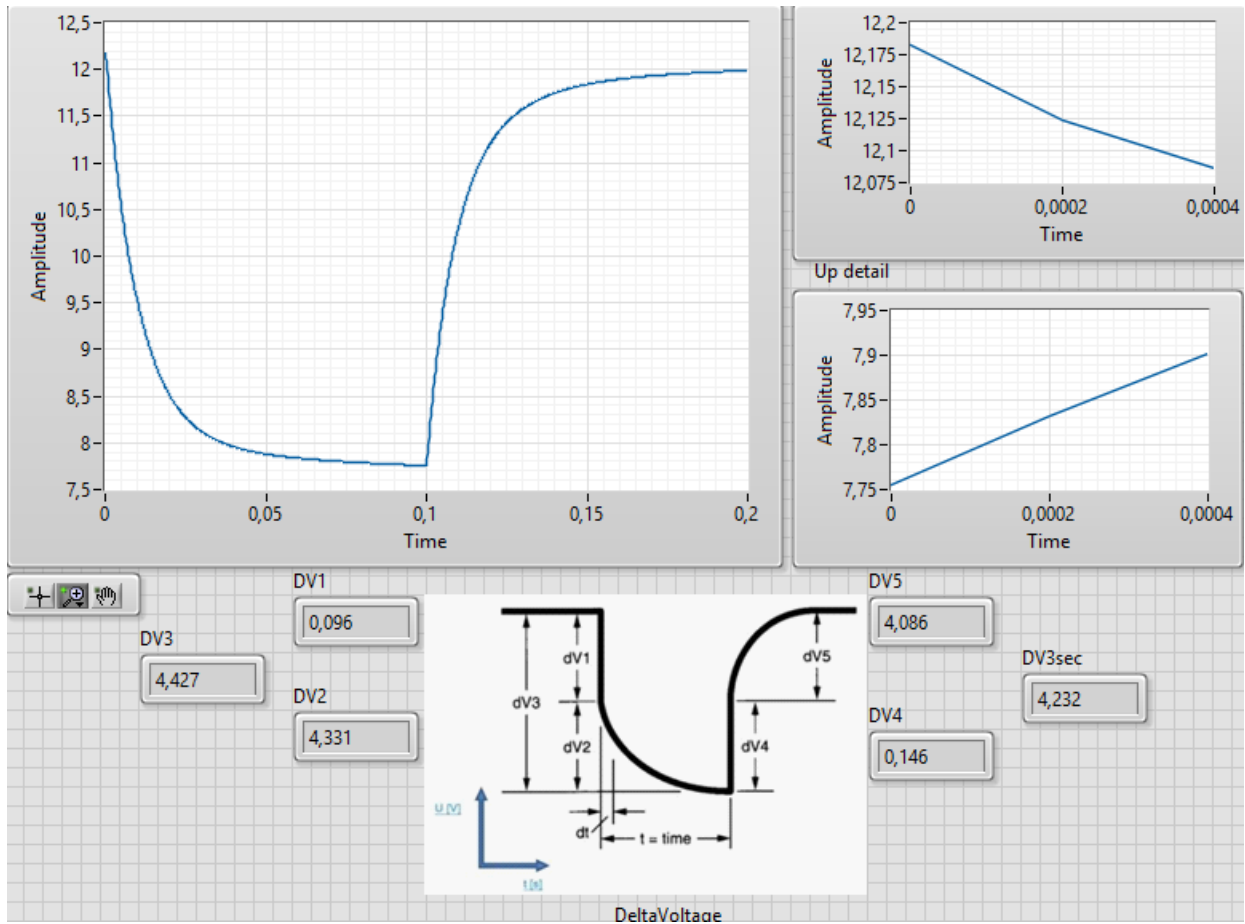
Obr. 51: Schéma zapojení

Graf 1: Záskmity při vypnutém Remote sense

Pro vyhodnocení naměřených pulzů byla využita aplikace TO_ReadData-Main.vi, která je součástí projektu v podsložce Transient Operation

Příkladem vyhodnocení naměřených pulzů by mohl být průběh zobrazený v Obr. 52.

Jedná se o vyřazený olověný akumulátor s téměř nulovou kapacitou. Míra polarizační složky je zde uplatněna v převážné míře. Napěťový pokles $dV1$ není téměř uplatněn.



Obr. 52: Vyhodnocení měření dle TO_todVpulse.vi článku PB12V1,2 Ah 4 A

7.5.5 Naměřené hodnoty

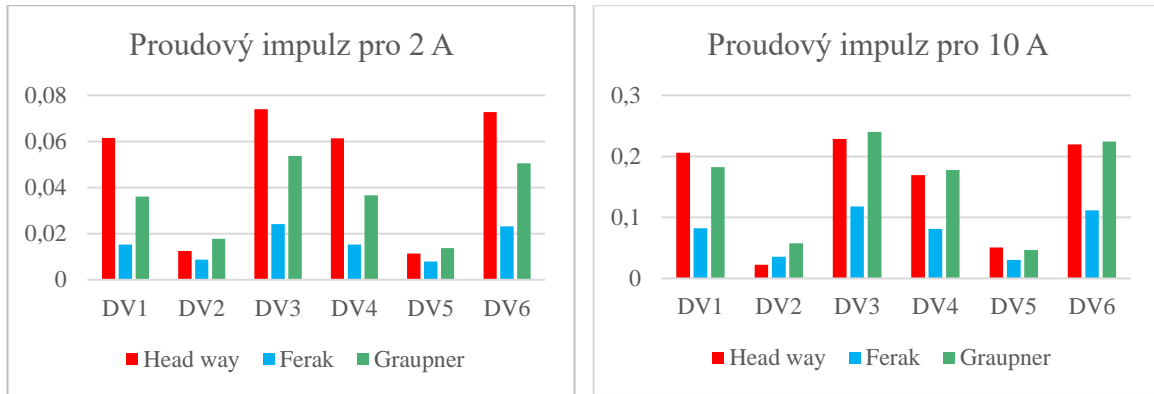
Naměřené průběhy impulsu jsou přiloženy v příloze v části **10.9.1.**

Head way						
	Přepětí (V)					
I (A)	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6
2	0,0615	0,0125	0,074	0,0614	0,0114	0,0728
4	0,1309	0,0135	0,1444	0,1199	0,0211	0,141
6	0,1826	0,0009	0,1835	0,1465	0,0318	0,1783
8	0,1989	0,0076	0,2065	0,1588	0,0409	0,1997
10	0,2059	0,0226	0,2285	0,1691	0,0505	0,2196
Ferak						
	Přepětí (V)					
I (A)	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6
2	0,0153	0,0088	0,0241	0,0153	0,0079	0,0232
4	0,0312	0,0165	0,0477	0,0315	0,0138	0,0453
6	0,0474	0,0242	0,0716	0,0481	0,0195	0,0676
8	0,0645	0,0303	0,0948	0,0645	0,0254	0,0899
10	0,0823	0,0355	0,1178	0,0814	0,0303	0,1117
Graupner						
	Přepětí (V)					
I (A)	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6
2	0,0361	0,0177	0,0538	0,0367	0,0138	0,0505
4	0,0731	0,0303	0,1034	0,0722	0,0239	0,0961
6	0,1086	0,0413	0,1499	0,1074	0,0321	0,1395
8	0,1453	0,0498	0,1951	0,1422	0,0398	0,1820
10	0,1823	0,0578	0,2401	0,1777	0,0468	0,2245

Tab. 14: Hodnoty generované na základě TO_todVpulse.vi dle naměřených pulzů

*Hodnota DV6 je dána jako $dV6 = dV4 + dV5$

7.5.6 Vyhodnocení měření



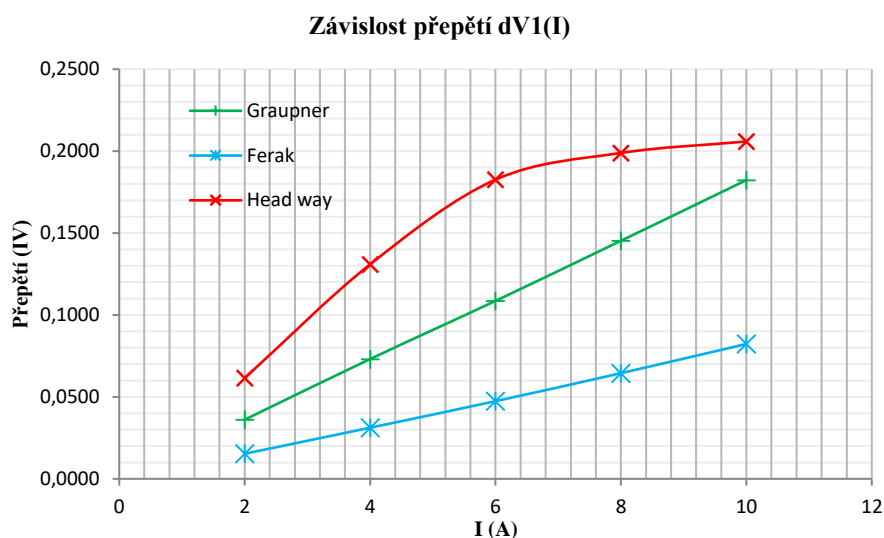
Graf 2: Proudové impulzy se zatížením 2 A a 10 A

Pro porovnání přepětí byly vybrány zatěžovací pulzy pro 2 A a 10 A, kde byly očekávány výraznější rozdíly. Na základě popisu v kapitole 2.1.1 Obr. 2, je možné, že s nárůstem zatěžovacích proudů dojde k výraznějším projevům aktivační a koncentrační polarizace. V tomto případě je nutné připustit nedostatečnou znalost pro stanovení odpovídající hloubky pulzu.

V grafech Graf 2 a,b jsou porovnány jednotlivá přepětí dV1-6. Je zde viditelná symetrie, kdy přepětí dV1, dV2 a dV3 odpovídají (Obr. 47) (Ukázka zatěžovacího pulzu dle) mají být symetrické s přepětími dV4, dV5 a dV6.

