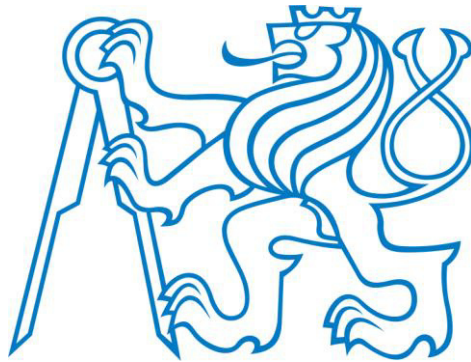


České Vysoké Učení Technické v Praze

Fakulta dopravní



Bc. Jan Antoš

**Komplexní testování trakčních lithium iontových
akumulátorů**

Diplomová práce

2015



K620..... Ústav dopravní telematiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jan Antoš

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – ID – Inženýrská informatika v dopravě a spojích

Název tématu (česky): **Komplexní testování trakčních lithium iontových akumulátorů.**

Název tématu (anglicky): Complex Testing of Traction Lithium Ion Cells.

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Seznamte se se způsoby modelování elektrochemických akumulátorů, a to zejména Li-ion pro trakční aplikace.
- Analyzujte možnosti využití pracoviště pro testování elektrických akumulátorů pro nastavení parametrů a charakteristik modelů akumulátoru.
- Implementujte komplexní test akumulátoru, který proměří důležité parametry a charakteristiky akumulátoru včetně dlouhodobých (úbytek kapacity) dle provozních podmínek akumulátoru (proudy, hloubka vybíjení, teplota aj.).
- Navrhněte formu výstupu komplexního testu. Výstup by měl být přehledný a měl by poskytovat parametry a charakteristiky pro model.
- Komplexní test ověřte alespoň na dvou různých typech Li-ion akumulátorů.

Rozsah grafických prací: Schémata stavových automatů komplexního testu.
Návrh výstupního listu komplexního testu.

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Péra M.C. et al.: Electrochemical Components, ISTE, UK, 2013.

Sadil J., Leso M.: Workplace for Performance Testing of Energy Accumulators for Electric Devices, AiMT, Vol. 7, No. 1, 2012.

Antoš J.: Testování elektrických akumulátorů s využitím konečného stavového automatu.

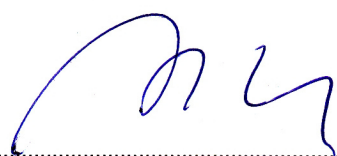
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jindřich Sadil, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **17. července 2014**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

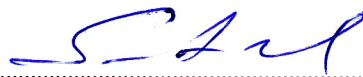
Datum odevzdání diplomové práce: **31. května 2015**

a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia

b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

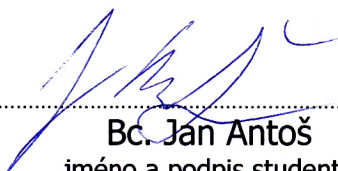


doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravní telematiky



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Jan Antoš
jméno a podpis studenta

V Praze dne 17. července 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Komplexní testování trakčních lithium iontových akumulátorů vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jindřicha Sadila Ph.D. a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci této práce. Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že ČVUT v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 3. června 2015

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jindřichu Sadilovi Ph.D. za odbornou pomoc z oblasti hardwaru i softwaru a za svědomité vedení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Janu Sedlákovi ze společnosti i4wifi za zapůjčení vzorků LTO článků pro provedení experimentu.

Výzkum byl realizován za pomoci podpory Technologické agentury České republiky, program Centra kompetence, projekt TE01020020, Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka. Za tuto podporu autor děkuje.

Abstrakt

Název práce: Komplexní testování trakčních lithium iontových akumulátorů

Autor: Bc. Jan Antoš

Katedra: Ústav Dopravní telematiky

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jindřich Sadil, Ph.D.

Klíčová slova: elektrický akumulátor, model, měření, automatizace, LabVIEW

Abstrakt: Předmětem diplomové práce „Komplexní testování trakčních lithium iontových akumulátorů“ je vytvoření nové verze softwaru pro testování elektrických akumulátorů na pracovišti pro testování elektrických akumulátorů při fakultě dopravní ČVUT a následně jeho ověření provedením dvou zkušebních testů. Pracoviště pro testování akumulátorů je v této práci blíže popsáno. Cílem tohoto řešení je automatizování celého testovacího procesu v rámci čehož se počítá s efektivním propojením všech v této práci zmíněných dílčích částí testování a ruku v ruce s tím uživatelské zvýšení komfortu programu a tím i celého pracoviště.

V práci je věnována pozornost problematice nabíjení a vybíjení elektrických akumulátorů a to jak z hlediska krátkodobého, tak i dlouhodobého. Popsány jsou zde náhradní modely akumulátorů a významná část práce je věnována popisu nově vzniklého softwaru v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW.

Funkčnost programu, jehož součástí je i vyhodnocení naměřených dat, byla ověřena reálným testováním na dvou různých typech akumulátorů na výše zmíněném pracovišti.

Abstract

Title: Complex testing of traction lithium ion cells

Author: Bc. Jan Antoš

Department: Department of Transport Telematics

Supervisor: Ing. Jindřich Sadil, Ph.D.

Keywords: electric accumulator, model, measurement, automation, LabVIEW

Abstract: This Master's thesis „Complex testing of traction lithium ion cells“ deals with creating of the new version of software for testing electric accumulators which can be used for testing workplace at the Faculty of transportation science. This new version of software is verified by two experimental tests. This workplace is also described in the thesis. The aim of this thesis is automation of the whole testing process which includes effective connectivity of all in this thesis mentioned parts of the testing. This will lead to comfortable use of program by the user and by the programmer.

This Master's thesis deals with the problems of charging and discharging electric accumulators in a short-term and also in a long-term period. This thesis describe alternative models of electric accumulators and significant part of this thesis obtain a description of newly created software which is programming in graphical development environment LabVIEW.

Functionality of the program which includes evaluation of the measured data as well has been tested by real testing of accumulators with two different types of accumulators at above mentioned workplace.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Matematické modely akumulátoru	10
2.1	Úvod	10
2.2	Modely náhradních elektrických obvodů	10
2.2.1	Model s jedním vnitřním odporem	11
2.2.2	Model s jednou časovou konstantou.....	11
2.2.3	Model se dvěma časovými konstantami.....	12
2.2.4	Model se závislostí na směru proudu	13
2.2.5	Kompletní obvodový model celého akumulátoru	14
2.3	Použitý model akumulátoru.....	14
3	Pracoviště pro testování elektrických akumulátorů.....	16
3.1	Účel pracoviště pro testování elektrických akumulátorů	16
3.2	Popis pracoviště pro testování elektrických akumulátorů	16
3.3	Analýza použitelnosti pracoviště pro komplexní testování.....	17
3.4	Hardwarové řešení pracoviště pro testování elektrických akumulátorů.....	18
3.4.1	Programovatelný zdroj	18
3.4.2	Programovatelná zátěž.....	18
3.4.3	Programovatelný oběhový termostat Julabo F 33 - MA.....	19
3.4.4	Převodník proudu s Hallovou sondou HT300M	20
3.4.5	16-bitová měřicí karta.....	20
3.4.6	Bezpečnostní obvod.....	21
4	Implementace komplexního testu akumulátorů	22
4.1	Struktura Komplexního testu akumulátorů	22
4.2	Prvotní metacyklus	22
4.3	Měření vnitřního odporu.....	23
4.3.1	Úvod	23
4.3.2	Struktura programu.....	23
4.3.2.1	Hlavní While smyčka	24
	Stav „Inicializace testování“	30
	Stav „Vybíjení - změna SOC“	30
	Stav „Měření OCV po vyb“	30
	Stav „Měření Ri po vyb“	31

Stav „Nabíjení - změna SOC“	31
Stav „Měření OCV po nab“	31
Stav „Měření Ri po nab“	32
Stav „Plně dobítí“	32
Stav „Konec“	32
4.3.2.2 Měřicí While smyčka	32
4.3.2.3 Zapisovací While smyčka	33
4.3.2.4 While smyčka pro tvorbu grafů.....	34
4.3.2.5 While smyčka pro bezpečnostní obvod.....	34
4.4 Měření opotřebení.....	34
4.4.1 For smyčka testu opotřebení.....	36
4.4.2 For smyčka pro určení času konce testu opotřebení.....	40
4.4.3 While smyčka pro vykreslování grafů.....	43
4.5 Vyhodnocení komplexního testu.....	43
4.5.1 Vyhodnocení prvního měření Ri/OCV.....	44
4.5.1.1 Parametr R_0	44
4.5.1.2 Ostatní parametry	45
4.5.2 Vyhodnocení měření opotřebení	45
4.5.3 Vyhodnocení druhého měření Ri/OCV	47
4.6 Parametry testování	47
5 Provedené experimenty komplexních testů.....	49
5.1 Forma výstupu komplexního testu	49
5.1.1 Vyhodnocení komplexního testu.....	49
5.1.2 Datové soubory.....	49
5.2 Technologie použitých lithiových akumulátorů.....	49
5.3 Komplexní test s akumulátorem LiFeYPO_4	50
5.3.1 Popis technologie LiFeYPO_4	50
5.3.2 Popis měřeného vzorku	51
5.3.3 Vyhodnocení prvního zkušební testu	52
5.4 Komplexní test s akumulátorem $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	54
5.4.1 Popis technologie LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$).....	54
5.4.2 Popis měřeného vzorku	55
5.4.3 Vyhodnocení druhého zkušební testu.....	57

5.5 Celkové vyhodnocení zkušebních komplexních testů.....	58
6 Závěr	61
7 Odkazy, literatura.....	62
Seznam použitých zkratk.....	64
Seznam obrázků	65
Seznam tabulek.....	66
Přílohy	67
Příloha 1: Vyhodnocení komplexního testu pro první a druhý zkušební test	67
Příloha 2: Tabulky parametrů testování	76
Příloha 3: Čelní panel Komplexního testu	80
Příloha 4: Čelní panel testu opotřebení	81

1 Úvod

Elektrické akumulátory mají dnes v dopravě stále častější využití, a proto je nezbytné provádět i jejich testy pro určení jejich provozních vlastností. Testování akumulátorů může být dlouhodobé nebo krátkodobé. Dlouhodobé testy slouží k určení životnosti akumulátoru, respektive jeho opotřebení. Při krátkodobých testech se zjišťují vlastnosti akumulátorů, například vnitřní odpor akumulátoru a jiné. Tyto dva druhy testování je třeba provádět s různými vstupními testovacími parametry, čímž je obtížné provádět je dohromady a jsou také různě časově náročné. Nevýhodou dlouhodobých testů je právě jejich delší doba trvání, obvykle až stovky cyklů. Jelikož je tak problematika testování elektrických akumulátorů relativně složitá a uživatelsky tak méně přívětivá, vznikl požadavek k vytvoření tzv. Komplexního testu, který by měl tyto nedostatky odstranit.

Cílem diplomové práce je navrhnout, implementovat a odzkoušet komplexní test elektrických, a to zejména lithium iontových trakčních akumulátorů. Tento komplexní test je navržen a uzpůsoben tak, aby bylo možné ho provádět na pracovišti pro testování elektrických akumulátorů (dále jen pracoviště). V rámci návrhu se i nadále počítá s využitím konečných stavových automatů, které byly do některých částí vyvíjeného programu zavedeny již v rámci autorovy bakalářské práce [1]. Hlavním účelem komplexního testu je provést ucelené měření na daném akumulátoru¹, z něhož získaná data budou vhodná pro použití a porovnání v souběžně nezávisle vyvíjeném modelu. Komplexním testem by se mělo docílit jak výrazného uživatelského zlepšení procesu testování na daném pracovišti, tak i celkového zefektivnění samotného testování. Uživatelské zlepšení spočívá v tom, že nově bude stačit zapojit daný akumulátor na začátku měření a na konci měření uživatel obdrží všechna potřebná a vyhodnocená data o daném akumulátoru. Zefektivnění celého testování znamená, že komplexní test je navržen tak, aby proběhl v co možná v nejkratším čase bez uživatelských zásahů na pracovišti během testování, čímž dojde k úspoře času oproti případu, kdy při provádění dílčích částí komplexního testu zvlášť mohly díky omezeným možnostem operability uživatelů vznikat i několika denní prodlevy mezi měřeními jednotlivých jeho částí (konec měření vychází na víkend, svátek apod.). Tyto a jiné další úspory času v rámci měření povedou bezpochyby k zefektivnění celého testování.

¹ V současné době již pracoviště umožňuje pro některé dílčí části komplexního testu i testování více akumulátorů zapojených do série, tedy baterii o více článcích.

V této práci jsou v kapitole 2 popsány matematické modely akumulátorů, jejich vlastnosti, výhody a vhodnost jejich použití pro komplexní testování.

Dále je pak v kapitole 3 popsáno testovací pracoviště, jeho jednotlivé části, účel a možnosti využití pro komplexní testování.

Těžiště mojí práce spočívá v kapitolách 4 a 5. Kapitola 4 je věnována vytvořenému softwaru ve vývojovém prostředí LabVIEW, který automatizuje celý proces komplexního testu. Z důvodu značné rozsáhlosti softwaru není v rámci této práce možné uvést jeho detailní rozbor a popis zdrojového kódu. Takže i přes značnou podrobnost této kapitoly, je její účel spíše v určitém hlubším seznámení čtenářů a možných budoucích uživatelů testovacího pracoviště s problematikou tohoto komplexního testu.

V kapitole 5 jsou uvedeny výstupy a vyhodnocení dvou nezávisle provedených testů různých typů akumulátorů. V rámci zadání této diplomové práce byly zvoleny lithiové akumulátory dvou různých technologií, a to LiFeYPO_4 a $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Bližší seznámení s nimi je také součástí této kapitoly.

Stručné zhodnocení práce je uvedeno v závěru.

2 Matematické modely akumulátoru

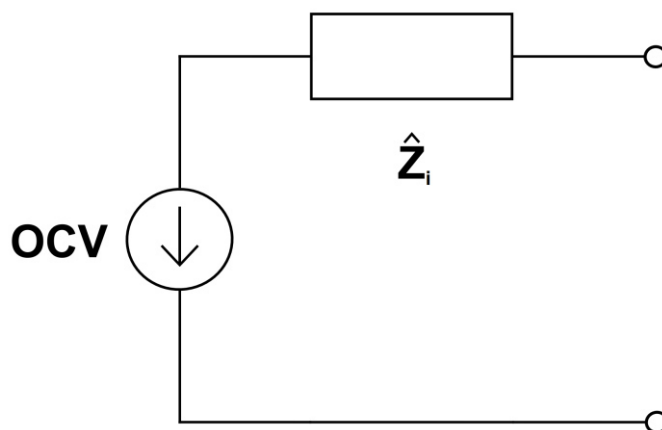
2.1 Úvod

Matematické modely uvedeny v této kapitole slouží zejména pro modelování krátkodobého chování akumulátorů. Pro určení dlouhodobých charakteristik akumulátorů, jako jsou životnost a opotřebení, nejsou tyto modely příliš vhodné, jelikož při určování těchto charakteristik vykazují značné nepřesnosti.

K modelování akumulátorů lze použít dva druhy modelů: Mikrostrukturní modely a modely náhradních elektrických obvodů. Mikrostrukturní modely uvažují fyzikální vlastnosti jednotlivých částic, čímž se stávají příliš složité a v rámci daného testovacího pracoviště nezvládnutelné. Proto používáme modely náhradních elektrických obvodů, jejichž vstupní parametry, zejména vnitřní odpor akumulátoru, lze v rámci našeho testovacího pracoviště zjistit. Nespornou výhodou těchto modelů je jejich značná modularita, kdy lze nové modely vytvářet téměř libovolně přidáním či ubráním libovolných elektrických součástí do elektrických obvodů. Zapojení těchto prvků je limitováno pouze základními fyzikálními zákony platícími pro elektrické obvody. Ačkoliv lze dosáhnout vytvoření nových modelů pouze změnou zapojení elektrických obvodů, základní typy těchto modelů uvedeny v následujících kapitolách jsou již poměrně ustáleny a žádné výrazné inovace se v této oblasti nepředpokládají. Modely náhradních elektrických obvodů pro akumulátory využívají v převážné většině tři základní typy elektrických součástí. Zdroj stejnosměrného napětí, rezistor a kondenzátor. Rezistory reprezentují vnitřní odpor akumulátorů a kondenzátory pak model více přibližují realitě tak, že omezují skokové změny napětí akumulátoru a také zajišťují nelineární růst napětí [2].

2.2 Modely náhradních elektrických obvodů

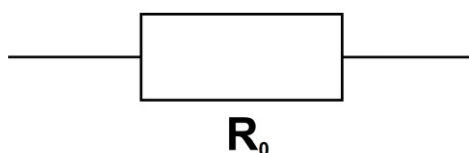
Na obrázku 1 je znázorněno schéma náhradního obvodu akumulátoru, kde OCV představuje zdroj stejnosměrného napětí a \hat{Z}_i celkovou vnitřní impedanci akumulátoru. Napětí akumulátoru naprázdno (OCV), které je v modelu reprezentováno pomocí zdroje napětí, je funkcí stavu nabití akumulátoru (SOC). V dalších podkapitolách této kapitoly se budu zabývat pouze vnitřní impedanci. Tedy budu nahrazovat \hat{Z}_i postupně soustavou rezistorů a kondenzátorů tak, aby se pokud možno co nejvíce přiblížily ke skutečným vlastnostem akumulátoru. Tedy aby bylo možno akumulátor tímto modelem nahradit.



Obrázek 1 Obvod akumulátoru a zdroje

2.2.1 Model s jedním vnitřním odporem

Tento model reprezentuje celkový odpor akumulátoru pouze jako jednu veličinu. Vzhledem ke složitosti akumulátorů není tento model příliš přesný pro jejich nahrazování. Je ho ale možné použít pro základní výpočty elektrických obvodů, ve kterých se vyskytují akumulátory. Zde je pak nahrazení odporu akumulátoru tímto modelem s jedním rezistorem zcela postačující. Toto však není případ, ke kterému bych chtěl v této práci náhradní modely akumulátorů využít.

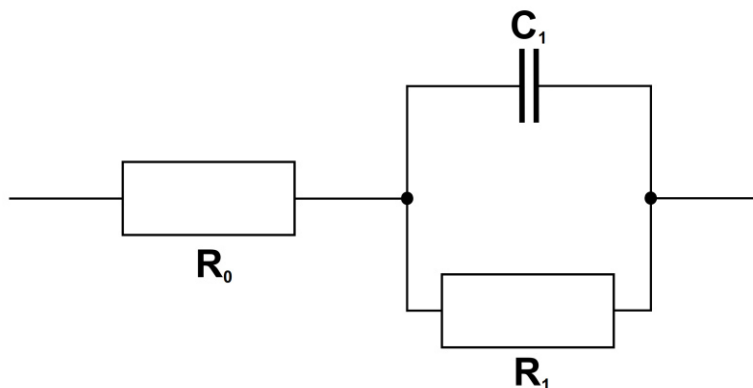


Obrázek 2 Model s 1 vnitřním odporem

2.2.2 Model s jednou časovou konstantou

V tomto modelu je pouze jedna stavová veličina, a tou je napětí na kondenzátoru C_1 . Tento model je relativně jednoduchý a není tak pro přesnější modelování akumulátoru příliš vhodný, protože pomocí jedné časové konstanty nelze přizpůsobit parametry tohoto

modelu reálným datům [2]. Podstata tohoto modelu vychází z teorie dvojité vrstvy², kde R_0 reprezentuje odpor elektrolytu, C_1 (C_{dl}) reprezentuje kapacitu dvojité vrstvy a R_1 (R_{ct}) reprezentuje odolnost proti přenosu náboje, který závisí na polarizaci a signálech o malé amplitudě [3].

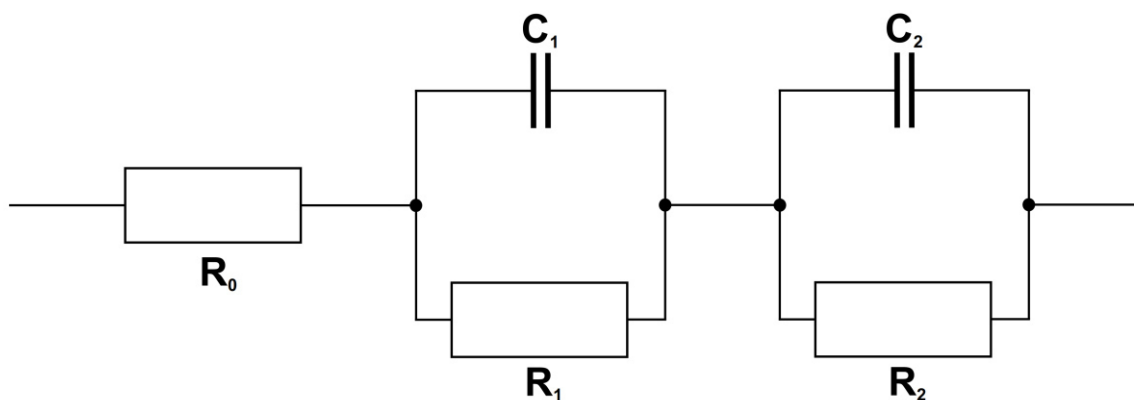


Obrázek 3 Model s 1 časovou konstantou

2.2.3 Model se dvěma časovými konstantami

Zde jsou již dvě stavové veličiny, čehož bylo docíleno přidáním dalšího RC členu. Přidáním dalšího RC členu do náhradního obvodu akumulátoru se značně zpřesní určení svorkového napětí akumulátoru i v nestacionárních režimech [2]. Nestacionární režim znamená, že se na akumulátoru často mění směr toku proudu nebo jeho velikost, tedy dochází k častým přechodům z nabíjení do vybíjení akumulátoru a opačně. Z provozních charakteristik trakčních akumulátorů například v elektrických vozidlech přitom vyplývá, že tyto nestacionární režimy jsou zde relativně časté. Tento model se tak svými vlastnostmi již více blíží realitě, a to i při zachování jeho relativně nízké složitosti. Z těchto důvodů bude model se dvěma časovými konstantami vhodný pro naše další použití při modelování provozu testovaných akumulátorů.

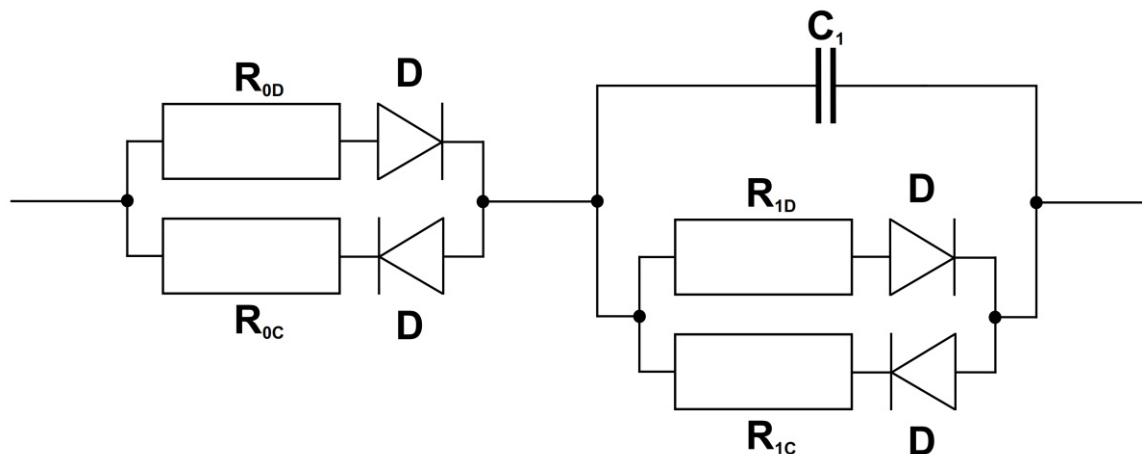
² Dvojitá vrstva (Helmholtz, 1879): kov ponořený v roztoku se na svém povrchu nabíjí záporně (je tam nadbytek elektronů), a proto přitahuje z okolí pozitivní ionty, aby byl vytvořen rovnovážný stav k těmto elektronům. K vrstvě elektronů se tak okamžitě vytváří vrstva iontů s opačným nábojem. Vznikne tak „dvojitá vrstva“ na povrchu kovu [14].



Obrázek 4 Model se dvěma časovými konstantami

2.2.4 Model se závislostí na směru proudu

Model se závislostí na směru toku proudu je vlastně jakási nástavba či rozšíření modelů zmíněných v předchozích kapitolách. Implementovat do modelu závislost na směru toku proudu lze u všech takovýchto modelů. Pro srozumitelné uvedení do této problematiky byl pro úpravu na model se závislostí na směru proudu vybrán model s jednou časovou konstantou, viz kapitola 2.2.2. Úprava modelu na model se závislostí na směru proudu je zajištěna doplněním modelu o diody zajišťující požadovaný směr toku proudu tak, aby byly při nabíjení a vybíjení zapojeny rezistory o různých jmenovitých odporech. Tento model pak více odpovídá skutečnosti než model bez závislosti na směru proudu, jelikož chemické reakce uvnitř akumulátoru jsou během nabíjení a vybíjení různé, a tak se i vnitřní odpory musí lišit. Nicméně tyto rozdíly nemusí být tak výrazné, aby se vyplatilo je za cenu zvýšené složitosti modelu zohledňovat. Ve schématu na obrázku 5 značí rezistory R_{0D} a R_{1D} dílčí vnitřní odpory při vybíjení akumulátoru a rezistory R_{0C} a R_{1C} reprezentují vnitřní odpory při nabíjení akumulátoru za předpokladu, že při nabíjení teče proud zprava doleva a při vybíjení opačným směrem.



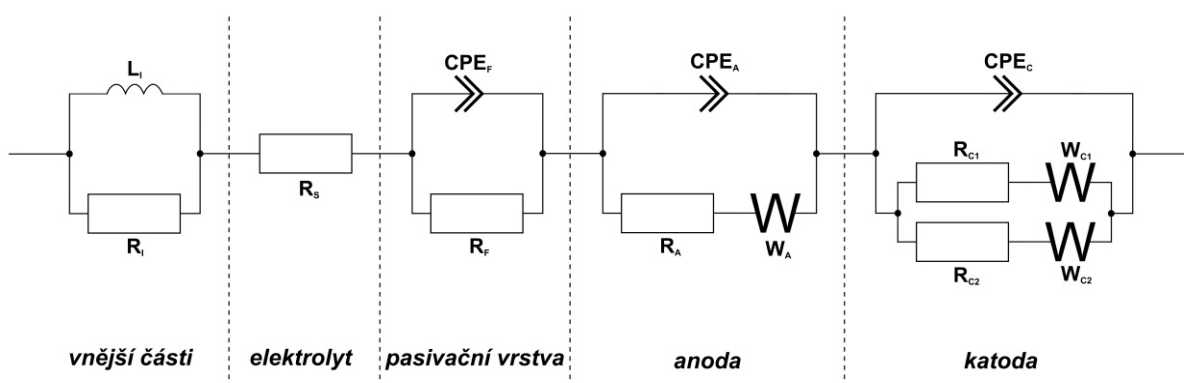
Obrázek 5 Model se závislostí na směru proudu

2.2.5 Kompletní obvodový model celého akumulátoru

V tomto modelu jsou již zahrnuty všechny součásti akumulátoru. Tedy zleva podle obrázku 6:

- vnější části akumulátoru (přívodní vodiče),
- elektrolyt (tekutá část akumulátoru pro iontovou výměnu),
- pasivační vrstva (vrstva pevných částic na povrchu elektrody),
- anoda (elektroda, na níž převládá anodická reakce) a
- katoda (elektroda, na níž převládá katodická reakce).

Významný rozdíl oproti předchozím modelům je v tom, že zde již není uvažován ideální akumulátor, jehož všechny součásti mají lineární charakteristiky, ale je zde uvažován akumulátor reálný, u něhož se některé jeho části chovají nelineárně. Zejména kondenzátory reprezentující kapacitu dvojité vrstvy (CPEF, CPEa, CPEc) jsou zde nelineárními prvky. Tato nelinearita je způsobena nepravidelností povrchu elektrod. Dále jsou zde paralelně dva odpory R_{c1} a R_{c2} , které modelují rozdílnost velikostí částic v katodě. Je zde také pamatováno na nízké frekvence, tedy frekvence nižší než 0,1 Hz, při nichž se objevuje Warburgova impedance³, v modelu označena W_a , W_{c1} a W_{c2} [3].