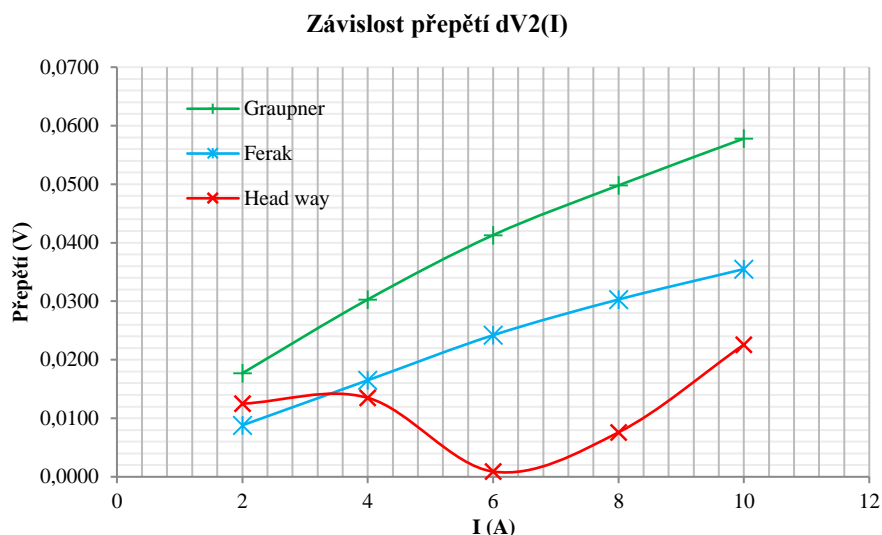
Ačkoliv pro vzorky olověného a Ni-Cd akumulátoru toto platí, LiFePO články Headway vykazují odlišnosti.

Závislosti přepětí dV na velikosti proudu I



Graf 3: Závislosti přepětí dV1 na velikosti proudu I

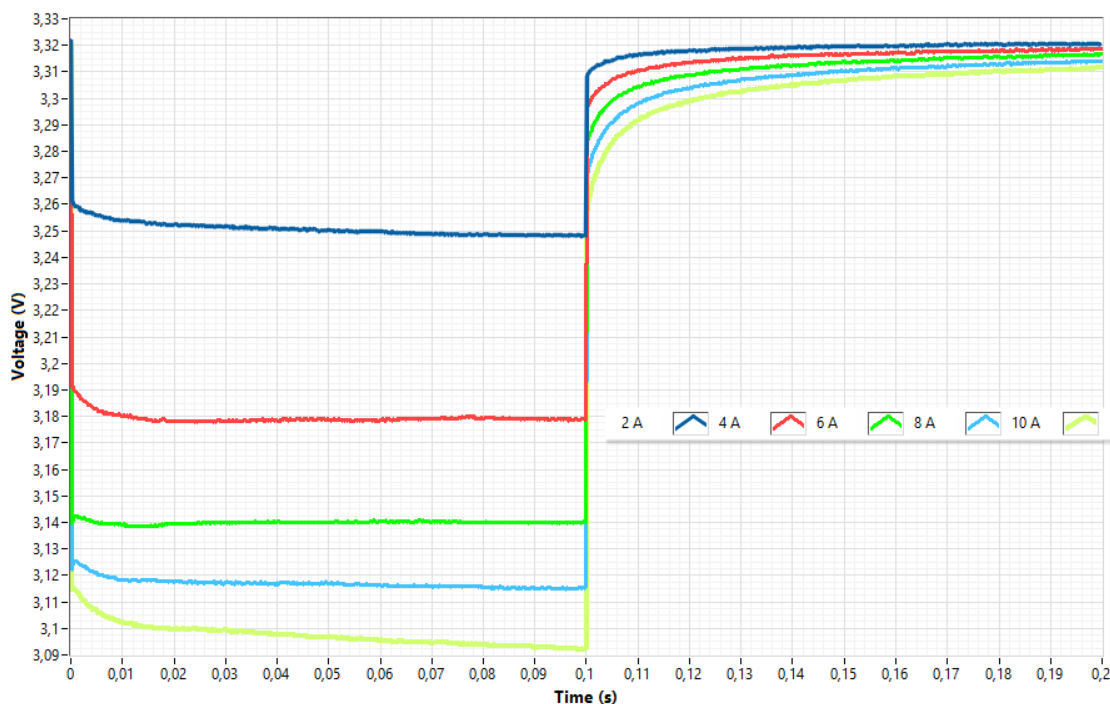
Přepětí dV1 představuje vnitřní odpor článku. U vzorků Ferak a Graupner je zřetelná lineární závislost vnitřního odporu. Vzorek Headway vykazuje nelinearitu vnitřního odporu.



Graf 4: Závislosti přepětí dV2 na zatěžovacím proudu I

Přepětí dV2 představující polarizační složku má pak pro vzorek Headway odlišný průběh a zasloužil by detailnějšího zkoumání.

PRŮBĚHY NAPĚTÍ PRO PROUDOVÉ IMPULZY 2-10 A (LiFePO ČLÁNEK HEADWAY)

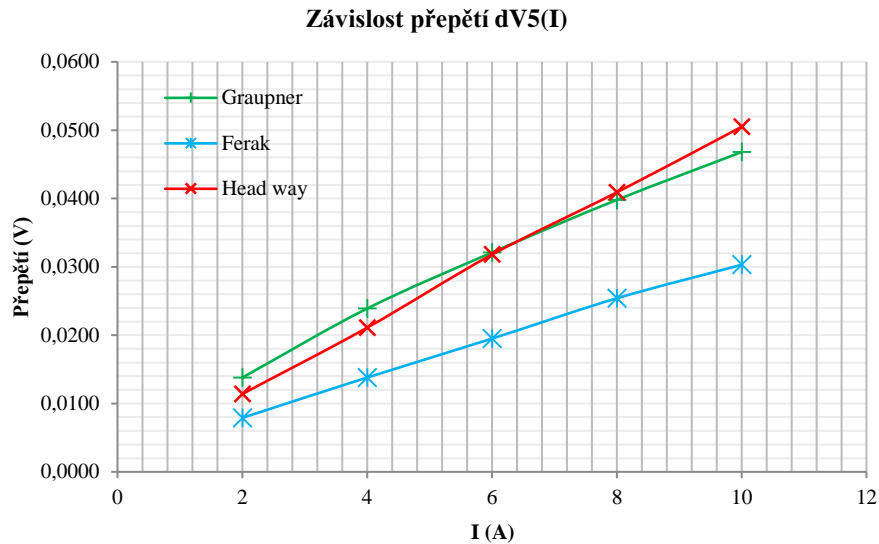


Graf 5: Impulzy pro vzorek LiFePO článku Headway 10 Ah/3,7 V

Pokud nahlédneme na průběhy impulzů u vzorku Headway (Graf 5), přechodný děj na sestupné hraně pulzu, je charakteristický výraznou složkou dV1 v porovnání se náběžnou hranou. Současně se projevuje neočekávaný pokles dV2 (Graf 4). Pro detailnější odůvodnění by musel být vzorek dále analyzován. Pokud porovnáme dV2 a dV5 (Graf 6), obdobné chování nebylo pozorováno.

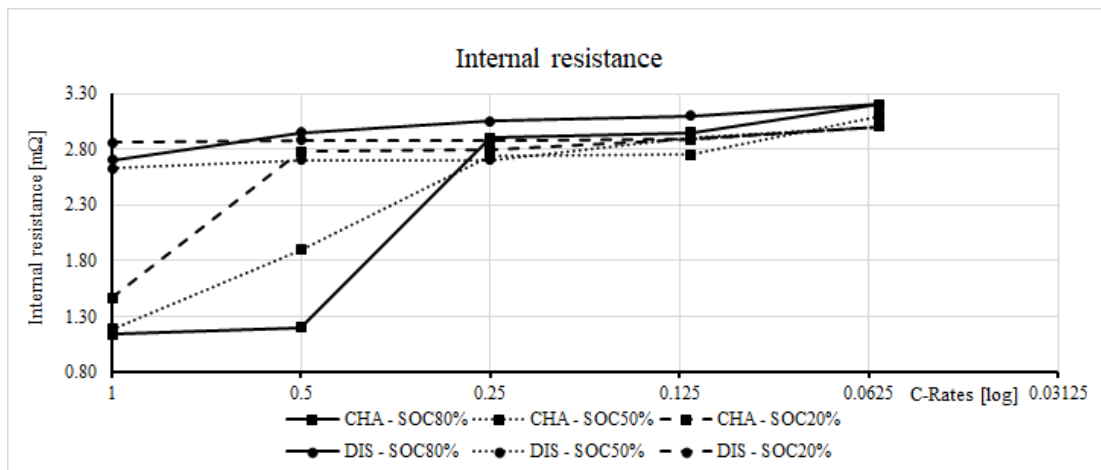
Dle názoru autora důvodem může být několik příčin. Kupříkladu je zde vždy riziko metodické chyby měření. V úvahu lze brát také charakteristické chování článku nebo očekávaná reakce, dle elektrostatických modelů.

O těchto modelech byla zmínka v části 3 (Elektrostatické modely elektrodového rozhraní).



Graf 6: Závislosti přepětí dV_5 na zatěžovacím proudu I

Vlivem zátěžného proudu na vnitřní odpor se také zabýval článek [42]. U testovaného článku bylo poukázáno na obdobnou nelinearitu vnitřního odporu, tak jako pro LiFePo článek Headway v oblasti přibližně zatěžovacího pulzu nad 0,5C. Autoři publikace zatím neuvádějí další podrobnosti.

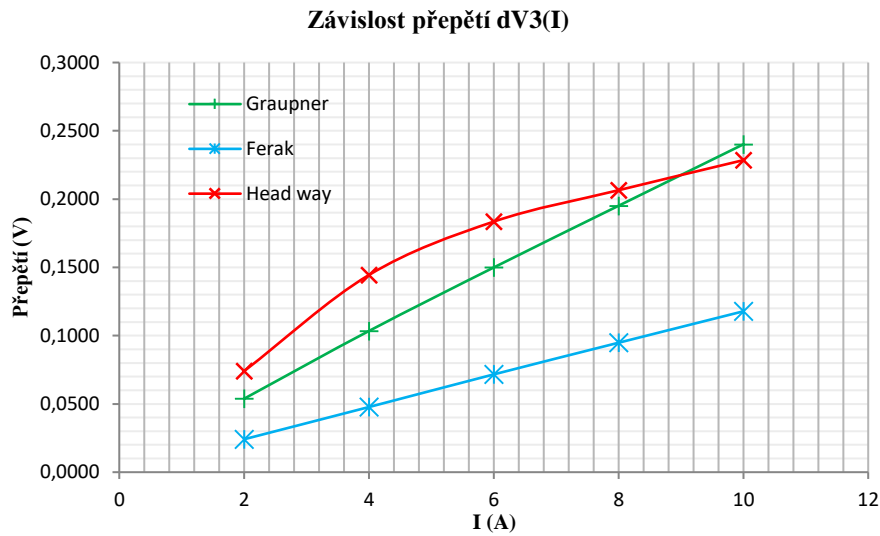


Graf 7: Závislost vnitřního odporu na zatížení C převzato z [42]

Předmětem testu byl LiFePO článek 100 Ah/3,7 V. Test probíhal pro pulzní zatížení trvající 18 s poté následovala doba relaxace 10 minut.

Nelze si nepovšimnout, že pulzy nedosahují chemicky rovnovážných stavů. Cílem tohoto měření bylo zachytit s maximální přesností přechodný děj zátěžného pulzu. Pro optimální měření impulzní diagnostiky by bylo vhodné proměřit celý pulz, který zahrnuje ustálenou hladinu napětí. Vzhledem ke krátkosti pulzu tento stav nastává velmi rychle, pokud uvažíme

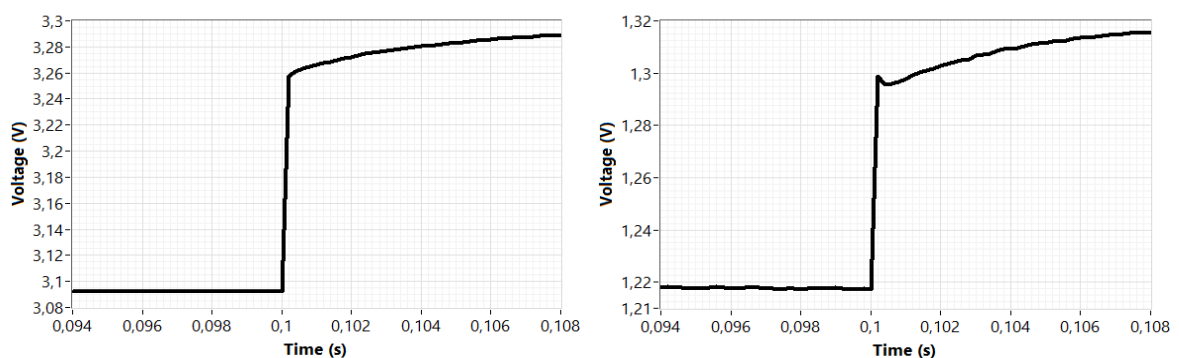
časové konstanty probíhající na elektrodě probírané v části 4 (Mechanismus přenosu elektrického náboje). Jsou zde však další vlivy, které jsou svými časovými konstantami poměrně delší.



Graf 8: Závislosti přepětí dV_3 na zatěžovacím proudu I

Přepětí dV_3 je výsledným součtem dV_1 a dV_2 . Jak je vidět na průběhu $dV_3(I)$ (Graf 8), složka dV_2 nemá značný vliv na výslednou hodnotu dV_3 . Naopak samotné vyhodnocení dV_2 nám dává určitou představu vnitřních elektrochemických procesů. Na tento opomíjený fakt není v současné době kladen výraznější důraz. Výsledkem je vyhodnocení vnitřního odporu se zanedbáním polarizačních jevů.

Z hlediska tohoto měření jsou průběhy ovlivněny neustáleným elektrochemickým dějem, který po intervalu měření již není zachycen. V další metodě impulzní diagnostiky by měly být brány v potaz ustálené hodnoty jednotlivých fází měření.



a) Vzorek Headway

b) Vzorek Ferak

Graf 9: Detail průběhu pulzu v okamžiku 0,1s

Dalším poznatkem bylo pozorování překmitů, které jsou naznačeny výše (Graf 9b). Možným vysvětlením by mohl být projev na základě B-D-M modelu popsáno v části 3.5 nebo možný vliv vytvořené SEI vrstvy na povrchu elektrod.

7.5.7 Shrnutí

Cílem této práce je na základě vypracovaných akademických prací v rámci LFSEZ vytvořit automatizovaný SW pro vybranou metody diagnostiky. V tomto případě byla implementována pulzní diagnostika akumulátorů, založená na práci Ing. Tomáše Reichla [5] [42] založená na literatuře [3]. Formou vytvořené aplikace je možné proměřit pulzy s mezními hodnotami 0,2 s doby záznamu pro vzorkovací frekvenci 5 kS/s.

V rámci jednoho měření je možno proměřit celé spektrum zatěžovacích proudů. Naměřené pulzy lze pak operativně vyhodnotit a získat tak tížené parametry pulzu na základě dalších vytvořených VIs v prostředí Labview.

Parametry byly definovány především dle Obr. 47 (Ukázka zatěžovacího pulzu dle ...).

Pro vzorové měření byly vybrány vzorky s odlišným chemickým principem s porovnatelnou ampérhodinovou kapacitou 10 Ah. Mezi vzorky patří olověná technologie, dále pak nikl-kadmiový článek a jako poslední byl testován článek LiFePO.

Naměřené pulzy jsou obsaženy v příloze v části **10.9**. Hodnoty přepětí vyhodnocené na základě aplikace **TO_todVpulse.vi** jsou shrnuty v Tab. 14. Z naměřených dat byla pozorována nelinearita vnitřního odporu vzorku Headway, která byla také zaznamenána ve vydaném článku [42]. Detailnější vyhodnocení metody je ponecháno pro další měření.

Naměřené a vyhodnocené parametry přináší nové poznatky, které mohou být dále rozvíjeny v dalším zkoumání. Kombinace pulzního měření s využitím vytvořené stanice S.A.M. 3, dosahujících zátěžných proudů až 200 A, získáváme další testovací nástroj, který poskytuje novou metodu diagnostiky zejména pro velkokapacitní akumulátory, kde je možné značného proudového rozsahu využít.

7.5.8 Optimalizace měření

Vytvoření pulzní metody dle daných parametrů bylo úspěšně splněno. Byly získány průběhy přechodných jevů elektrochemických procesů a tím je možno tento způsob diagnostiky nadále rozvíjet v rámci LFSEZ.

Rozvoj je žádoucí v několika směrech. Jednak nabývat na hlubší znalosti testů impulzní diagnostiky. V případě zadání autora vytvořit optimální testovací metodu, dle využití literatury. Na základě [3](str. 213-214), ustálení polarizačních jevů nastává v časovém intervalu mezi 5-50 ms, v našem případě délka pulzu trvala 100 ms, což splňuje danou podmínku.

Jak bylo zmíněno, naměřené hodnoty naznačují, že ne zcela všechny elektrochemické změny jsou po době 100 ms v rovnovážném stavu. Pro optimální měření pulzní metody by bylo vhodné proměřit ustálené hodnoty napětí při určitém proudovém zatížení. Také značeno jako *Closed-Circuit Voltage (CCV)* při zatížení. Pro nezatížený článek je používán pojem *Open-Circuit Voltage (OCV)*.

Chyba OCV (%)			
I (A)	Head way	Ferak	Graupner
2	0,036	0,067	0,036
4	0,102	0,179	0,102
6	0,157	0,299	0,157
8	0,205	0,367	0,205
10	0,268	0,457	0,268

Tab. 15: Procentuální chyba CCV

V Tab. 15 je vyjádřena chyba CCV jako procentuální rozdíl napětí před začátkem pulzu a na konci pulzu. Samozřejmě pro korektní analýzu by bylo třeba vyhodnotit tyto parametry z hlediska nejistot měření a dále je zanedbáno možných ztrát energie v rámci pulzu, které by vedly k poklesu klidového napětí (OCV). Tabulka je pouze orientační znázorněním pro budoucího stanovení CCV v rámci pulzní diagnostiky. Nelze předpokládat absolutně shodné hodnoty napětí OCV před a po testovacím pulzu. Je tedy nutné stanovit daný časový interval, který je splňující podmínkou pro dosažení CCV.

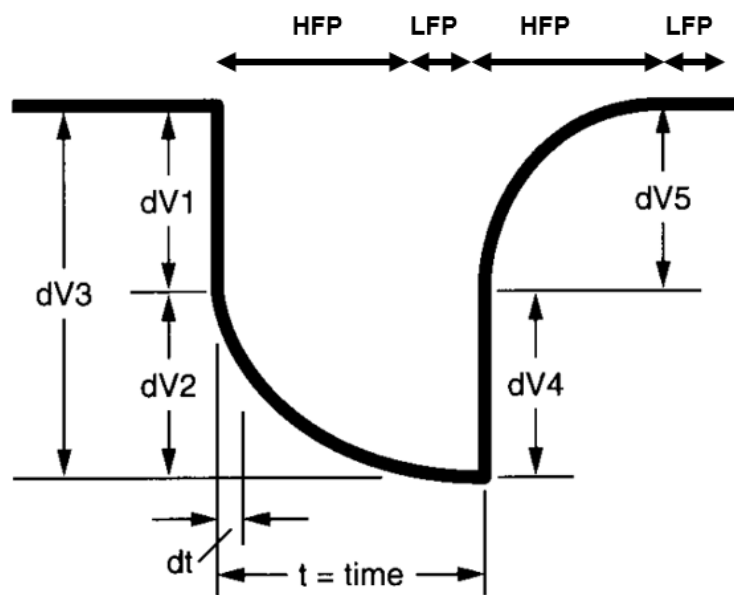
Dle názoru autora, by bylo vhodné stanovit doby relaxace na základě vyhodnocení chyby OCV. V případě, kdy článek dosáhne hodnoty napětí o 0,1 % nižší, nežli byla hodnota napětí na počátku pulzu, lze považovat článek za zrelaxovaný a v rovnovážném elektrochemickém stavu. Na základě těchto poznatků, je možné vyvodit vhodné relaxační časové intervaly pro stanovení CCV a OCV.

Další možností by bylo samozřejmě stanovení derivace v bodě. Vyhodnocení směrnice tečny v bodě, by rozhodovalo, zda velikost změny napětí je za daných podmínek odpovídající či její změna není již rozhodující.

7.5.9 Vylepšení pulzní metody

Z navrhovaného postupu plyne několik změn, které by bylo vhodné implementovat do pulzního měření. Měření by bylo vhodné rozdělit do vícero sekcí, mezi kterými by docházelo k vyčtení bufferu zařízení a následně v další iteraci změně čtecích parametrů. Metoda by měla následující posloupnost (Viz Obr. 53).

Vytvoření dvou čtecích režimů *HFP* a *LFP* (High/Low frequency period). *HFP* by sloužila k zachycení přechodového děje. *LFP* by pak vyčítala s nižší vzorkovací frekvencí CCV dokud nedosáhne článku rovnovážného stavu. Následně, dochází k další fázi, kde opět požadujeme zachytit rychlou změnu přechodného děje. V posledním kroku opět čekáme na dosažení rovnovážného stavu článku. Ve volných mezech dojde k vyčtení zásobníku předchozích naměřených hodnot.



Obr. 53: Návrh měřicí metody impulzní diagnostiky

8 ZÁVĚREM

Cílem práce bylo zdokumentovat hlavní části stanice automatického měření S.A.M. 3 a její vývoj. Po krátkém úvodu definujícím zaměření projektu a stručné kategorizaci testovacích metod, byly shrnuty diplomové práce v rámci LFSEZ, které se týkají rozebíraného tématu velkokapacitních akumulátorových článků.