Obrázek 6 Kompletní obvodový model celého akumulátoru (převzato z [3])

2.3 Použitý model akumulátoru

Vedoucí této diplomové práce používá pro modelování krátkodobého chování akumulátorů model se dvěma časovými konstantami popsany blíže v kapitole 2.2.3.

³ Warburgova impedance je tzv. elektrochemickou impedancí, která omezuje rychlost pohybu iontů v elektrolytu v místech, kde dochází ke změně chemického potenciálu. Tedy zejména v blízkosti elektrod, kde je přechod mezi řidším a hustším prostředím. Čím vyšší je rychlost pronikání iontů do povrchu elektrody, tím vyšší je i Warburgova impedance [3].

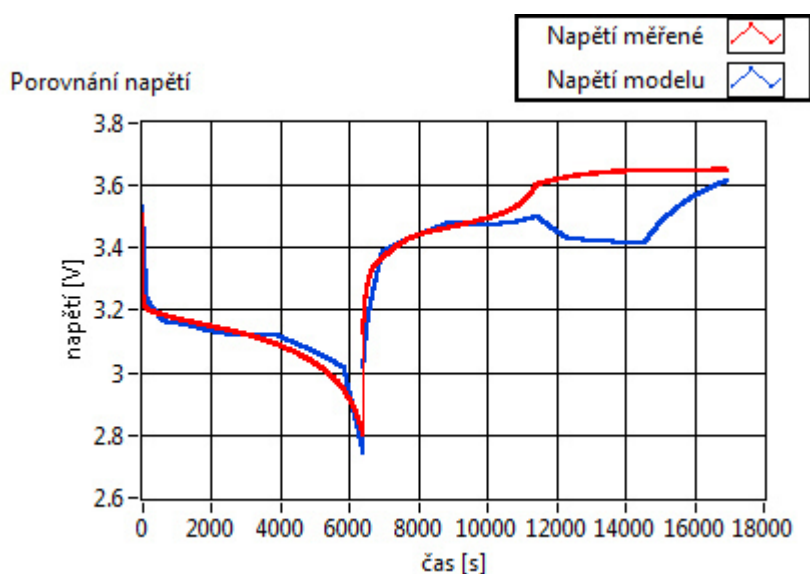
Výhodou tohoto modelu je možnost modelování nestacionárních průběhů proudu akumulátoru. Odchyly napětí modelu od skutečného napětí jsou přitom veskrze malé.

Přiblížení tohoto modelu více k reálné situaci je způsobeno přidáním dalšího kondenzátoru a tím další stavové veličiny U , napětí na kondenzátoru C_2 . Přiblížení tohoto modelu ke skutečnosti pomáhají významně právě kondenzátory, které se nenabíjejí a nevybíjejí skokově, ale postupně. Toto více odpovídá reálnému chování akumulátorů, u nichž zejména vlivem dvojité vrstvy a dalších chemických reakcí uvnitř akumulátoru dochází také k nelineárnímu průběhu nabíjení a vybíjení.

Na obrázku 7 je uvedeno porovnání modelu s měřeným napětím během jednoho hlubokého cyklu o hloubce 100 %. Vstupem modelu byl průběh měřeného proudu, výstupem bylo napětí. Pro model byly použity výsledky komplexního testování akumulátorů LiFeYPO_4 , viz kapitola 5.3.

Výstupní napětí modelu bylo porovnáno s měřeným napětím. Porovnání měřeného s modelovaným napětím vykazuje nepatrné odchylky s výjimkou konečné fáze nabíjení (v čase 6000s), kdy se přechází z režimu konstantního proudu do režimu konstantního napětí. Zde bude ještě nutné model upravit.

Pro modelování dlouhodobého chování akumulátoru, tedy pro chování z hlediska opotřebení, využívá vedoucí této diplomové práce empirický model založený na stavovém úbytku SOH pro každý krok (iteraci) výpočtu. Výchozí hodnoty úbytku SOH jsou stanoveny pomocí experimentálního měření opotřebení, blíže viz kapitola 4.5.2.



Obrázek 7 Průběh napětí OCV aku/model

3 Pracoviště pro testování elektrických akumulátorů

3.1 Účel pracoviště pro testování elektrických akumulátorů

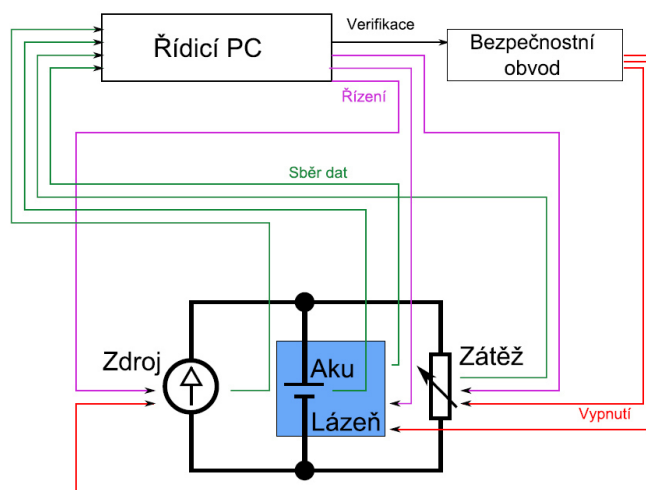
Účelem pracoviště je ověřování vlastností akumulátorů a to buď z hlediska krátkodobého nebo dlouhodobého. Výsledkem krátkodobých zkoušek jsou především vybíjecí a nabíjecí charakteristiky akumulátorů.

Dlouhodobé zkoušky jsou především zkoušky cyklické životnosti akumulátorů. Tedy mnohonásobné vybíjení a nabíjení akumulátoru za definovaných podmínek a sledování postupného ubývání jejich kapacity [5].

3.2 Popis pracoviště pro testování elektrických akumulátorů

Měřicí pracoviště se skládá z těchto částí: řídicího počítače, bezpečnostního obvodu, programovatelné zátěže, programovatelného zdroje, programovatelné teplotní lázně, nezávislé Hallovy sondy pro měření proudu a napětí a testovaného akumulátoru.

Součástí řídicího počítače je měřicí karta a software, který slouží k ovládání programovatelného zdroje, zátěže a lázně a ke generování signálu pro bezpečnostní obvod. Přehledové schéma pracoviště je znázorněno na obrázku 8. Hallova sonda zde není zakreslena, její zapojení je na přívodním vodiči k akumulátoru, tak aby snímala proud tekoucí akumulátorem při vybíjení i nabíjení.



Obrázek 8 Schéma pracoviště pro testování elektrických akumulátorů (převzato z [4])



Obrázek 9 Pracoviště pro testování elektrických akumulátorů [5]

3.3 Analýza použitelnosti pracoviště pro komplexní testování

Pracoviště pro testování elektrických akumulátorů umožňuje provádění komplexního testu a to díky těmto vlastnostem.

Zátěž i zdroj jsou programovatelné. Lze je tedy ovládat z měřicího počítače pomocí spouštěného programu v LabVIEW, ve kterém stanovíme jednotlivé parametry vybíjecích a nabíjecích cyklů. Typickými parametry jsou vybíjecí a nabíjecí proudy a hloubka vybití. Lze tedy provést určitý počet cyklů s nižší než 100 procentní hloubkou vybití (tzv. normální cykly) a poté cyklus se 100 procentní hloubkou vybití (tzv. test kapacity) a určit tak vzniklé opotřebení akumulátoru při normálních cyklech.

Dalším prvkem pracoviště je programovatelná lázeň, která umožňuje provádět tyto normální cykly a testy kapacity při různých zvolených teplotách, čímž lze získat přehled o chování akumulátorů při různých teplotách. Je zde třeba podotknout, že jsou zde jistá technická omezení, tedy zejména, že jsou akumulátory v lázni umístěny v kapalině, která má poměrně značnou tepelnou kapacitu, což sice zajistí perfektní udržování dané teploty na pouzdře akumulátoru, nicméně v reálném provozu jsou akumulátory obklopeny látkou s nižší tepelnou kapacitou (vzduch, plastové kryty apod.) nebo sousedními akumulátory, které jsou během provozu sami o sobě zdroji tepla. Popsaná odlišnost se projevuje zejména při nízkých teplotách.

Dále je zde bezpečnostní obvod, který v případě výpadku komunikace měřicího počítače převede pracoviště do bezpečného stavu, tedy odpojí přístroje od napájecí sítě.

Díky tomu lze provádět dlouhodobé testy, které mohou trvat i několik týdnů, bez přítomnosti lidského operátora. Ten musí pouze nastavit parametry testování před jeho spuštěním.

V rámci testování je také velmi významnou částí pořizování dat, na jejichž základě lze pak vyhodnocovat průběh daného testování. Pořizování přesných dat o aktuálním napětí a proudu akumulátoru umožňuje měřicí karta a převodník proudu s Hallovou sondou HT300M. Hodnoty proudu lze včetně zápisu do datových souborů zaznamenávat s periodou až 10 ms. Lze tak tedy zaznamenat i náhlé změny proudu a napětí, a následně pak správně stanovit přesné parametry pro matematický model. V případě přístrojů je perioda pořizování dat zdola omezena v případě zátěže na cca 140 ms a méně pak v případě zdroje. Data s takto vysokou periodou vzorkování pak v některých případech nejsou použitelná k určení reálných změn proudu a napětí.

3.4 Hardwarové řešení pracoviště pro testování elektrických akumulátorů

3.4.1 Programovatelný zdroj

Jako programovatelný zdroj je použit A6KW od německého výrobce PCE Powercontrol. Tento zdroj dává maximální napětí 20 V, maximální proud 300 A a jeho maximální výkon je 6000 W. Tento přístroj lze ovládat sériovou komunikací pomocí portu RS-232.



Obrázek 10 Programovatelný zdroj A6KW (převzato z [9])

3.4.2 Programovatelná zátěž

Jako programovatelná zátěž je použita EL-9080-400 od německého výrobce Elektro-automatik. Tato elektronická zátěž dovoluje maximální vstupní napětí při zatížení 80 V, maximální vstupní proud při zatížení 400 A a maximální výkon 4800 W. Tento přístroj lze ovládat sériovou komunikací pomocí portu RS-232.



Obrázek 11 Programovatelná zátěž EL-9080-400 [6]

3.4.3 Programovatelný oběhový termostat Julabo F 33 - MA

Programovatelný oběhový termostat nám umožňuje měřit charakteristiky akumulátorů v rozsahu od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ což výrazně převyšuje rozsah provozních teplot, jimž jsou akumulátory běžně vystaveny. Lázeň uvnitř oběhového termostatu má ovšem omezené rozměry, tudíž není vhodná pro testování více akumulátorů větších rozměrů současně. Pro komunikaci s měřicí kartou je použito rozhraní RS 232.



Obrázek 12 Julabo F 33 - MA [8]

3.4.4 Převodník proudu s Hallovou sondou HT300M

Převodník proudu s Hallovou sondou HT300M od britského výrobce elektromagnetických snímačů a součástek TELCON, disponuje těmito parametry: rozsah proudu do 300 A, napájecí napětí 12 V, pracovní teplota od -10 °C do + 85 °C, hmotnost pouze 110 g a velmi kompaktní rozměry. Mezi její výhody patří to, že při jejím použití nedochází k žádným útlumům na měřeném vodiči, nevyžaduje žádný šuntový odpor, obsahuje polovodičové ochrany, je velmi spolehlivá a její odezva, tedy frekvence s jakou dokáže měřit proud, je velmi vysoká. To je dáno tím, že převodník proudu s Hallovou sondou reaguje na změny protékajícího proudu téměř okamžitě, změnou svého vnitřního napětí. Hallova sonda pracuje na principu Hallova jevu⁴, pomocí něhož lze měřit proud protékající vodičem bezkontaktně. Bližší seznámení s vzorkovacími periodami během testování lze nalézt v kapitole 4.6.

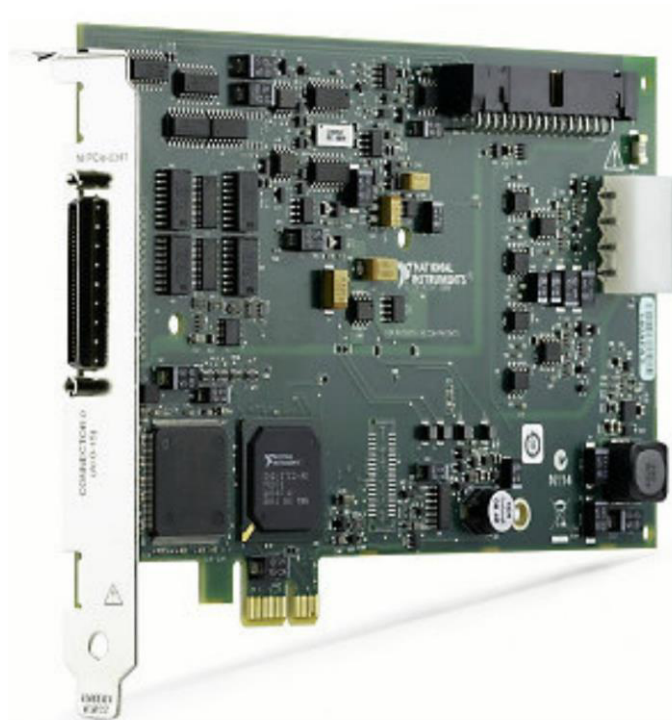


Obrázek 13 Převodník proudu s Hallovou sondou HT300M (převzato z [7])

3.4.5 16-bitová měřicí karta

Pro přímé měření veličin je použita 16-bitová měřicí karta DAQ PCie-6341 od amerického výrobce National Instruments. Její analogové vstupy slouží k měření napětí a proudu akumulátoru a její digitální vstup k vyhodnocení měření teploty pomocí senzoru SMT 160. Tato karta dále na svém analogovém výstupu generuje signál pro bezpečnostní obvod, viz kapitola 3.4.6.

⁴ Edwin Hall (1879), ve vodiči, jímž protéká elektrický proud, umístěném v magnetickém poli se uskupí elektrony ve směru tohoto magnetického pole, čímž se na daném vodiči vytvoří tzv. Hallovo napětí.



Obrázek 14 16-bitová měřicí karta DAQ PCIe-6341 (převzato z [10])

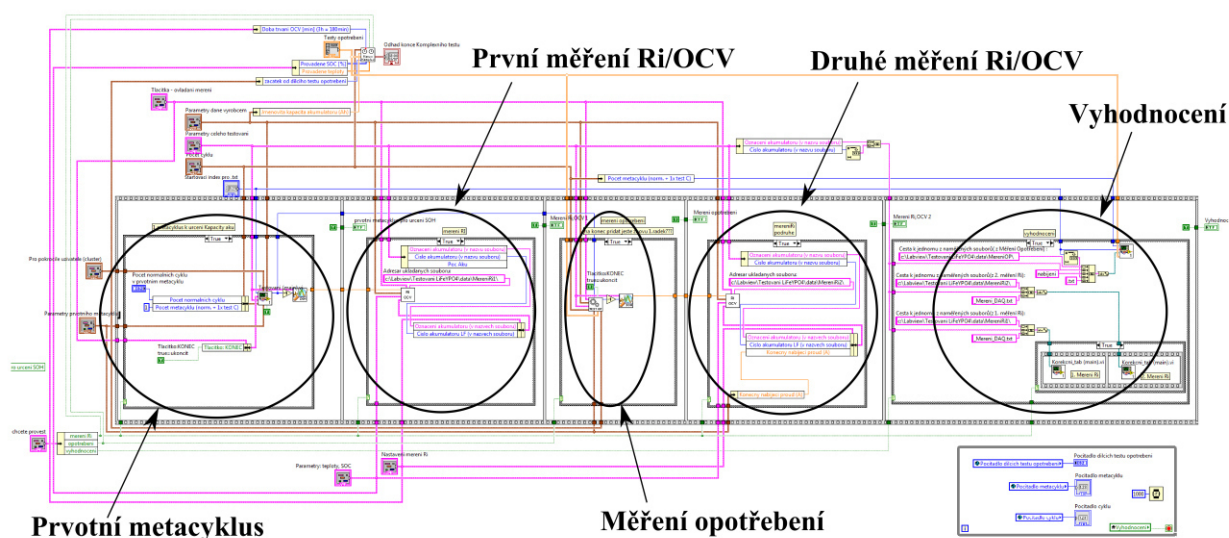
3.4.6 Bezpečnostní obvod

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

4 Implementace komplexního testu akumulátorů

4.1 Struktura Komplexního testu akumulátorů

Komplexní test se skládá ze tří základních dílčích měření, první měření vnitřního odporu, měření opotřebení, druhé měření vnitřního odporu a z vyhodnocení naměřených dat. Struktura programu je podle obrázku 15 následující: Nejprve se provede prvotní metacyklus. Poté se provede první měření Ri/OCV. Následuje test opotřebení a po něm se provede ještě jednou znovu tzv. druhé měření Ri/OCV, pro zjištění, jak se změní hodnoty vyhodnocené z prvního měření Ri/OCV na více opotřebovaném akumulátoru. U každého akumulátoru se jeho stav zdraví (SOH) teoreticky i při libovolně malém počtu nabití a vybití sníží, byť při malém počtu cyklů to nebude při dané přesnosti nijak výrazné. Po testu opotřebení se tak již z logiky komplexního testu předpokládá, že opotřebení bude výrazně, tedy rozpoznatelně vyšší než před testem opotřebení. Uživateli je samozřejmě ponechána volba, které z těchto výše zmíněných částí komplexního testu chce provádět a které nikoli. To je zejména pro případ, kdy by byl komplexní test přerušen, například při výpadku proudu a následně by bylo chtěné tento přerušovaný test dokončit bez opakování jeho již provedených částí. Na závěr se provede vyhodnocení těch částí komplexního testu, které se uskutečnily a tyto výsledky se uloží do datových souborů.



Obrázek 15 Struktura - blokový diagramu programu

4.2 Prvotní metacyklus

Prvotní metacyklus se provádí z důvodu určení aktuálního SOH, tedy skutečné kapacity testovaného akumulátoru. Jedná se o jeden metacyklus, tedy určitý počet normálních cyklů

a jeden test kapacity. Implicitně je nastaven jeden normální cyklus a jeden test kapacity. Pro uživatele je však ponechána volba počet normálních cyklů v tomto metacyklu navýšit.

Softwarově je zde použit stejný podprogram jako v případě Testu opotřebení, tedy Testování(main).vi, který je blíže popsán v autorově bakalářské práci [1].

4.3 Měření vnitřního odporu

4.3.1 Úvod

Mým cílem je v krátkém časovém intervalu několika dní získat o akumulátoru všechny potřebné informace o krátkodobém chování potřebném pro model. Jedním z klíčových parametrů je vnitřní odpor akumulátoru a o jeho změření bude pojednávat tato kapitola.

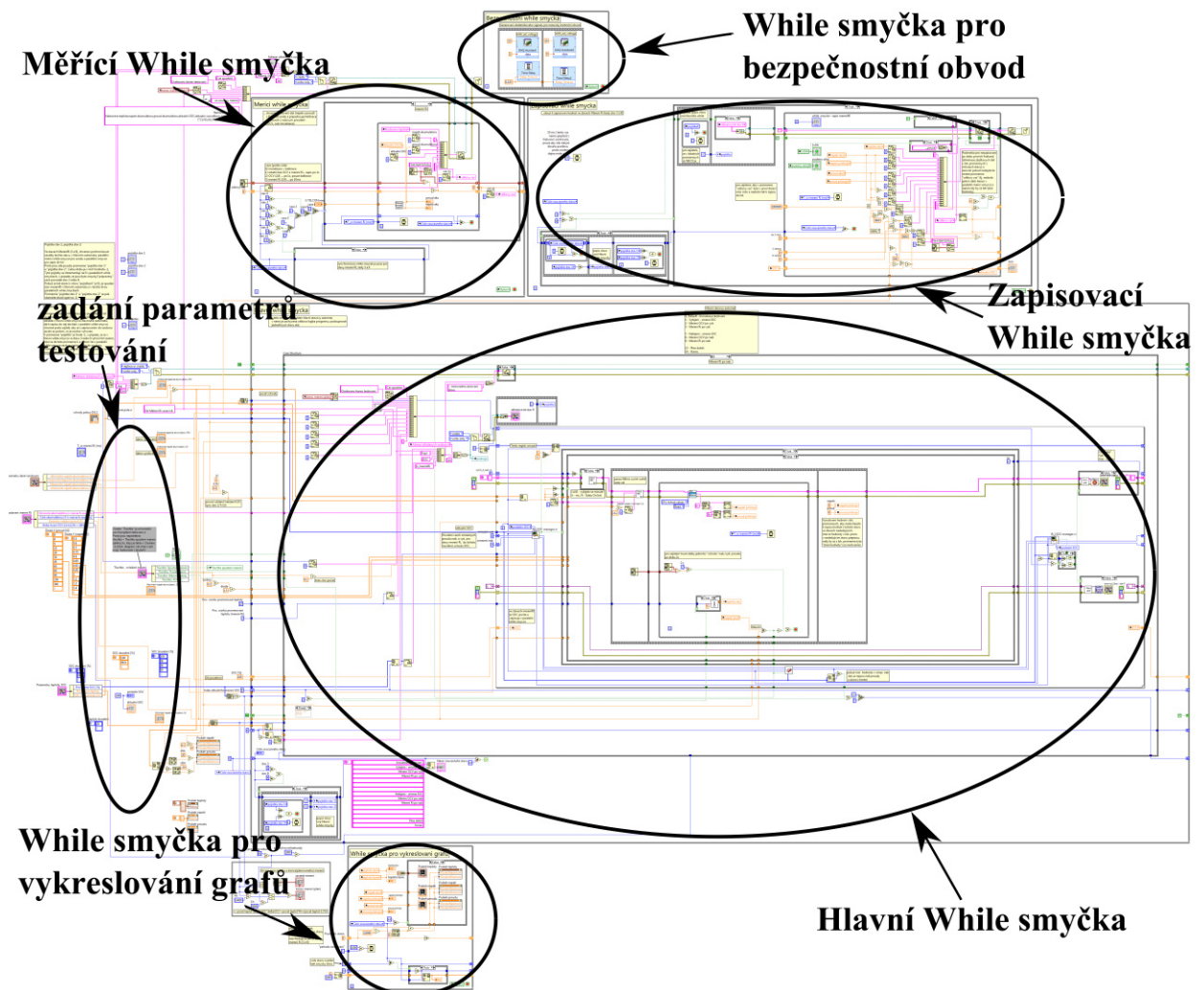
Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, v rámci komplexního testu probíhá měření vnitřního odporu dvakrát. Softwarově se ale jedná o tentýž zdrojový kód, uživatel ani nemá v nabídce možnost nastavit různé vstupní parametry pro provádění těchto dvou částí komplexního testu. Rozdíl je pouze v tom, že v obou případech dochází k ukládání naměřených dat do různých adresářů. V případě prvního měření Ri/OCV se datové soubory ukládají do adresáře C:/.../data/MereniRi1 a v případě druhého měření Ri/OCV se datové soubory ukládají do adresáře C:/.../data/MereniRi2. Z těchto důvodů nebude v dalším popisu v této kapitole rozlišováno mezi prvním a druhým měřením Ri/OCV.

4.3.2 Struktura programu

Struktura programu je tvořena pěti paralelními While smyčkami. Pomyslné jádro programu tvoří tři While smyčky, kterým byly přiděleny i vlastní názvy a to jmenovitě Hlavní While smyčka, Měřicí While smyčka a Zapisovací While smyčka. Dále jsou součástí programu While smyčky pro vykreslování grafů a pro generování signálu pro stykač. Všechny tyto While smyčky jsou v následujících kapitolách podrobně popsány.

Tuto strukturu programu s vyšším počtem paralelních While smyček si vynutil složitý proces měření vnitřního odporu a složitost testovacího pracoviště v souvislosti s požadavky na tento program. Toto uspořádání programu s sebou přináší vyšší složitost v podobě nároků na synchronizaci těchto While smyček. Synchronizace While smyček je v některých částech chodu programu velmi důležitá a nelze jí opomenout, například při přechodu mezi jednotlivými stavy nebo když dvě While smyčky pracují postupně s týmiž daty. Nedodržení potřebné synchronizace by pak mělo přímý dopad na naměřená data. Bohužel tuto skutečnost zhoršuje ještě fakt, že jednotlivé While smyčky mají vůči sobě někdy poměrně rozdílné periody průběhů, se kterými se vykonávají. U některých jsou to

řádově sekundy, u jiných to může být až o tři řády méně, tedy řádově milisekundy. Tento problém je řešen, pomocí množství pomocných lokálních proměnných, které hlídají a v příslušných okamžicích synchronizují chody příslušných While smyček.



Obrázek 16 Struktura subVI měření Ri/OCV

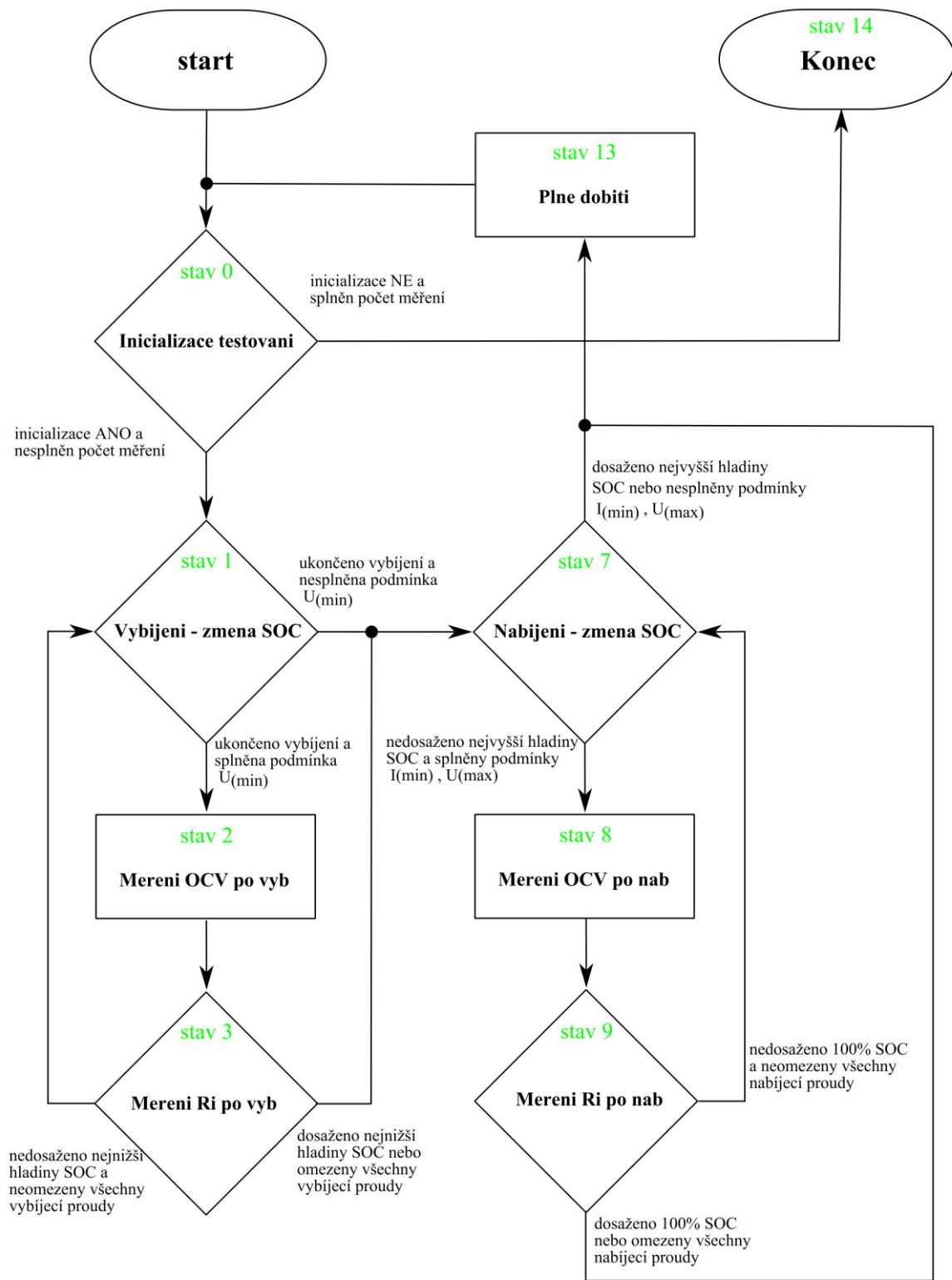
4.3.2.1 Hlavní While smyčka

Zde je umístěn stavový automat s logikou posloupnosti jednotlivých stavů. Tento stavový automat se skládá z devíti stavů. Každému stavu odpovídá jeden rámeček struktury Case umístěné uvnitř této While smyčky. Každý stav má svoje slovní a číselné označení.