Prostudované diplomové práce se zabývají, jak novými testovacími metodami [5] [9], tak testováním dle dnešních platných norem ČSN [14]. Teplotní vlivy na parametry akumulátorů musí být také brány v úvahu [18]. Mezi další důležité zdroje informací náleží práce věnující se obdobným automatizovaným testováním [12] [13] [19] [35]. Pracoviště umožňuje zvýšení úrovně automatizace i v dalších etapách. Příkladem může být dokončení rozvaděčové skříně navržené dle [15] a její propojení se stanicí.

Velmi užitečným přínosem byla literatura [10], kde na základě absolvovaného kurzu bioelektrochemie na portugalské univerzitě bylo možné podat popis elektrostatických modelů elektrodového rozhraní dle autorky. Popis by měl čtenáře uvést do mechanismu přenosu náboje a seznámit s jednotlivými aspekty na transport částic. Jedná se tak o rozšíření teoretického základu diplomové práce [5].

Po teoretické pasáži bylo přistoupeno k dokumentaci realizovaného pracoviště S.A.M. 3. Byly shrnuty jednotlivé části stanice a princip provedení jednotlivých komponent. Zejména byly dokumentovány důležité funkce testovacích zátěží a zdrojů pro maximální využitelnost přístrojů. K tomuto bylo přikročeno také z důvodu rozsáhlosti jednotlivých manuálů.

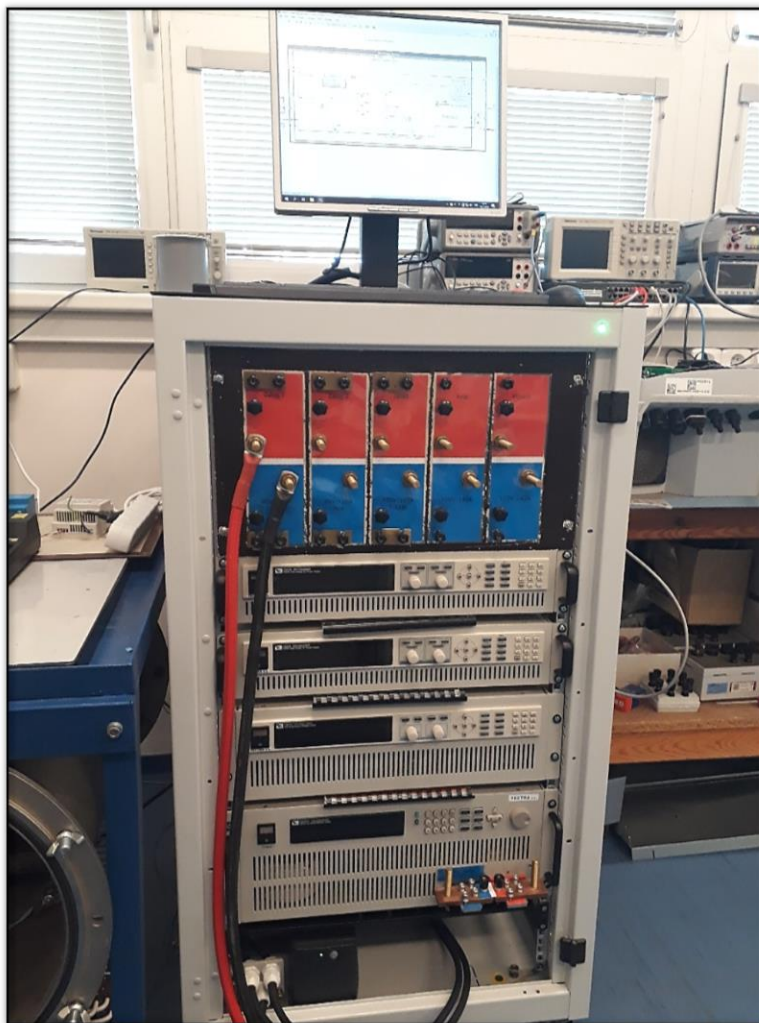
V současné době je stanice v plně vytíženém provozu. Aplikace pro automatické testování jsou vytvořeny na základě SCPI příkazů zprostředkované skrze programové prostředí LabVIEW. Byla vytvořena aplikace pro kapacitní měření akumulátorů. Aplikace slouží také jako správce článků, kdy je možné vytvářet knihovnu předdefinovaných parametrů pro testování. Po spuštění aplikace jsou vyhledány aktuálně připojené teplotní senzory one-wire s jejich přiřazenými názvy, které jsou automaticky rozpoznány na sběrnici. To umožňuje měřit oteplení článků v průběhu testovacích cyklů v libovolných oblastech článků.

Po provedených testech je zde k dispozici aplikace DataAdjust pro vykreslení naměřených hodnot do grafů. Pro správu teplotních senzorů je možno využít další aplikaci ReadTemp-Main, která zobrazí tabulku aktuálně připojených senzorů s jejich přiřazenými názvy a aktuální teplotou. Takto je možné názvy upravovat dle účelu využití.

Dalším testovacím prvkem je program pro měření vnitřního odporu dle ČSN. Aplikace provede jednotlivé testovací kroky dle normy a zapíše naměřené hodnoty automaticky do přehledného souboru ve formátu csv.

K závěru programové části byla aplikována impulzní metoda měření. Na základě práce [5] byla metoda vylepšena. Cíl byl stanoven pro dosažení co možná nejpřesnějšího záznamu přechodného děje při jednotkovém skoku proudového zatížení. K tomu bylo využito vnitřního zásobníku zátěže (bufferu) uchovávajícího až 1000 hodnot. Pro tento účel byl aplikován testovací pulz 0,1 s v zatíženém stavu s následnými 0,1 s doby relaxace. Data byla zaznamenána se vzorkovací frekvencí 5 kS/s. Naměřené pulzy odpovídají teoretickým předpokladům. Aplikace TO_ReadData-Main.vi stanoví velikosti jednotlivých přepětí. Vyhodnocení parametrů bylo demonstrováno na provedeném měření. Detailnější závěry o impulzní metodě nebyly předmětem této práce a vyžadují větší množství testovaných vzorků.

Hlavním přínosem metody je rozlišení vnitřního odporu do dvou kvalitativních parametrů. Samostatný vnitřní odpor (přepětí DV1 a DV4) a polarizační odpor (přepětí DV2 a DV5). Širší uplatnění metody by mohlo přinést nové poznatky pro parametrizaci akumulátorů. Zejména u velkokapacitních článků ve spojení se sestavenou testovací stanicí dosahují proudová zatížení až 200 A. V případě paralelního chodu zátěží bychom mohli mluvit o hodnotách vyšších. V závěru měření byl navržen postup pro optimálnější testování pomocí impulzní diagnostiky.



Obr. 54: Současný vzhled S.A.M.3

9 BIBLIOGRAFIE

- [1] HRUŠKA, Michal. *MĚŘENÍ ÚČINNOSTI AKUMULÁTOROVÝCH ČLÁNKŮ*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina Ph.D.
- [2] BUCHMANN, Isidor. Battery University. *Battery Test Methods* [online]. Nürnberg, Germany: Cadex Electronics Inc., 2019 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com>
- [3] LINDEN, David. a Thomas REDDY. *Handbook of batteries*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002. ISBN 0071359788.
- [4] JOSSEN, Andreas. Fundamentals of battery dynamics. *Journal of Power Sources*. 2006, **154**(2), 530-538. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.041>. ISSN 03787753. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305014321>
- [5] REICHL, Tomáš. *Impulsní charakteristika baterií*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina Ph.D.
- [6] BARTLETT, Philip. *Bioelectrochemistry: fundamentals, experimental techniques and applications*. 1. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0470-843642.
- [7] Battery internal resistance. In: *Energizer* [online]. b.r. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://data.energizer.com/PDFs/BatteryIR.pdf>
- [8] ANDRE, D., M. MEILER, K. STEINER, Ch. WIMMER, T. SOCZKA-GUTH a D.U. SAUER. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. *Journal of Power Sources*. 2011, **196**(12), 5334-5341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.102>. ISSN 0378-7753. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311000681>
- [9] PODHRÁZSKÝ, Adam. *ELEKTROCHEMICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE ELEKTROCHEMICKÝCH ZDROJŮ*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

- [10] BRETT, Christopher a Ana BRETT. *Electrochemistry: principles, methods, and applications*. 1. New York: Oxford University Press, 1993. ISBN 978-0198553885.
- [11] GANTENBEIN, Sophia, Michael WEISS a Ellen IVERS-TIFFÉE. Impedance based time-domain modeling of lithium-ion batteries: Part I: Part I. *Journal of Power Sources*. 2018, **379**, 317-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.043>. ISSN 0378-7753. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775318300430>
- [12] KMÍNEK, Matěj. *Testovací pracoviště pro měření baterií - realizace* [online]. Praha, 2012 [cit. 2016-12-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/10749>. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina PhD.
- [13] PTÁČEK, Viktor. *Automatizovaný systém pro měření parametrů akumulátorových baterií* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-12-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61131?locale-attribute=en>. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina Phd.
- [14] JACKO, Michal. *Bateriové systémy: Ampérhodinové zkoušky*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
- [15] SÁNDOR, Vašek. *AUTOMATIZACE ŘÍZENÍ PROVOZU ZKUŠEBNÍ LABORATOŘE*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
- [16] TATARKOVIČ, Milan, Gabriela BRONCOVÁ a Martin KRONĎÁK. ELEKTROIMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE A JEJÍ VYUŽITÍ V CHEMICKÉ ANALÝZE. *Chemické listy*. Praha: VŠCHT, 2012, **2012**(12), 1067-1074.
- [17] JIANG, Jiuchun, Zhisong LIN, Qun JU, Zeyu MA, Caihui ZHENG a Zhanguo WANG. Electrochemical Impedance Spectra for Lithium-ion Battery Ageing Considering the Rate of Discharge Ability. *Energy Procedia*. 2017, **105**, 844-849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.399>. ISSN 1876-6102. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021730440X>
- [18] KNOTEK, Vojtěch. *Vliv teploty na parametry baterií*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