- Stav 0: „Inicializace testování“,
- Stav 1: „Vybijeni - zmena SOC“,
- Stav 2: „Mereni OCV po vyb“,
- Stav 3: „Mereni Ri po vyb“,
- Stav 7: „Nabijeni - zmena SOC“,
- Stav 8: „Mereni OCV po nab“,

- Stav 9: „Mereni Ri po nab“,
- Stav 13: „Plne dobiti“,
- Stav 14: „Konec“.

Schéma tohoto stavového automatu je znázorněno vývojovým diagramem na obrázku 17. Automat je zde popsán vývojovým diagramem se značkami větvení a doplňující podmínky přechodů jsou zachyceny v přechodové tabulce, kde jsou uvedeny pouze přechody mezi stavy v tomto vývojovém diagramu. Autor i vedoucí této diplomové práce si jsou vědomi, že tento zjednodušený přístup je nestandardní a neodpovídá zavedené notaci grafů přechodů, nicméně tento přístup byl zvolen, jelikož ho považujeme pro potřeby této práce za přehlednější. Stejný přístup pro popis stavového automatu je i v kapitole 4.4. Teorii stavových automatů a například i orientaci v přechodových tabulkách může čtenář nalézt například v autorově bakalářské práci [1].



Obrázek 17 Schéma stavového automatu pro Měření vnitřního odporu

Podmínky přechodů mezi jednotlivými stavy jsou uvedeny v tabulce přechodů:

název podmínky	přechodové podmínky					
	do	Konec			Vybijeni - zmena SOC	Mereni OCV po vyb
	z	Inicializace testovani			Inicializace testovani	Vybijeni - zmena SOC
zdroj komunikuje	0				1	
zátěž komunikuje		0			1	
U = v mezích			0		1	
tlačítko spuštění měření = "zapnuto"				0	1	
počet měřených teplot = zadaná hodnota		1			0	
$T > T_{(max)}$						1
SOC = zadaná hodnota						1
$U < U_{(min)}$						0
$I_{(nabijeci)} < I_{(min)}$						
$U > U_{(max)}$						
dosažena nejnižší hladina SOC						
omezeny všechny vybíjecí proudy						
dosaženo předposlední nejvyšší hladiny SOC *						
dosaženo počáteční SOC (tj. 100%)						
omezeny všechny nabíjecí proudy						
čas OCV						

Tabulka 1 Přechodová tabulka - část 1

název podmínky	přechodové podmínky				
	do	Nabijeni - zmena SOC	Mereri Ri po vyb	Vybijeni - zmena SOC	
	z	Vybijeni - zmena SOC	Mereri OCV po vyb	Mereri Ri po vyb	
zdroj komunikuje					
zátěž komunikuje					
U = v mezích					
tlačítko spuštění měření = "zapnuto"					
počet měřených teplot = zadaná hodnota					
$T > T_{(max)}$		1			
SOC = zadaná hodnota			1		
$U < U_{(min)}$		1			
$I_{(nabijeci)} < I_{(min)}$					
$U > U_{(max)}$					
dosažena nejnižší hladina SOC				0	
omezeny všechny vybíjecí proudy				0	
dosaženo předposlední nejvyšší hladiny SOC *					
dosaženo počáteční SOC (tj. 100%)					
omezeny všechny nabíjecí proudy					
čas OCV			1		

Tabulka 2 Přechodová tabulka - část 2

název podmínky	přechodové podmínky						
	do	Nabijení - zmena SOC		Merení OCV po nab		Plne dobíti	
	z	Merení Ri po vyb		Nabijení - zmena SOC		Nabijení - zmena SOC	
zdroj komunikuje							
zátěž komunikuje							
U = v mezích							
tlačítko spuštění měření = "zapnuto"							
počet měřených teplot = zadaná hodnota							
$T > T_{(max)}$							
SOC = zadaná hodnota							
$U < U_{(min)}$							
$I_{(nabíjecí)} < I_{(min)}$				0	1		
$U > U_{(max)}$				0		1	
dosažena nejnižší hladina SOC	1						
omezeny všechny vybíjecí proudy		1					
dosaženo předposlední nejvyšší hladiny SOC *				0			1
dosaženo počáteční SOC (tj. 100%)							
omezeny všechny nabíjecí proudy							
čas OCV							

Tabulka 3 Přechodová tabulka - část 3

název podmínky	přechodové podmínky		
	do	Merení Ri po nab	Nabijení - zmena SOC
	z	Merení OCV po nab	Merení Ri po nab
zdroj komunikuje			
zátěž komunikuje			
U = v mezích			
tlačítko spuštění měření = "zapnuto"			
počet měřených teplot = zadaná hodnota			
$T > T_{(max)}$			
SOC = zadaná hodnota			
$U < U_{(min)}$			
$I_{(nabíjecí)} < I_{(min)}$			
$U > U_{(max)}$			
dosažena nejnižší hladina SOC			
omezeny všechny vybíjecí proudy			
dosaženo předposlední nejvyšší hladiny SOC *			
dosaženo počáteční SOC (tj. 100%)			0
omezeny všechny nabíjecí proudy			0
čas OCV		1	

Tabulka 4 Přechodová tabulka - část 4

název podmínky	přechodové podmínky			
	do	Plně dobítí		Inicializace testování
	z	Měření Ri po nab	Plně dobítí	
zdroj komunikuje				
zátěž komunikuje				
$U = v$ mezích				
tlačítko spuštění měření = "zapnuto"				
počet měřených teplot = zadaná hodnota				
$T > T_{(max)}$			1	
SOC = zadaná hodnota				
$U < U_{(min)}$				
$I_{(nabijeci)} < I_{(min)}$			1	
$U > U_{(max)}$				1
dosažena nejnižší hladina SOC				
omezeny všechny vybíjecí proudy				
dosaženo předposlední nejvyšší hladiny SOC *				
dosaženo počáteční SOC (tj. 100%)	1			
omezeny všechny nabíjecí proudy			1	
čas OCV				

Tabulka 5 Přechodová tabulka - část 5

Popis veličin použitých v přechodové tabulce:

$T_{(max)}$... maximální povolená teplota akumulátoru

$U_{(min)}$, $U_{(max)}$... minimální a maximální napětí akumulátoru

$I_{(min)}$... minimální nabíjecí proud akumulátoru

T , U , $I_{(nabijeci)}$... aktuální měřené hodnoty teploty, napětí, energie a nabíjecího proudu testovaného akumulátoru

* Jako první hodnota SOC se vždy volí 100 %, ačkoliv se při tomto stavu nabití měření Ri a OCV neprovádějí, protože by patrně docházelo k značnému omezování prováděných měření. Předpoklad měření je plně nabitý akumulátor.

Některé zdrojové kódy, tedy obrázky blokových diagramů programu, nebudou v této kapitole ani v přílohách z důvodu jejich rozsáhlosti uvedeny. Podobně se tak stane i v některých následujících kapitolách. Vždy je však uveden alespoň slovní popis dané části programu.

Jednotlivé stavy automatu a jím odpovídající rámce struktury Case v Hlavní While smyčce jsou zde stručně popsány:

Stav „Inicializace testovani“

Ve stavu inicializace se kontroluje, zda:

- zátěž komunikuje,
- zdroj komunikuje,
- napětí je ve stanovených mezích,
- teplota je ve stanovených mezích,
- je tlačítko „Spuštění měření“ sepnuto,
- bylo provedeno měření pro všechny zadané teploty.

Pokud jsou tyto podmínky splněny, stavový automat přechází do stavu „Vybijeni - zmena SOC“, jinak přechází do stavu „Konec“. Stav „Inicializace testovani“ je také zvolen jako výchozí stav, což znamená, že v případě kdy by se na vstupní port struktury Case dostalo jiné číslo, než číslo existujících stavů v této struktuře, pokračovalo by se právě do tohoto výchozího stavu.

Stav „Vybijeni - zmena SOC“

Hlavním účelem tohoto stavu je snížit hladinu SOC akumulátoru, vždy na následující nižší stupeň ze zadaných hladin SOC. V tomto stavu dochází k měření všech základních veličin, kterými jsou napětí, proud a teplota akumulátoru. Probíhají zde výpočty a následný zápis do datových souborů.

Z tohoto stavu vedou přechody do stavů „Mereni OCV po vyb“ a „Nabijeni - zmena SOC“. Přechod do stavu „Nabijeni - zmena SOC“ je havarijní a nastává pouze v případě, že je podkročeno minimální napětí akumulátoru. Tento stav se ukončí, pokud některá z podmínek podkročení minimálního napětí akumulátoru, překročení maximální teploty akumulátoru nebo dosaženého vybití na požadovanou hladinu SOC je splněna.

Stav „Mereni OCV po vyb“

V tomto stavu se čeká předem stanovenou dobu. Tento čas slouží k ustálení napětí akumulátoru a jeho maximální hodnota je z experimentálního měření stanovena na tři hodiny. Nutno podotknout, že k téměř úplnému ustálení napětí dochází u lithiových akumulátorů již po deseti minutách. Dále je dobré si uvědomit, že ustálení napětí není nikdy úplné ani při libovolně dlouhém čase, jelikož má akumulátor vždy nějaký vnitřní odpor a tím se samovybívá, nicméně tyto hodnoty jsou velmi malé a tak zanedbatelné.

V tomto stavu jsou programovatelný zdroj a zátěž vypnuty. Toho, že je zde proud nulový, je s výhodou využito ke kalibraci sondy. Z tohoto stavu přechází automat pouze do stavu „Mereni Ri po vyb“.

Stav „Mereni Ri po vyb“

Účelem tohoto stavu je provádět rychlé změny nabíjecích a vybíjecích proudů za sebou. Tyto změny jsou prováděny se zvolenou periodou 2 s, přičemž hodnoty proudů zadává uživatel. Při různých SOC může při stejném nabíjecím a vybíjecím proudu jindy dojít k překročení maximálních nebo podkročení minimálních napětí akumulátoru tak, že dojde k omezení daných proudů. V tomto stavu nemůže docházet k zápisu měřených dat do datových souborů a musí k němu docházet v paralelní tzv. Měřící While smyčce, která je blíže popsána v kapitole 4.3.2.2. V tomto stavu nicméně dochází k zápisu do tzv. logovacího souboru v případě, kdy se omezí všechny vybíjecí proudy a je tak třeba havarijně přejít do stavu „Nabijeni – zmena SOC“.

Z tohoto stavu je možné přejít do stavů „Vybijeni – zmena SOC“ nebo „Nabijeni – zmena SOC“. Přejít do stavu „Nabijeni – zmena SOC“ nastává pouze v případě, že jsou všechny vybíjecí proudy v rámci měření vnitřního odporu omezeny nebo již byly provedeny všechny zvolené hladiny SOC, a tudíž se musí vykonat testování přes tyto hladiny nazpět do 100 % SOC.

Stav „Nabijeni - zmena SOC“

Hlavním účelem tohoto stavu je zvýšit hladinu SOC akumulátoru, vždy na následující vyšší stupeň ze zadaných hladin SOC. V tomto stavu dochází k měření všech základních veličin, kterými jsou napětí, proud a teplota akumulátoru. Probíhají zde výpočty a následný zápis do datových souborů.

Z tohoto stavu je možné přejít do stavů „Plne dobiti“ a „Mereni OCV po nab“. Do stavu „Plne dobiti“ se přechází pouze tehdy, když bylo dosaženo nejvyšší hladiny SOC (tedy 100 %) nebo pokud bylo překročeno maximální nabíjecí napětí akumulátoru nebo při plném napětí podkročen konečný nabíjecí proud akumulátoru.

Stav „Mereni OCV po nab“

Rámec ve struktuře Case odpovídající tomuto stavu je téměř shodný s rámcem odpovídajícím stavu „Mereni OCV po vyb“, jehož popis je uveden výše. Opět se v tomto stavu čeká po dobu implicitně nastavenou na 10 minut. Uživateli není ani ponechána volba, aby tento čas trvání těchto dvou stavů nějak odlišil, nastavuje se pro oba stejně.

V tomto stavu jsou programovatelný zdroj a zátěž vypnuty. Opět zde dochází ke kalibraci sondy. Z tohoto stavu přechází automat pouze do stavu „Mereni Ri po nab“.

Stav „Merení Ri po nab“

Tento stav je téměř shodný se stavem „Merení Ri po vyb“, jehož popis je uveden výše. V tomto stavu opět dochází k zápisu dat do datových souborů mimo Hlavní While smyčku, pouze se v ní zapisuje do logovacího souboru, v případě, kdy se omezí všechny nabíjecí proudy a je tak třeba havarijně přejít do stavu „Plně dobít“.

Z tohoto stavu je možné přejít do stavů „Nabíjení – změna SOC“ nebo „Plně dobít“. Přejít do stavu „Plně dobít“ nastává pouze v případě, že jsou všechny nabíjecí proudy v rámci měření vnitřního odporu omezeny nebo již byly provedeny všechny zvolené hladiny SOC (tedy bylo již dosaženo 100 % SOC).

Stav „Plně dobít“

Tento stav slouží k plnému dobíjení akumulátoru. Tento stav se ukončí při překročení maximálního nabíjecího napětí akumulátoru, a nebo podkročení minimálního nabíjecího proudu při plném nabíjecím napětí. Probíhá zde měření i zápis do datových souborů.

Přejít z tohoto stavu je možný pouze do stavu „Inicializace testování“.