- [19] ANTOŠ, Jan. *Komplexní testování trakčních lithium iontových akumulátorů*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jindřich Sadil Ph.D.
- [20] F33-MA Refrigerated/Heating Circulator. *Julabo.com* [online]. b.r. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.julabo.com/sites/default/files/downloads/productdatasheets/EN-US/JULABO-F33-MA--9153633.pdf>
- [21] *User's Manual DC programal electronic load: Model IT8813/IT8814* [online]. In: . b.r., s. 46 [cit. 2019-02-06].
- [22] *BK PRECISION Programmable DC Electronic Loads: User manual model: 8614C* [online]. In: . 22820 Savi Ranch Parkway Yorba Linda, CA 92887: BK PRECISION, 2017, s. 107 [cit. 2019-02-11].
- [23] ČERVENKA, Milan. *Zpracování fyzikálních měření* [online]. 1. katedra fyziky FEL-ČVUT, 2013 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://fyzika.feld.cvut.cz/~cervenka/vyuka/zprfm/zpracdat.pdf>
- [24] LI, Kaiyuan a King TSENG. Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in micro-grid. In: *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* [online]. IEEE, 2015, s. 005235-005240 [cit. 2017-03-27]. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392923. ISBN 9781479917624. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7392923/>
- [25] *Battery Test Manual For Plug-In Hybrid Electric Vehicles* [online]. 3. The Idaho National Laboratory: U.S. Department of Energy, 2014 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/6308373.pdf>
- [26] SMITH, A., J. BURNS a J. DAHN. A High Precision Study of the Coulombic Efficiency of Li-Ion Batteries. *Electrochemical and Solid-State Letters* [online]. 2010, **13**(12), 177- [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1149/1.3487637. ISSN 10990062. Dostupné z: <http://esl.ecsdl.org/cgi/doi/10.1149/1.3487637>
- [27] *Highpowered and Programmable Switching Power supply: Series IT6500 User's Manual* [online]. In: . USA: Itech Electronics, Co., Ltd., 2015, s. 48 [cit. 2019-02-11].
- [28] *BK precision Multi-Range DC Power Supply: User manual model: 9115* [online]. In: . 22820 Savi Ranch Parkway Yorba Linda, CA 92887: BK PRECISION, 2015, s. 79 [cit. 2019-02-11].
- [29] *ITECH* [online]. ITECH, 2019 [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://www.itech.sh/en/>

- [30] 1-Wire Digital Thermometer: DS18B20 datasheet. *Maximintegrated* [online]. Maxim Integrated Products, Inc., 2019 [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [31] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: High-Precision Temperature Monitoring with Minimal Connections Ideal for Multisensor Systems. *Maximintegrated* [online]. Maxim Integrated Products, Inc., 2019 [cit. 2019-09-17]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/products/sensors/DS18B20.html>
- [32] Maxim: 1-wire bus tutorial presentation. *Maximintegrated* [online]. 2019 [cit. 2019-09-17]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/products/1-wire/flash/overview/index.cfm>
- [33] SELECKÝ, Matúš. *Arduino: uživatelská příručka*. 1. vydání. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 9788025148402.
- [34] *Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI): Volume 1: Syntax and Style* [online]. 1999.0. U.S.A: SCPI Consortium, 1999 [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: <http://www.ivifoundation.org/docs/scpi-99.pdf>
- [35] *Aplikace pro dálkové ovládání přístrojů Rohde & Schwarz*. Parfubice, 2013. Diplomová práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Ing. Jan Pidanič.
- [36] *Stykač SW204: 2 x SW200 - COMMON BRACKET* [online]. Hampshire: Albright Internacional, 2019 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://www.albrightinternational.com/products/sw204/>
- [37] *GME electronic: S202S02* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/s202s02>
- [38] Arduino Playground: DisablingAutoResetOnSerialConnection. *Arduino: PlayGround* [online]. 2018 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://playground.arduino.cc/Main/DisablingAutoResetOnSerialConnection/>
- [39] <https://www.ventilatory.cz>. *Ventilatory.cz* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.cz/ventilator-potrubni-maly-zuzeny-s-kulickovymi-lozisky-o-100-mm-x11791>

- [40] Ni-Cd baterie Ferak: KPL-10. *Saft-Ferak* [online]. Raškovice: Saft-Ferak, 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: http://www.saft-ferak.cz/sites/saft-ferak.cz/files/Ferak_CZ_2015.pdf
- [41] HeadWay: Cylindrical lithium-ion Iron Phosphate battery. *TME.eu* [online]. Ostrava: TME.eu, 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/e9446d9408c7195368021275bac550de/38120-10A.pdf>
- [42] REICHL, Tomáš a Hrzina PAVEL. Study of the Current Value Influence on the Internal Resistance Value In: Proceedings of Advanced Batteries Accumulators and Fuel Cells. In: *19 th ABAF*. Brno: Brno University of Technology, 2018, s. 176-179. ISBN 978-80-214-5651-8.

9.1 SEZNAMY

9.1.1 Seznam obrázků

Obr. 1: Přehled dynamiky elektrochemických procesů	14
Obr. 2: Napěťové ztráty způsobené vnitřním odporem a polarizačními ději převzato [3] [5]	16
Obr. 3: Testované přípravky v rámci [14].....	18
Obr. 4: Mechanismus oteplení článku převzato z [18].....	19
Obr. 5: Rozhraní elektrolyt-elektroda [10].....	21
Obr. 6: Zobrazení Helmholtzova modelu [10]	22
Obr. 7: a) Lineární závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti od elektrody b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle HM [10]	22
Obr. 8: Zobrazení modelu dle Gouye-Chapmanana [10].....	23
Obr. 9: a) Exponenciální závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti od elektrody při odlišných koncentracích elektrolytu b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle GCM [10].....	23
Obr. 10: Zobrazení Sternova modelu [10]	24
Obr. 11: a) Závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti dle SM b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle SM [10].....	24
Obr. 12: Zobrazení Grahamova modelu [10]	25
Obr. 13: a) Závislost elektrického potenciálu na vzdálenosti dle GM b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle GM [10]	25
Obr. 14: a) Zobrazení B-D-M modelu b) Závislost kapacity na aplikovaném potenciálu dle B-D-M modelu [10].....	26
Obr. 15: Schéma elektronové výměny v okolí elektrody převzato [6]	27
Obr. 16: Počáteční stav S.A.M.3	28
Obr. 17: Příklad průběhu spojitě módu [21]	31
Obr. 18: Příklad pulzního módu [21]	32
Obr. 19: Příklad spínaného pulzu [21]	32
Obr. 20: Indikace úspěšného testu [21].....	32
Obr. 21: Splnění napěťové podmínky V_{on} [21].....	34
Obr. 22: Tabulka zatěžovacích pulzů [21]	34
Obr. 23: Sada instrukcí pro komunikaci 1-wire [32]	38
Obr. 24: Komunikace po sběrnici 1-wire [32]	39
Obr. 25: Blokové schéma senzoru DS18B20 [31]	39
Obr. 26: Síťový model SCPI převzato [35].....	41
Obr. 27: Hierarchický strom uzlů podsystému SENSE [34]	42
Obr. 28: Vzorový příklad SCPI příkazu.....	42
Obr. 29: Algoritmus skládání hlavičky příkazů převzato [34].....	43
Obr. 30: Stykač Albright SW204A	44
Obr. 31: Svorkovnice S.A.M.3.....	45

Obr. 32: Proudový bočník 200 A/60 mV	44
Obr. 33: Popisový štítek pro I/O piny řídicí jednotky arduino	46
Obr. 34: Vzor stromové struktury SYSTem	46
Obr. 35: Kontaktování senzorů DS11B20 pomocí RJ11	48
Obr. 36: Ventilátor \varnothing 100 mm	49
Obr. 37: Schéma stanice S.A.M 3	49
Obr. 38: Context Help	50
Obr. 39: Nastavení testovacích parametrů.....	51
Obr. 40: Potvrzovací dialogové okno config. window	51
Obr. 41: Umístění Load/SaveBatteryParameters.....	52
Obr. 42: Vzor setu souborů pro kapacitní měření	53
Obr. 43: Hlavní okno programu pro kapacitní měření	54
Obr. 44: Správa teplotních senzorů onewire	55
Obr. 45: Pzmetry pro měření vnitřního odporu IR	56
Obr. 46: Vzor naměřeného pulzu	57
Obr. 47: Ukázka zatěžovacího pulzu dle [3] [5].....	57
Obr. 48: Parametry impulzu	58
Obr. 49: Porovnání průběhu napětí a proudu při proudovém impulzu.....	58
Obr. 50: Data path pro impulzní měření.....	58
Obr. 51: Schéma zapojení.....	59
Obr. 52: Vyhodnocení měření dle TO_todVpulse.vi článku PB12V1,2 Ah 4 A	60
Obr. 53: Návrh měřicí metody impulzní diagnostiky	68
Obr. 54: Současný vzhled S.A.M.3	70
Obr. 55: Detail ventilačního potrubí.....	79
Obr. 56: GUI PRO KAPACITNÍ MĚŘENÍ	85
Obr. 57: Hlavní okno Data Adjust.....	86
Obr. 58: GUI pro MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU DLE ČSN	87
Obr. 59: GUI aplikace pro pulzní testování.....	88

9.1.2 Seznam tabulek

Tab. 1: Klasifikace diagnostických metod dle [2].....	15
Tab. 2: Testované přípravky v rámci [14].....	18
Tab. 3: Základní parametry zátěže IT8814C [21].....	28
Tab. 4: Dynamické parametry zátěže IT8814C [21].....	29
Tab. 5: Nejistoty měření zátěže IT8814C [21].....	29
Tab. 6: Mezní hodnoty ochrany zátěže IT8814C [21]	29
Tab. 7: Parametry OCP test function [21].....	33
Tab. 8: Parametry OPP function [21].....	33
Tab. 9: Podmínky měření ampérhodinové kapacity [21].....	34
Tab. 10: Základní parametry zátěže IT8516C.....	35
Tab. 11: Nejistoty měření zátěže IT8516CA	35
Tab. 12: Parametry zdroje IT6522A [27].....	37
Tab. 13: Parametry senzoru DS18B20	38
Tab. 14: Stromová struktura SCPI příkazů	43
Tab. 15: Hodnoty generované na základě TO_todVpulse.vi dle naměřených pulzů.....	61
Tab. 16: Procentuální chyba CCV.....	67