Stav „Konec“

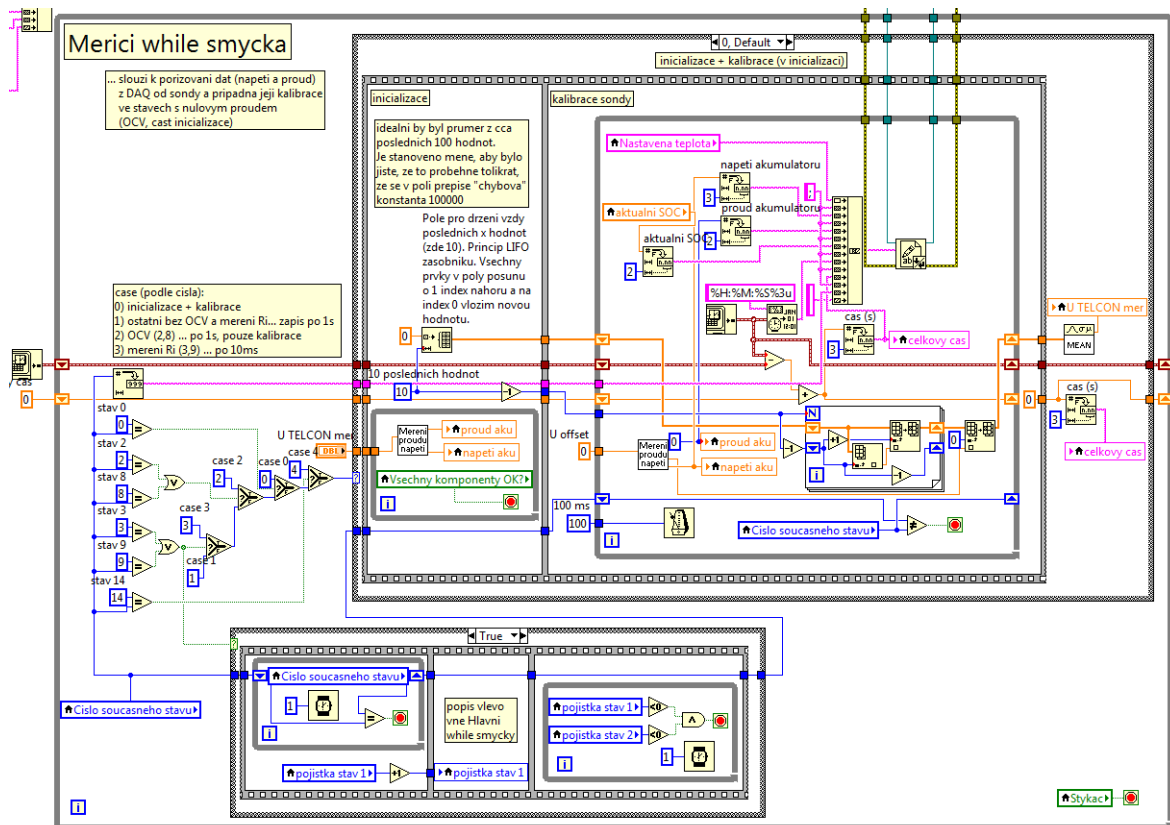
Tento stav je konečný (terminální), automat do něj přechází ze stavu „Inicializace testování“ v případě, že byla již provedena měření pro všechny zadané teploty. Tento stav již není možné opustit. Pokud je měření vnitřního odporu spuštěno v rámci komplexního testování, ve stavu „Konec“ se ukončí a přechází se na další části komplexního testu (obvykle měření opotřebení).

4.3.2.2 Měřící While smyčka

V této While smyčce se nezávisle pořizuje a zaznamenává proud, napětí a časová značka. Důvodem jejího vzniku bylo příliš pomalé vyčítání dat z přístrojů v Hlavní While smyčce (v případě zdroje až okolo 150 ms). Vykonávání Měřící While smyčky je synchronizováno se stavovým automatem v Hlavní While smyčce. Dále se zde data zapisují do lokálních proměnných a používají i v ostatních částech programu (pouze While smyčka pro bezpečnostní obvod s těmito daty nepracuje). Periody pro pořizování dat, respektive jejich zápisu do lokálních proměnných v této smyčce jsou stanovena takto:

- Stav 0, 1, 2, 7, 8, 13: 100 ms, zadána konstantou
- Stav 3 a 9: obvykle 10 ms, zadávána uživatelem
- Stav 14: 1 s, zadána konstantou

Ve stavu „Konec“ již není potřeba pořizovat a zapisovat data tak často, jelikož je měření již ukončeno a docházelo by pouze ke zbytečnému zvyšování velikosti datového souboru.

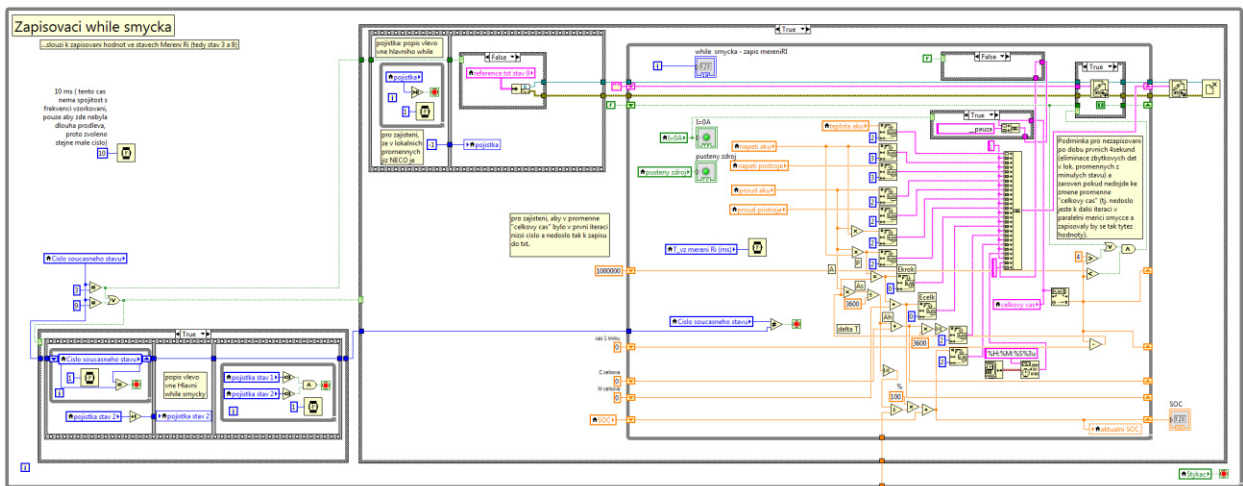


Obrázek 18 Měřící While smyčka

4.3.2.3 Zapisovací While smyčka

V této While smyčce probíhá zápis do datových souborů ve stavech „Mereni Ri po vyb“ a „Mereni Ri po nab“. Zapisování dat z ostatních stavů, tedy „ Vybijeni - zmena SOC“, „Mereni OCV po vyb“, „Nabijeni - zmena SOC“, „Mereni OCV po nab“ a „Plne dobiti“ probíhá v odpovídajících rámcích struktury Case v Hlavní While smyčce. V těchto stavech se pak v této Zapisovací While smyčce žádná data nezapisují.

Poměrně neobvyklým jevem zde je zápis dat do datových souborů, které byly založeny v jiné paralelní While smyčce. Tyto datové soubory vznikají v rámcích struktury Case ve stavu „Mereni Ri po vyb“ nebo „Mereni Ri po nab“ v Hlavní While smyčce. Důvodem je skutečnost, že generování názvů a ostatních náležitostí datových souboru probíhá ve stavovém automatu v Hlavní While smyčce. Z tohoto důvodu je nutná synchronizace s Hlavní While smyčkou tak, aby se nezačalo zapisovat do datového souboru dříve, než se tento soubor vytvoří. K tomuto účelu slouží pomocné lokální proměnné.



Obrázek 19 Zapisovací While smyčka

4.3.2.4 While smyčka pro tvorbu grafů

Tato While smyčka slouží k vykreslování měřených dat přímo na čelním panelu programu pomocí funkce Waveform chart. Umožňuje tak uživateli sledovat průběh měření v reálném čase.

Pro přenos dat z ostatních částí programu do této While smyčky jsou využity výhradně lokální proměnné. Perioda průběhu této smyčky je stanovena napevno na 1 s. Chod této smyčky není synchronizován s ostatními While smyčkami, nicméně to ani není potřeba, jelikož nepřesnost mezi časem změření dat a jejich vykresleními na čelní panel je dána pouze rozdílem periody pořizování dat a periody jejich vykreslování. Takže toto zpoždění oproti reálnému času naměření dat bude vždy maximálně do velikosti periody průběhu této While smyčky, tedy do 1 s. Tato přesnost je v rámci měření dostatečná.

4.3.2.5 While smyčka pro bezpečnostní obvod

Tato While smyčka se kromě měření vnitřního odporu nachází ve stejné formě i v ostatních částech komplexního testu, kde se používají přístroje. Tedy ještě v prvotním metacyklu a testu opotřebení. Její účel je však všude stejný, takže bude popsána pouze zde.

Účelem této While smyčky je generovat obdélkový signál o frekvenci 20 Hz a amplitudě 5 V pro analogový výstup karty DAQ. Vztah tohoto generovaného signálu a bezpečnostního obvodu je popsán v kapitole 3.4.6.

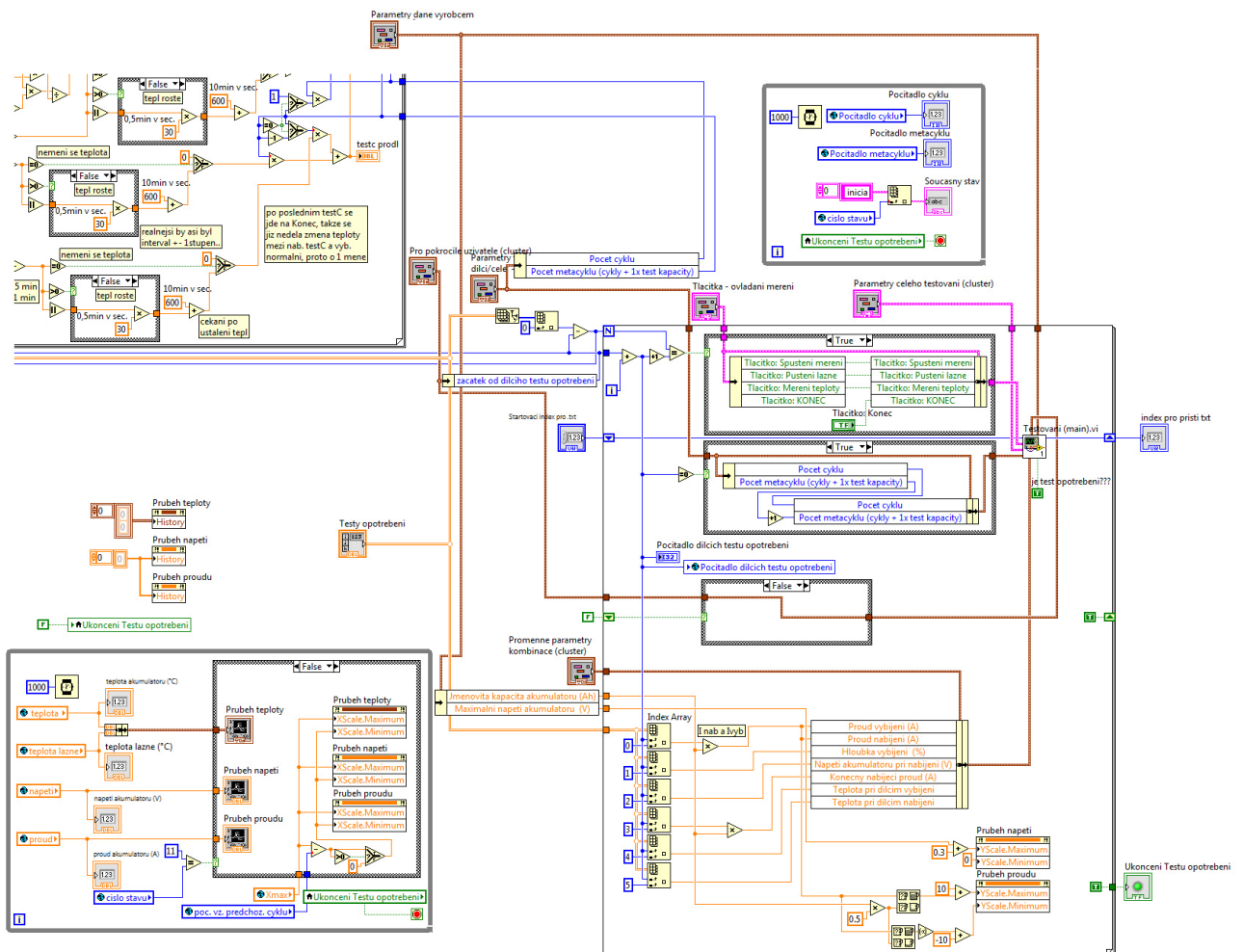
4.4 Měření opotřebení

Měření opotřebení se provádí za účelem zjištění snižování životnosti (SOH) akumulátoru v závislosti na prováděných parametrech testování, kterými jsou nabíjecí a vybíjecí proud, hloubka vybíjení (DOD), konečné napětí, konečný nabíjecí proud a teploty

při nabíjení a vybíjení. Změnu SOH zjistíme tak, že porovnáme dva následující testy kapacity. Test opotřebení se tedy vždy skládá minimálně z posloupnosti dvou metacyklů. Jeden metacyklus je vždy posloupnost určitého počtu normálních cyklů a jednoho testu kapacity.

V rámci měření opotřebení se provádí obvykle více testů opotřebení, kdy každý dílčí test opotřebení se provádí při různých parametrech. Testy opotřebení se s výjimkou prvního z nich skládají vždy ze stejného počtu metacyklů. První test opotřebení má o jeden metacyklus navíc, z důvodu jednoho testu C navíc pro určení počáteční kapacity akumulátoru k určování prvního opotřebení.

Z hlediska struktury programu se Test opotřebení skládá ze tří paralelně běžících smyček. Z For smyčky pro určení času konce testu opotřebení, While smyčky pro vykreslování grafů a For smyčky, v níž probíhají jednotlivé testy opotřebení.

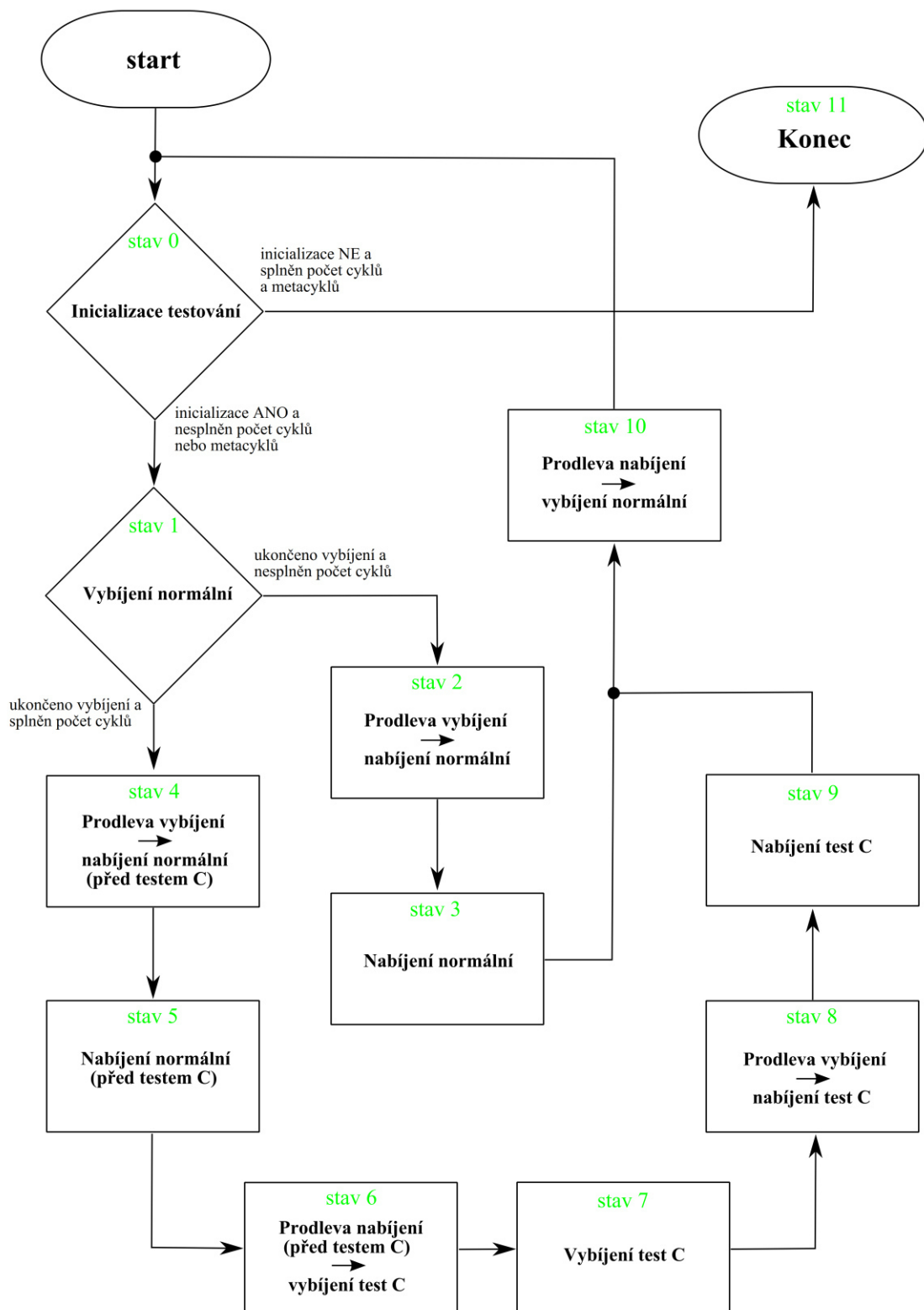


Obrázek 20 Blokový diagram měření opotřebení

4.4.1 For smyčka testu opotřebení

Zde probíhají jednotlivé testy opotřebení, mění se zde parametry testů opotřebení, které jsou pak pro jeden celý test opotřebení stejné. Jeden průběh této smyčky odpovídá jednomu testu opotřebení. Parametry jsou zadány tabulkou vně této smyčky. Tato For smyčka probíhá tolikrát, kolik je zadaných testů opotřebení.

Tato For smyčka se nachází uvnitř programu ve vývojovém prostředí LabVIEW (VI) Test_opotrebeni(main).vi. Uvnitř této smyčky se nachází podprogram v LabVIEW (subVI) Testovani(main).vi, který vykonává jednotlivé dílčí testy opotřebení podle parametrů zadaných ve VI Test_opotrebeni(main).vi. SubVI Testovani(main).vi tak tvoří jádro celého měření opotřebení a jeho podrobnější popis lze nalézt v autorově bakalářské práci, viz [1]. Proběhly na něm však od publikace této bakalářské práce již určité změny. Nejzásadnějšími změnami jsou jeho multifunkčnost pro testování buď akumulátorů, nebo superkapacitorů. Dále pak možnost testovat více sériově zapojených akumulátorů nebo superkapacitorů současně. Struktura jednoho testu opotřebení je definována stavovým automatem, který je umístěn v tomto subVI. Schéma tohoto stavového automatu je znázorněno vývojovým diagramem na obrázku 21.



Obrázek 21 Schéma stavového automatu pro jeden test opotřebení

Podmínky přechodů mezi jednotlivými stavy jsou uvedeny v tabulce přechodů:

název podmínky	přechodové podmínky						
	do	Konec			Vybití normální		Prodleva vybití → nabíjení normální
	z	Inicializace testování			Inicializace testování		Vybití normální
zdroj komunikuje	0				1		
zátěž komunikuje		0			1		
U = v mezích			0		1		
tlačítko spuštění měření = zapnuto				0	1		
počet cyklů = zadaná hodnota		1			0		0
počet metacyklů = zadaná hodnota		1				0	
$T > T_{(max)}$							1
$U < U_{(min)}$							1
$Q > Q_{(max)}$							1
$I_{(nabíjecí)} < I_{(min)}$							
$U > U_{(max)}$							
t = 10 min.							
t = 1 min.							
t = 10 s							

Tabulka 6 Přechodová tabulka - část 1

název podmínky	přechodové podmínky						
	do	nabíjení normální (před testem C)			Nabíjení normální		Nabíjení normální (před testem C)
	z	Vybití normální			Prodleva vybití → nabíjení normální		nabíjení normální (před testem C)
zdroj komunikuje							
zátěž komunikuje							
U = v mezích							
tlačítko spuštění měření = zapnuto							
počet cyklů = zadaná hodnota		1					
počet metacyklů = zadaná hodnota							
$T > T_{(max)}$		1					
$U < U_{(min)}$			1				
$Q > Q_{(max)}$				1			
$I_{(nabíjecí)} < I_{(min)}$							
$U > U_{(max)}$							
t = 10 min.							1
t = 1 min.							
t = 10 s					1		

Tabulka 7 Přechodová tabulka - část 2

název podmínky	přechodové podmínky						
	do	Prodleva nabíjení → vybíjení normální			Prodleva nabíjení (před testem C) → vybíjení test C		Inicializace testování
	z	Nabíjení normální			Nabíjení normální (před testem C)		Prodleva nabíjení → vybíjení normální
zdroj komunikuje							
zátěž komunikuje							
U = v mezích							
tlačítko spuštění měření = zapnuto							
počet cyklů = zadaná hodnota							
počet metacyklů = zadaná hodnota							
$T > T_{(max)}$	1			1			
$U < U_{(min)}$							
$Q > Q_{(max)}$							
$I_{(nabíjecí)} < I_{(min)}$		1			1		
$U > U_{(max)}$			1			1	
t = 10 min.							
t = 1 min.							
t = 10 s							1

Tabulka 8 Přechodová tabulka - část 3

název podmínky	přechodové podmínky					
	do	Vybíjení test C			Prodleva vybíjení → nabíjení test C	
	z	Prodleva nabíjení (před testem C) → vybíjení test C			Vybíjení test C	
zdroj komunikuje						
zátěž komunikuje						
U = v mezích						
tlačítko spuštění měření = zapnuto						
počet cyklů = zadaná hodnota						
počet metacyklů = zadaná hodnota						
$T > T_{(max)}$				1		
$U < U_{(min)}$					1	
$Q > Q_{(max)}$						1
$I_{(nabíjecí)} < I_{(min)}$						
$U > U_{(max)}$						
t = 10 min.			1			
t = 1 min.						
t = 10 s						

Tabulka 9 Přechodová tabulka - část 4

název podmínky	přechodové podmínky			
	do	Nabíjení test C	Prodleva nabíjení → vybíjení normální	
	z	Prodleva vybíjení → nabíjení test C	Nabíjení test C	
zdroj komunikuje				
zátěž komunikuje				
U = v mezích				
tlačítko spuštění měření = zapnuto				
počet cyklů = zadaná hodnota				
počet metacyklů = zadaná hodnota				
$T > T_{(max)}$			1	
$U < U_{(min)}$				
$Q > Q_{(max)}$				
$I_{(nabíjecí)} < I_{(min)}$				1
$U > U_{(max)}$				1
t = 10 min.				
t = 1 min.		1		
t = 10 s				

Tabulka 10 Přechodová tabulka - část 5

Popis veličin použitých v přechodové tabulce:

$T_{(max)}$... maximální povolená teplota akumulátoru

$U_{(min)}$, $U_{(max)}$... minimální a maximální napětí akumulátoru

$I_{(min)}$... minimální nabíjecí proud akumulátoru

$Q_{(max)}$... náboj odpovídající zadané hloubce vybíjení akumulátoru

T, U, Q, $I_{(nabíjecí)}$... aktuální měřené hodnoty teploty, napětí, přeneseného náboje a nabíjecího proudu testovaného akumulátoru

4.4.2 For smyčka pro určení času konce testu opotřebení

V této smyčce se čas ukončení počítá jako součet několika časů, který je přičten k aktuálnímu času na začátku měření, tyto časy jsou:

- čas normálních cyklů bez prodlev,
- čas testů C bez prodlev,
- čas potřebný pro změnu teploty mezi vybíjením a nabíjením u normálních cyklů,
- čas potřebný pro změnu teploty mezi normálními cykly a testy C,
- součet všech časů nabíjení v režimu CV pro všechny testy C a

- součet všech časů nabíjení v režimu CV pro všechny normální cykly.

Každý akumulátor se vždy nejprve nabíjí v režimu konstantního proudu (CC). Od okamžiku dosažení maximálního napětí akumulátoru a nemožnosti toto napětí dál zvyšovat, dochází k nabíjení akumulátoru v režimu konstantního napětí (CV), kdy dochází ke snižování nabíjecího proudu. S nižším nabíjecím proudem dochází k menšímu nabíjení akumulátoru a tím teoreticky k prodlužování času ukončení nabíjení. Čas nabíjení v režimu CV je tedy čas, o který je nabíjení teoreticky delší oproti nabíjení, kdy by nedocházelo ke snižování nabíjecího proudu.

Čas normálních cyklů bez prodlev se určí podle vztahu:

$$t_1 = \frac{n_n \cdot \frac{DOD}{100 \cdot C_n} \cdot 2}{I_{vyb}}, \text{ kde} \quad (1)$$

t_1 ... čas normálních cyklů bez prodlev [s],

n_n ... počet všech normálních cyklů v daném testu opotřebení [-],

DOD ... hloubka vybití stanovená pro tyto normální cykly [%],

C_n ... změna kapacity normálního cyklu v daném testu opotřebení [As],

I_{vyb} ... vybíjecí proud akumulátoru pro normální cyklus⁵ [A].

Čas testů C bez prodlev se určí podle vztahu:

$$t_2 = \frac{n_{testC} \cdot \frac{DOD}{100 \cdot C_{testC}} \cdot 2}{I_{vyb}}, \text{ kde} \quad (2)$$

t_2 ... čas testů C bez prodlev [s],

n_{testC} ... počet všech testů C v daném testu opotřebení [-],

DOD ... hloubka vybití akumulátoru při testu C⁶ [%],

C_{testC} ... změna kapacity testu C v daném testu opotřebení [As],

I_{vyb} ... vybíjecí proud akumulátoru pro test C⁷ [A].

⁵ V rámci jednoho testu opotřebení jsou nabíjecí a vybíjecí proudy vždy stejné, proto může být vztah (1) zjednodušen do tvaru, kdy se ve jmenovateli použije hodnota vybíjecího proudu, která je shodná s hodnotou nabíjecího proudu a vztah je pak pro zohlednění délky vybíjení i nabíjení normálního cyklu vynásoben dvěma.

⁶ Hloubka vybití je při testu C vždy 100 %.

Čas potřebný pro změnu teploty mezi vybíjením a nabíjením u normálních cyklů se určí podle vztahu:

$$t_3 = \left(\frac{\Delta T}{v_{teploty}} + t_{ustaleni} \right) \cdot n_n, \text{ kde} \quad (3)$$

t_3 ... čas pro změnu teploty mezi vybíjením a nabíjením u normálních cyklů [s],

ΔT ... rozdíl teploty mezi vybíjením a nabíjením normálního cyklu [°C],

$v_{teploty}$... rychlost změny teploty⁸ [°C/s],

$t_{ustaleni}$... čas pro ustálení teploty akumulátoru⁹ [s],

n_n ... počet normálních cyklů [-].

Rychlost změny teploty je dána vlastnostmi oběhového termostatu. Změny teplot mohou probíhat v rámci normálního cyklu a při přechodu mezi normálními cykly a testy C. V rámci testu C se teplota nemění, jelikož zde je pro vybíjení i nabíjení stanovena teplota shodně 20°C.

Čas potřebný pro změnu teploty mezi normálními cykly a testy C se určí podle vztahu:

$$t_4 = \left(\frac{\Delta T}{v_{teploty}} + t_{ustaleni} \right) \cdot n_{testC}, \text{ kde} \quad (4)$$

t_4 ... čas pro změnu teploty mezi normálními cykly a testy C [s],

ΔT ... rozdíl teploty mezi normálními cykly a s nimi sousedícími testy C [°C],

$v_{teploty}$... rychlost změny teploty [°C/s],

$t_{ustaleni}$... čas pro ustálení teploty akumulátoru [s],

n_{testC} ... počet testů C [-].

Součet všech časů nabíjení v režimu CV způsobuje v určování celkového času konce měření nejvyšší nepřesnosti, jelikož se o tento čas jakoby zvyšuje délka nabíjení a jeho hodnoty se mohou pro různé akumulátory a různé stavy SOH akumulátoru lišit. Dalo by se říci, že se téměř jedná o vlastnost každého jednoho akumulátoru. Z tohoto důvodu není určování tohoto času v rámci programu triviální a nelze také nějakým způsobem

⁷ Vybíjecí proud akumulátoru při testu C je vždy 0,5 xC. C udává násobek ampér hodinové kapacity akumulátoru. Například pro 90 Ah akumulátor je 0,5 C rovno 45 A.

⁸ rychlostí změny teploty je přibližně 1 °C za minutu při klesání teploty a 2 °C za minutu při růstu teploty

⁹ čas pro ustálení teploty akumulátoru je stanoven v rámci celého programu konstantně 10 minut

automatizovat či zobecnit. Tento čas se tak vždy pro jedno nabíjení určuje z předem experimentálně odhadnuté konstanty, která vždy pro daný konečný nabíjecí proud nabízí délku odpovídajícího času nabíjení v režimu CV.