9.1.3 Seznam grafů

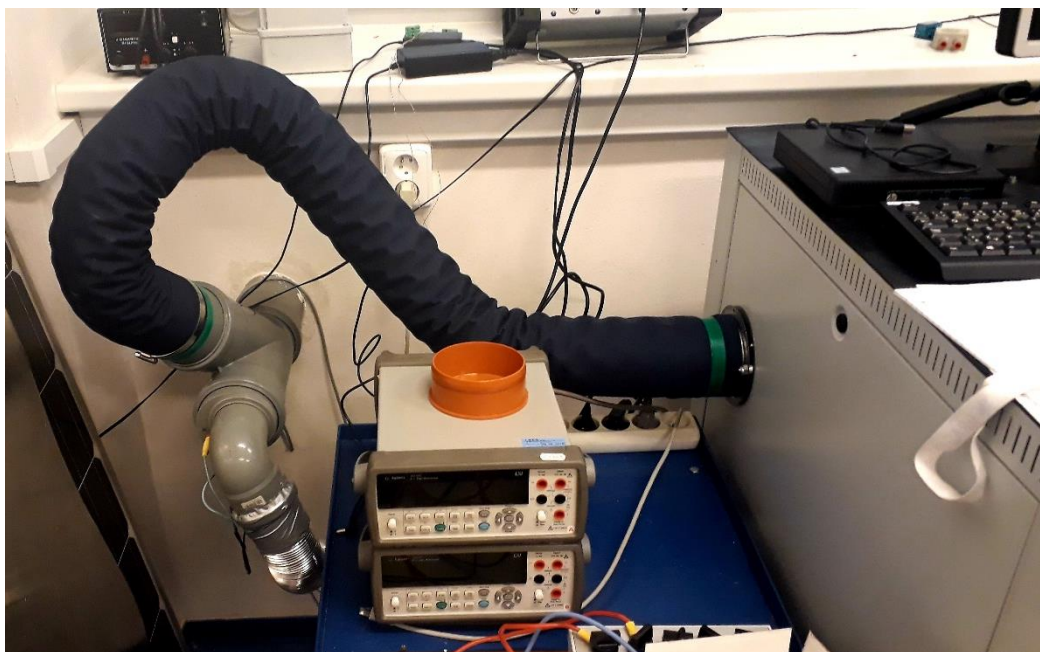
Graf 1: Záškrtitý při vypnutém Remote sense	59
Graf 2: Proudové impulzy se zatížením 2 A a 10 A.....	62
Graf 3: Závislosti přepětí dV1 na velikosti proudu I	62
Graf 4: Závislosti přepětí dV2 na zatěžovacím proudu I	63
Graf 5: Impulzy pro vzorek LiFePO článku Headway 10 Ah/3,7 V.....	63
Graf 6: Závislosti přepětí dV5 na zatěžovacím proudu I	64
Graf 7: Závislost vnitřního odporu na zatížení C převzato z [41].....	64
Graf 8: Závislosti přepětí dV3 na zatěžovacím proudu I	65
Graf 9: Detail průběhu pulzu v okamžiku 0,1s	65
Graf 10: Impulzy pro vzorek Ni-Cd článku Ferak KPL10 10 Ah/1,4 V.....	89
Graf 11: Impulzy pro vzorek oloveného akumulátoru Graupner 10 Ah/2 V	89
Graf 12: Impulzy pro vzorek LiFePO článku Headway 10 Ah/3,7 V	90

POUŽITÝ SW

LABVIEW, ARDUINO IDE, MICROSOFT OFFICE, KICAD

10 PŘÍLOHY

10.1 DETAIL VENTILAČNÍHO POTRUBÍ



Obr. 55: Detail ventilačního potrubí

10.2 VZOR XML FORMÁTU

PRO BATTERY

PARAMETERS

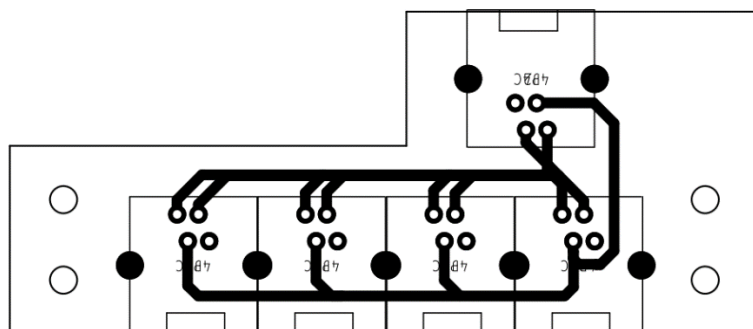
Název souboru: MyTestingBattery

```

<Cluster>
<Name>SaveConfig</Name>
<NumElts>6</NumElts>
<Path>
<Name>Data log</Name>
<Val></Val>
</Path>
<String>
<Name>Bat.NameString</Name>
<Val>Li-Pol</Val>
</String>
<Cluster>
<Name>Bat.TypeA</Name>
<NumElts>10</NumElts>
<String>
<Name>Battery name</Name>
<Val>MyTestingBattery</Val>
</String>
<DBL>
<Name>Capacity [mAh]</Name>
<Val>0.00000000000000</Val>
</DBL>
<DBL>
<Name>Maximum Voltage</Name>
<Val>4.20000000000000</Val>
</DBL>
<DBL>
<Name>Cut-off Current</Name>
<Val>0.00000000000000</Val>
</DBL>
<DBL>
<Name>Cut-off Voltage</Name>
<Val>3.00000000000000</Val>
</DBL>
<DBL>
<Name>Maximum teperature</Name>
<Val>0.00000000000000</Val>
</DBL>
<U32>
<Name>Number of cycles</Name>
<Val>0</Val>
</U32>
<DBL>
<Name>Sample Period [s]</Name>
<Val>0.00000000000000</Val>
</DBL>
<DBL>
<Name>Relax time after Load[s] </Name>
<Val>0.00000000000000</Val>
</DBL>
<DBL>
<Name>Relax time after Source[s] </Name>
<Val>5.00000000000000</Val>
</DBL>
</Cluster>
<DBL>
<Name>Load Current [A]</Name>
<Val>0.00000000000000</Val>
</DBL>
<DBL>
<Name>Source Current [A]</Name>
<Val>0.00000000000000</Val>
</DBL>
<Boolean>
<Name>Source Cooperation</Name>
<Val>0</Val>
</Boolean>
</Cluster>

```


10.3 ROZBOČOVAČ RJ11 PRO TEPLOTNÍ SENZORY ONEWIRE



10.4 VZOROVÝ PŘÍKLAD ZE SOUBORU DAT PRO MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU

Název souboru: InternalResistanceTest-IRTest_190830_1804

Internal Resistance test		
Date:	30.08.2019,18:04	
Version:		
Battery name:	IRTest	
Battery type:	Li-Pol	
Measurement Parameters		
I1 =	1,00 A	
DT1 =	0,25	min
DT-Relax Period =	0,25	min
I2 =	2,00 A	
DT2 =	0,25	min

10.5 VZOROVÝ PŘÍKLAD ZE SOUBORU DAT PRO KAPACITNÍ

MĚŘENÍ

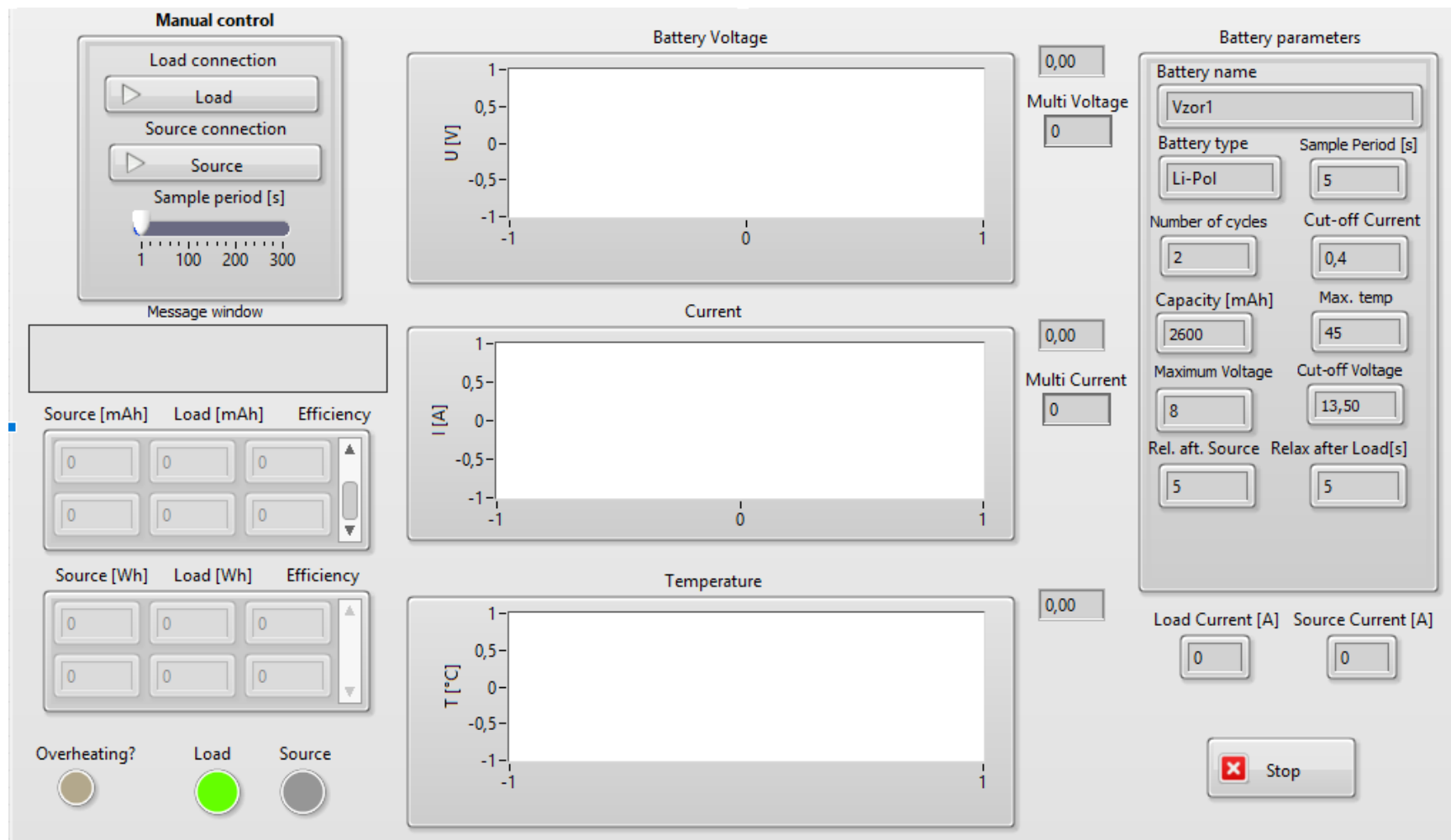
Název souboru: 0.1.SourceMeasurement_220819_2028

Date	22.08.2019	Start Time	20:28	
Battery type	MyTestingBattery			
Time [sec]	Time [HH:MM:SS]	Voltage [V]	Current [A]	Temp. Tk1 [°C]
200	20:28:35	14,4	0,329	29,69
206	20:28:41	14,4	0,296	29,75
Energy count:		0,02		
Coulomb count:		1,44		
Battery relax				
210	20:28:45	12,98	0	29,69
220	20:28:55	12,834	0	29,69
230	20:29:05	12,768	0	29,75
236	20:29:11	12,744	0	29,75

Název souboru: *Efficiency test results_220819_2025*

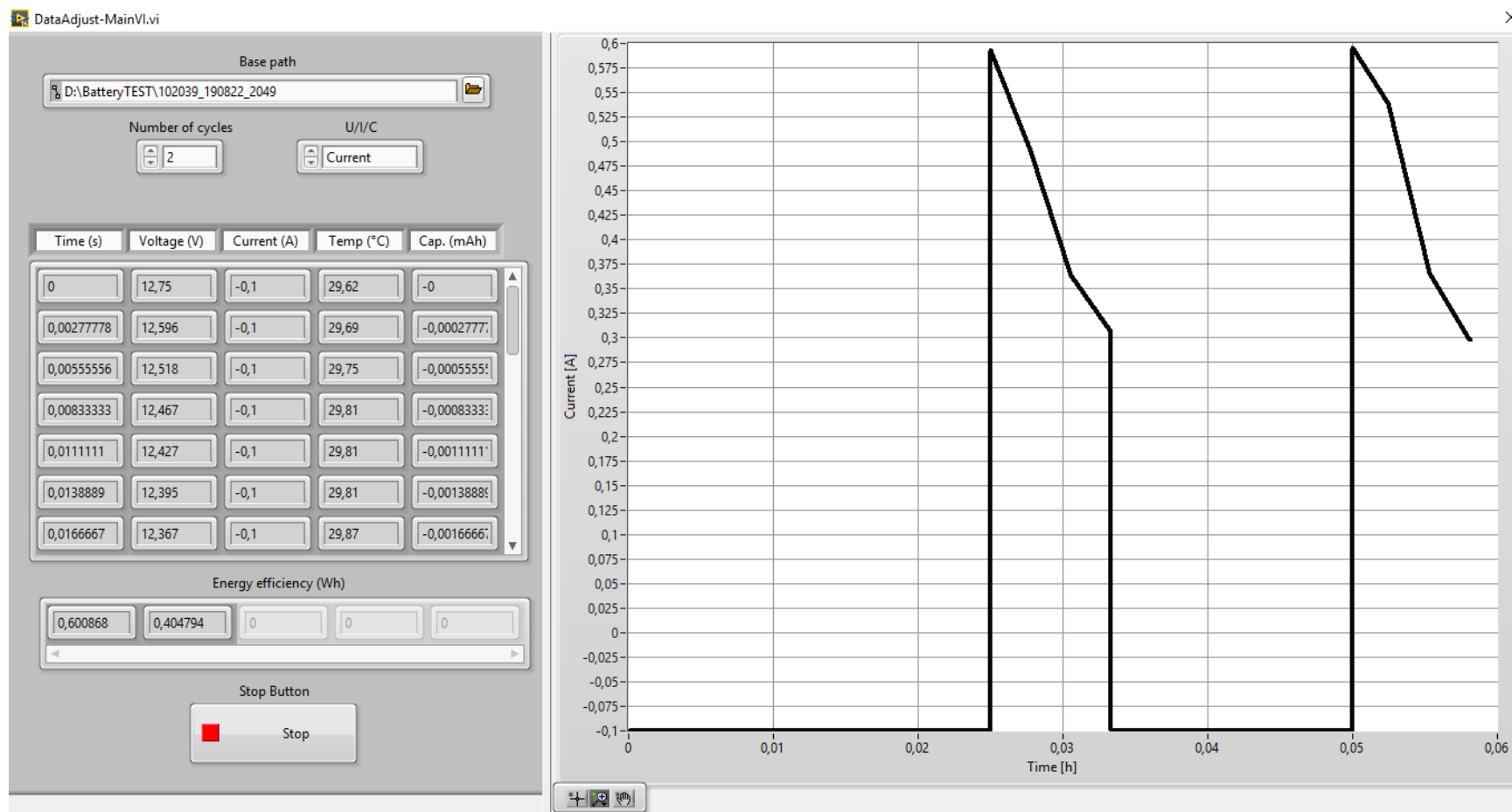
Date	22.08.2019				
Start Time	20:25				
Version:					
Battery name	102039				
Battery type	MyTestingBattery				
Source Current	0,6	A			
Load Current	0,3	A			
Cut-off Current	0,3	A			
Cut-off Voltage	12,8	V			
Maximum Voltage	14,3	V			
Number of cycles	2				
Relax time after Source	30	s			
Relax time after Load	30	s			
Capacity measurement					
Charge cycle [mAh]	Discharge cycle [mAh]	Coulomb Efficiency [%]	Charge cycle [Wh]	Discharge cycle [Wh]	Energy Efficiency [%]
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

10.6 GUI PRO KAPACITNÍ MĚŘENÍ



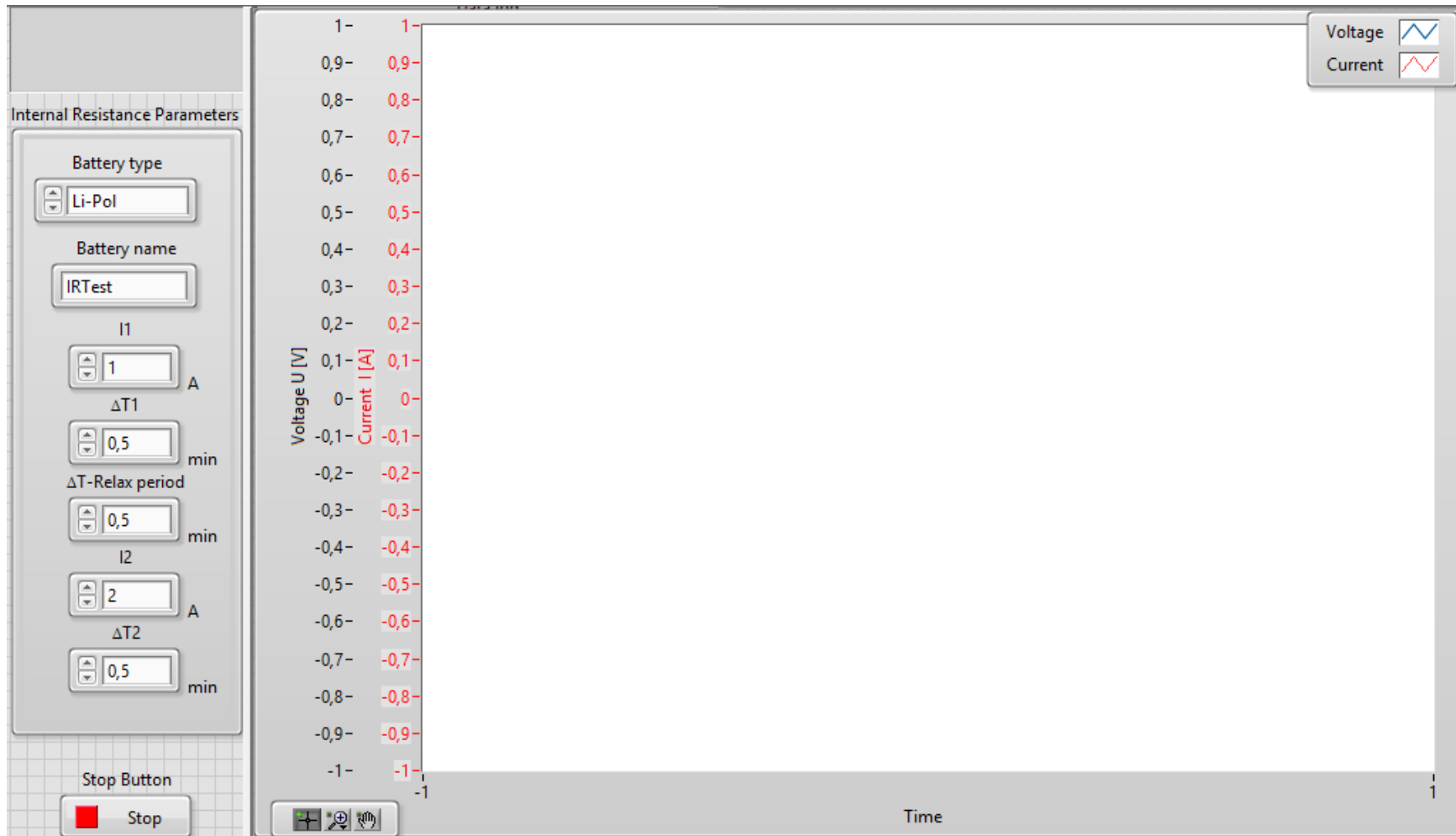
Obr. 56: GUI PRO KAPACITNÍ MĚŘENÍ

10.7 GUI APLIKACE DATA ADJUST



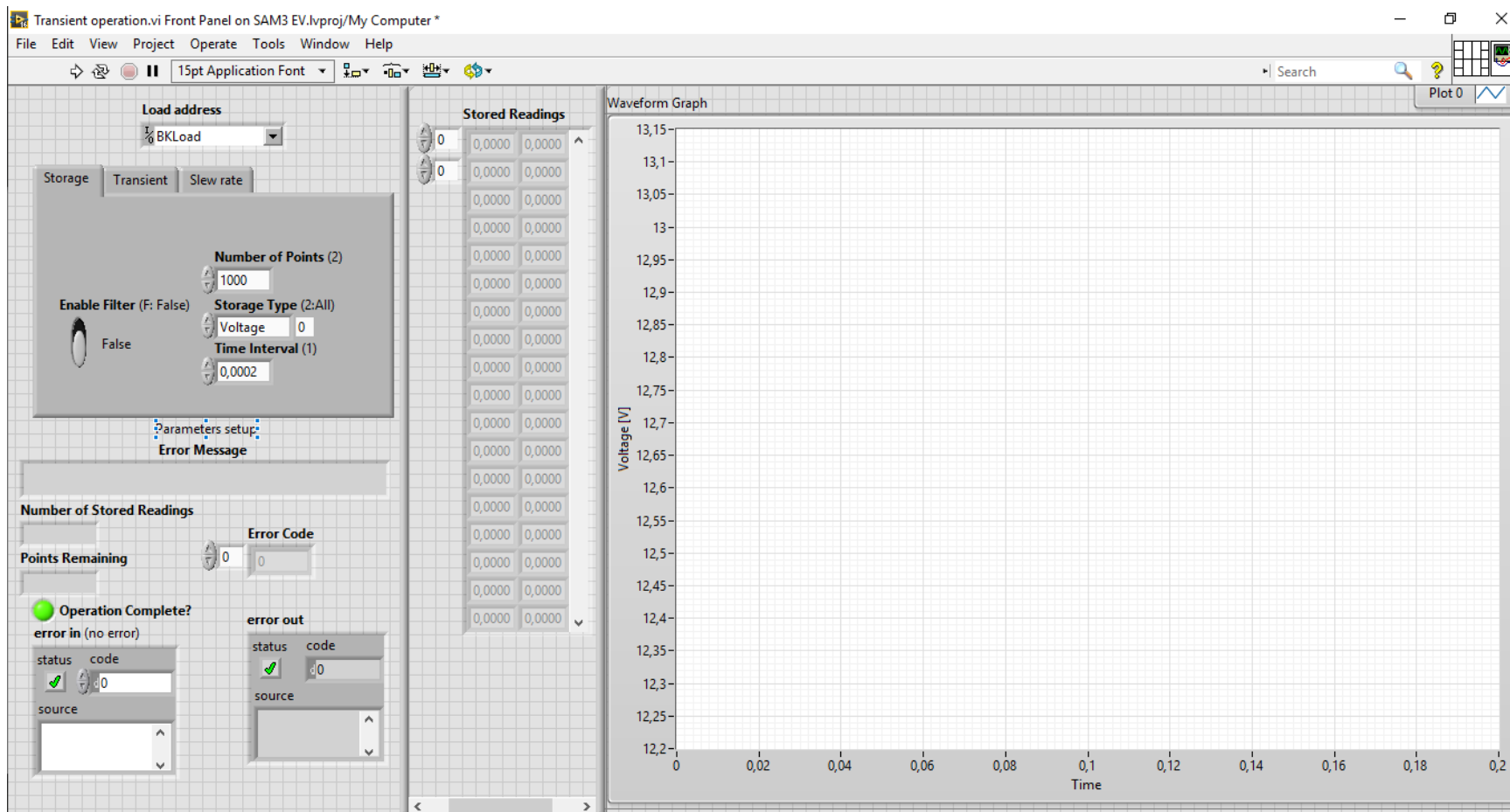
Obr. 57: Hlavní okno Data Adjust

10.8 GUI PRO MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU DLE ČSN



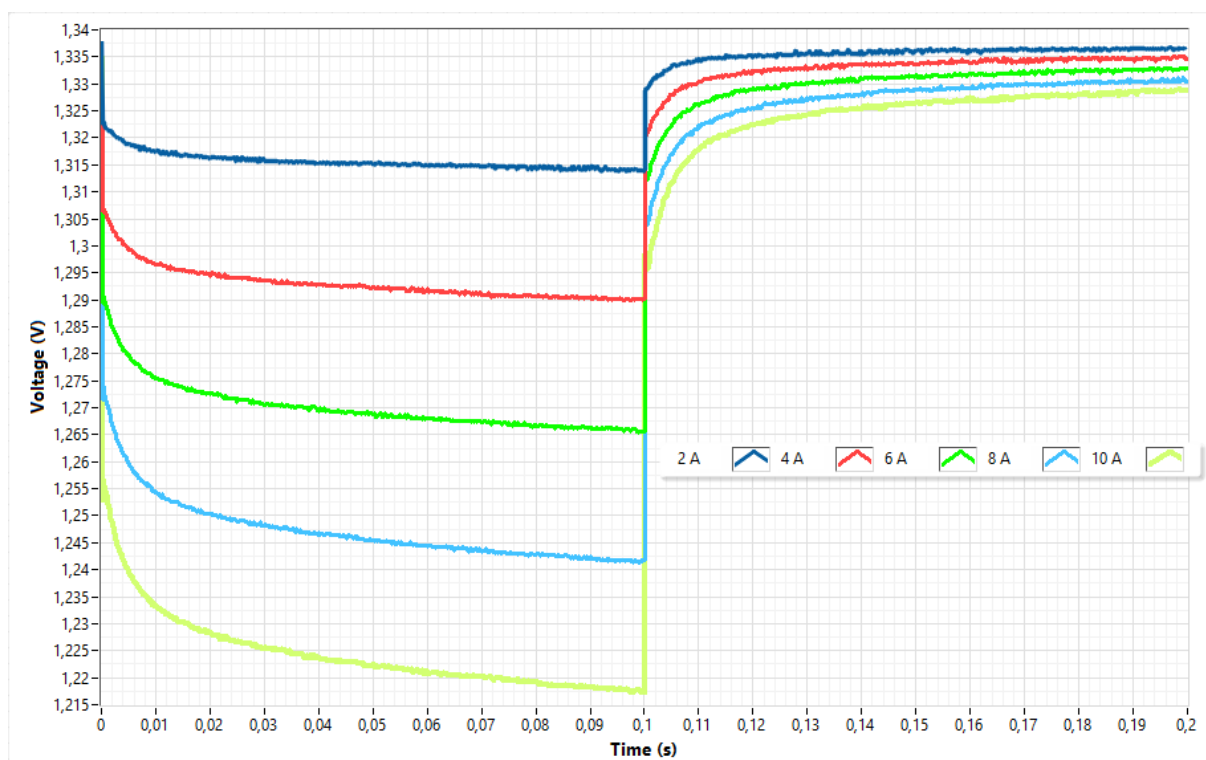
Obr. 58: GUI pro MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU DLE ČSN

10.9 GUI PRO IMPULZNÍ TESTOVÁNÍ

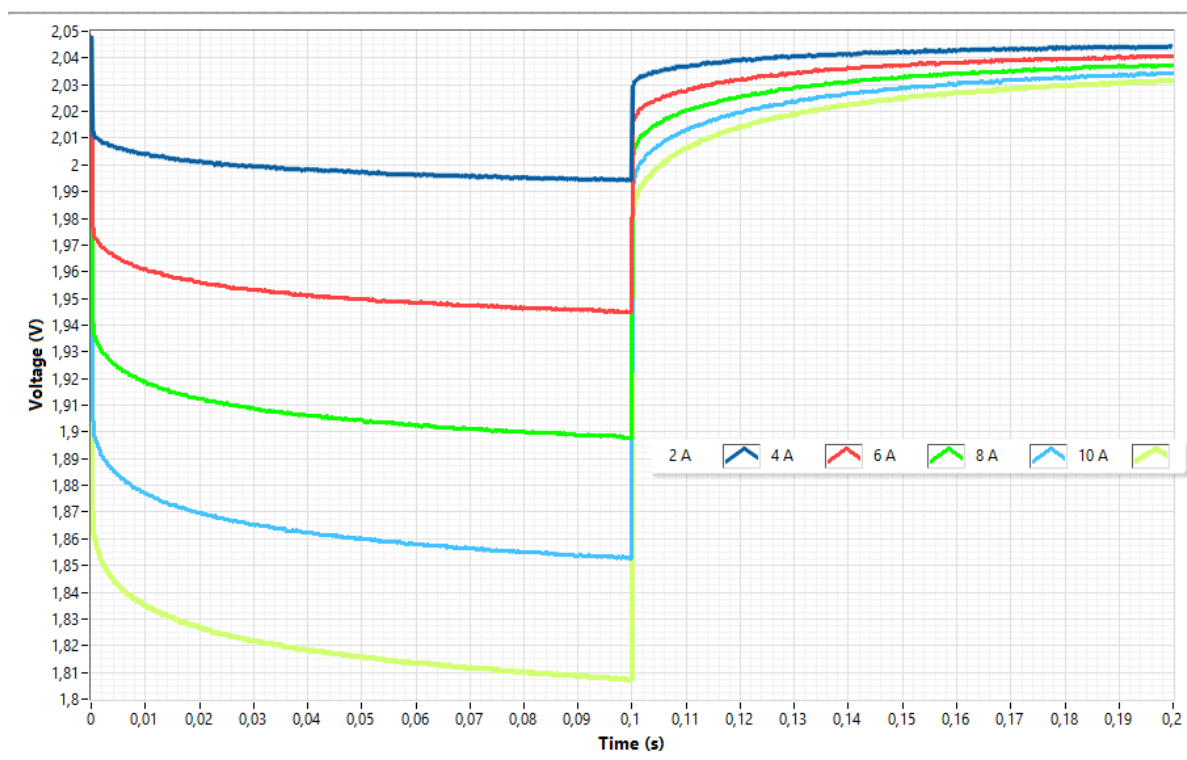


Obr. 59: GUI aplikace pro pulzní testování

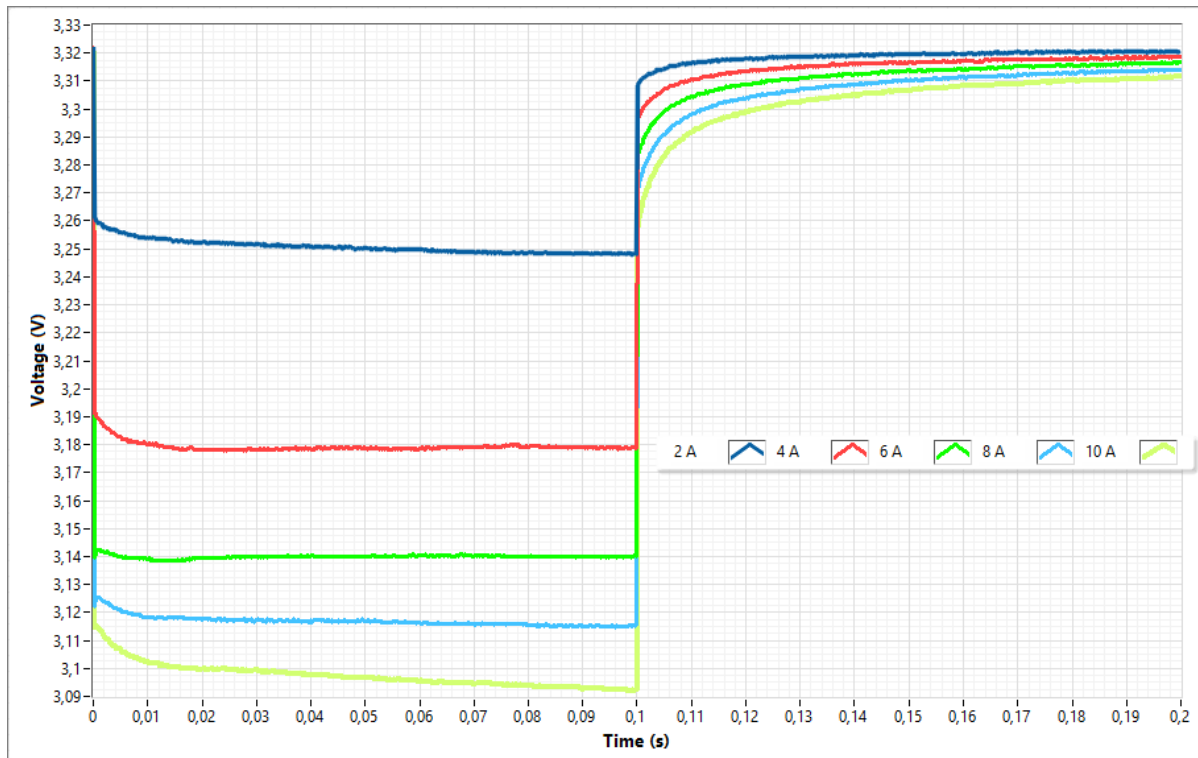
10.9.1 Grafické zobrazení naměřených hodnot impulzní diagnostiky



Graf 10: Impulzy pro vzorek Ni-Cd článku Ferak KPL10 10 Ah/1,4 V



Graf 11: Impulzy pro vzorek olověného akumulátoru Graupner 10 Ah/2 V



Graf 12: Impulzy pro vzorek LiFePO článku Headway 10 Ah/3,7 V

10.10 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ TODVPULSE MAIN