Z této For smyčky je pak také odvozeno subVI pro určení času konce celého komplexního testu.

4.4.3 While smyčka pro vykreslování grafů

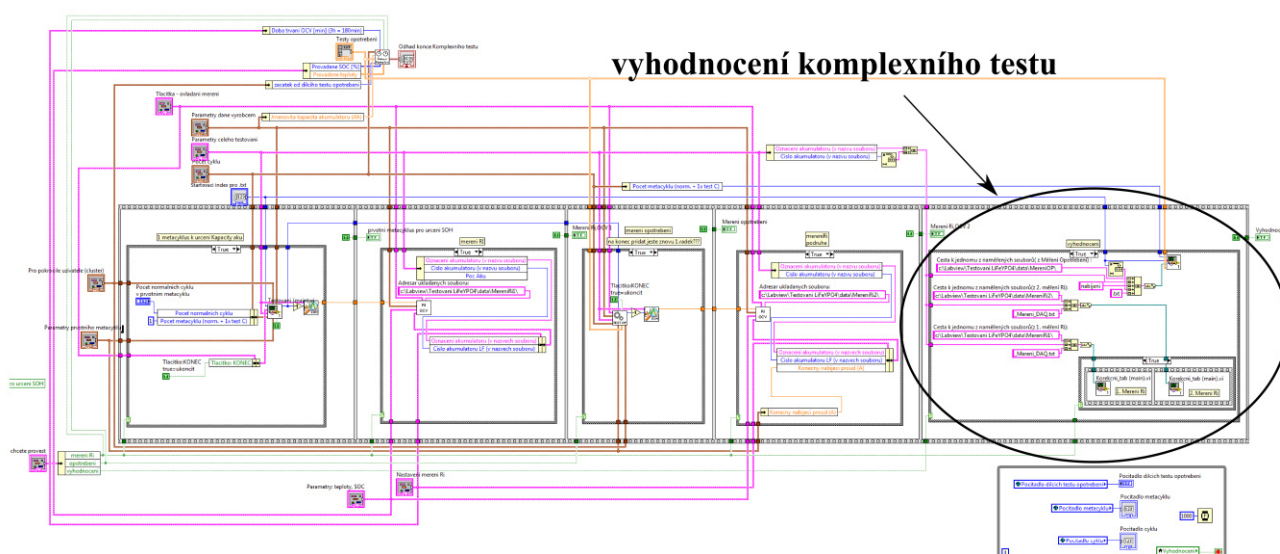
Přestože má tato smyčka stejný název jako obdobná smyčka v měření R_i , nejedná se o tentýž zdrojový kód, nicméně princip je velmi podobný. Měřená data pro grafy včetně rozsahů os a ostatních pomocných proměnných se čtou pomocí lokálních proměnných ze subVI Testovani(main).vi. Jedná se vlastně o vykreslování těch samých grafů jako uvnitř subVI Testování(main), pouze jsou přeneseny do VI Test_opotrebeni(main).vi, aby bylo možné je zobrazit na čelním panelu Testu opotřebení.

4.5 Vyhodnocení komplexního testu

Vyhodnocení je v rámci komplexního testu jeho poslední částí, a je svázáno s jeho předchozími částmi tak, aby se vyhodnocovalo pouze to, co v daném komplexním testu skutečně proběhlo.

Vyhodnocení se skládá ze tří částí:

- Vyhodnocení prvního měření R_i /OCV
- Vyhodnocení měření opotřebení
- Vyhodnocení druhého měření R_i /OCV



Obrázek 22 Umístění vyhodnocení v blokovém diagramu komplexního testu

4.5.1 Vyhodnocení prvního měření Ri/OCV

Výsledkem vyhodnocení měření Ri/OCV je tabulka parametrů modelu akumulátoru, jejíž vzhled je znázorněn na obrázku 23. Tato tabulka obsahuje všechny parametry, které odpovídají modelu se dvěma časovými konstantami viz kapitola 2.2.3. Tyto parametry v modelu jsou uvedeny v následující tabulce:

Parametry modelu	Název parametru v programu	popis
U_{C1}	UC10	Napětí na rezistoru R_1
R_1	R1	Odpor rezistoru R_1
C_1	C1	Kapacita na kondenzátoru C_1
U_{C2}	UC20	Napětí na rezistoru R_2
R_2	R2	Odpor rezistoru R_2
C_2	C2	Kapacita na kondenzátoru C_2
OCV	OCV	Napětí zdroje naprázdno
R_0	R0	Odpor rezistoru R_0 , tedy vnitřní odpor akumulátoru

Tabulka 11 Parametry

Parametry se vyhodnocují pro všechny teploty, pro všechny zadané SOC a pro vybíjení a nabíjení zvlášť. V případě, že jsou některé prováděné SOC omezeny, neexistují pak potřebná data pro jejich vyhodnocení a v tabulce parametrů modelu akumulátoru jsou potom uvedeny hodnoty NaN (not a number). Výsledky vyhodnocení se ukládají do stejného adresáře na měřicím počítači, do kterého se ukládají i naměřená data, tedy do datových souborů v adresáři C:/.../data/MereniRi1.

Obrázek 23 Tabulka parametrů modelu akumulátoru

4.5.1.1 Parametr R_0

Parametr R_0 lze určit v časech, kde dochází k přechodu mezi stavy, kdy akumulátorem teče proud a stavem, kdy akumulátorem neteče proud žádný. Dojde zde k vypnutí před tím

zapnutých přístrojů a tím dojde k okamžité změně napětí. Typicky jsou to přechody mezi stavy „Vybijení - zmena SOC“ a „Měření OCV po vyb“ nebo stavy „Nabíjení - zmena SOC“ a „Měření OCV po nab“. Tento přechod trvá přibližně dvě vzorkovací periody, tedy $2 \cdot 10 \text{ ms} = 20 \text{ ms}$. Informace o daných proudech a napětích při těchto přechodech se získávají ze speciálního datového souboru Daq_mereni.txt, do kterého se po celou dobu měření zaznamenávají hodnoty pořízené DAQ kartou. Princip výpočtu je založen na tom, že v okamžiku vypnutí přístrojů se napětí v obvodu sníží téměř skokově (asi za 20 ms) o rozdíl napětí na R_0 . Napětí U_0 na rezistoru R_0 lze určit jako rozdíl napětí měřeného těsně před vypnutím přístroje (zdroje nebo zátěže) a napětí měřeného těsně po vypnutí přístroje.

Z Ohmova zákona lze pak určit odpor R_0 , jako:

$$R_0 = \frac{U_0}{I_1}, \text{ kde} \quad (5)$$

R_0 ... odpor na rezistoru R_0 [Ω],

U_0 ... napětí na rezistoru R_0 [V],

I_1 ... proud před vypnutím přístrojů [A].

4.5.1.2 Ostatní parametry

Parametry U_{C1} , R_1 , C_1 , U_{C2} , R_2 , C_2 a OCV se určují pomocí použití fitness funkce, a to z dat ze souborů dílčích měření OCV. Fitness funkce je má sedm vstupních parametrů U_{C10} , R_1 , C_1 , U_{C20} , R_2 , C_2 a OCV. Výchozí hodnoty těchto parametrů jsou zvoleny tak, aby došlo ke správnému přizpůsobení (fitování) této funkce na naměřená data. Při správném přizpůsobení této funkce jsou její výstupní parametry U_{C1} , R_1 , C_1 , U_{C2} , R_2 , C_2 a OCV v předem stanovených mezích. Tyto parametry jsou poté použity jako parametry pro model U_{C1} , R_1 , C_1 , U_{C2} , R_2 , C_2 a OCV, viz tabulka 11.

4.5.2 Vyhodnocení měření opotřebení

Výsledkem vyhodnocení Měření opotřebení je tabulka, v které každý řádek odpovídá jednomu testu opotřebení.

V prvních šesti sloupcích této tabulky jsou uvedeny parametry, s nimiž daný test opotřebení probíhal. Jsou jimi vybíjecí a nabíjecí proud (I_{nab} a $I_{\text{vyb}}[x\text{C}]$), hloubka vybíjení ($\text{DOD}[\%]$), napětí při nabíjení ($U_{\text{nab}}[\text{V}]$), konečný nabíjecí proud ($I_{\text{end}}[x\text{C}]$), teplota při vybíjení ($t_{\text{vyb}}[^\circ\text{C}]$) a teplota při nabíjení ($t_{\text{nab}}[^\circ\text{C}]$).

V dalších sloupcích jsou potom uvedeny hodnoty opotřebení akumulátoru po každém jednom metacyklu zvlášť. Opotřebení se určí podle vztahu:

$$OP = \frac{\Delta C}{Q_{celk}}, \text{ kde} \quad (6)$$

OP ... opotřebení akumulátoru v rámci jednoho metacyklu [-],

ΔC ... úbytek kapacity¹⁰ ve dvou po sobě následujících metacyklech [Ah],

Q_{celk} ... celkový vybitý náboj během normálních cyklů mezi těmito dvěma testy C [Ah]¹¹.

V dalším sloupci tabulky opotřebení jsou pak hodnoty celkového opotřebení pro jednotlivé testy opotřebení. Tyto hodnoty se určí podle vztahu:

$$OP_{celk} = \frac{\Delta C}{Q_{celk}}, \text{ kde} \quad (7)$$

OP_{celk} ... opotřebení akumulátoru v rámci jednoho testu opotřebení [-],

ΔC ... úbytek kapacity mezi posledními testy C z dvou po sobě následujících testů opotřebení [Ah],

Q_{celk} ... celkový vybitý náboj během normálních cyklů mezi těmito dvěma testy C [Ah].

V předposledním sloupci tabulky opotřebení jsou hodnoty ceny opotřebení při provozu za podmínek daných v odpovídajícím testu opotřebení. Ta se určí podle vztahu:

$$cenaOP = \frac{\Delta SOH \cdot \frac{Cena_{aku}}{\Delta SOH_{celk}}}{\Delta W_{celk}}, \text{ kde} \quad (8)$$

$cenaOP$... cena opotřebení akumulátoru při provozu za podmínek daných v odpovídajícím testu opotřebení [Kč/kWh],

ΔSOH ... změna (úbytek) života akumulátoru v jednom testu opotřebení [%],

$Cena_{aku}$... pořizovací cena akumulátoru [Kč],

ΔSOH_{celk} ... předpokládaná změna života akumulátoru během celého použitelného života akumulátoru [%],

ΔW_{celk} ... celková vybitá energie při jednom testu opotřebení [kWh].

Celkovou vybitou energii při jednom testu opotřebení ve vztahu (7) lze přibližně určit jako:

¹⁰ Úbytek kapacity se určí jako rozdíl dvou posledních kapacit akumulátoru při vybití v testech C.

¹¹ Přenesený náboj v rámci tohoto programu se vždy okamžitě převádí na Ah, a všude se s ním pak v této formě počítá.

$$\Delta W_{celk} = \Delta Q_{IMC} \cdot U_n, \text{ kde} \quad (9)$$

ΔQ_{IMC} ... celková změna náboje v jednom testu opotřebení¹² [C],

U_n ... jmenovité napětí akumulátoru [V].

V posledním sloupci tabulky opotřebení je počet cyklů za život akumulátoru při provozu za podmínek daných v odpovídajícím testu opotřebení. Ty se určí podle vztahu:

$$N_{zivot} = \frac{\Delta SOH_{celk}}{\Delta SOH} \cdot N_{testOP}, \text{ kde} \quad (10)$$

N_{zivot} ... počet cyklů při provozu za podmínek daných v testu opotřebení [-],

ΔSOH ... změna (úbytek) života akumulátoru v jednom testu opotřebení [%],

ΔSOH_{celk} ... předpokládaná změna života akumulátoru během celého použitelného života akumulátoru [%],

N_{testOP} ... počet normálních cyklů v jednom testu opotřebení [-].

Hodnoty opotřebení se využijí v modelu opotřebení akumulátoru, jenž je součástí. Výsledky vyhodnocení se ukládají do stejného adresáře na měřicím počítači, do kterého se ukládají i naměřená data, tedy například do datových souborů v adresáři například C:/.../data/LF1vyhodnoceni opotrebeni.txt.

4.5.3 Vyhodnocení druhého měření Ri/OCV

Vyhodnocení druhého měření Ri/OCV je shodné s vyhodnocením prvního měření Ri/OCV, pouze probíhá na jiných datech. Vyhodnocení prvního měření Ri/OCV je uvedeno v kapitole 4.5.1. Výsledky vyhodnocení se ukládají do stejného adresáře na měřicím počítači, do kterého se ukládají i naměřená data, tedy do datových souborů v adresáři C:/.../data/MereniRi2.

4.6 Parametry testování

Parametry testování ovlivňují průběh a povahu celého komplexního testu. Většinu z nich může uživatel buď změnit přímo v příslušných čelních panelech dílčích částí komplexního testu, nebo pokud je to umožněno, i na hlavním čelním panelu celého komplexního testu. Parametry, které nejsou vyvedeny jako ovladač na některý čelní panel

¹² V rámci výpočtu je určena jako celková změna kapacity akumulátoru při jednom testu opotřebení [Ah], tedy součet všech změn kapacit všech normálních cyklů v tomto testu opotřebení.

v rámci komplexního testu a jsou zadány konstantami, se nedoporučuje příliš měnit, jelikož se převážně jedná o hodnoty, které se ustálily během ověřování vyvinutého softwaru a lze je tak do jisté míry považovat za optimální.

Nejdůležitější parametry testování jsou:

- konečný nabíjecí proud [A],
- hloubka vybíjení (DOD) [%],
- proud nabíjení [A],
- proud vybíjení [A],
- napětí nabíjení [V],
- napětí vybíjení [V],
- teplota při nabíjení [°C],
- teplota při vybíjení [°C],
- prodlevy [s] a
- vzorkovací periody [s].

Podrobný popis těchto parametrů se nachází v tabulkách v příloze 2.

5 Provedené experimenty komplexních testů

Smyslem komplexního testu popsaného v této práci je provedení určitých měření a z nich určení parametrů daného akumulátoru po celou dobu jeho životnosti. Není vhodné testovat akumulátor několika tisíci cykly po dobu několika měsíců až do úplného vyčerpání jeho SOH, jelikož by technologie daného akumulátoru do té doby mohla zastarat, nebo by nebylo ekonomické blokovat tímto akumulátorem testovací pracoviště po tak dlouhou dobu. K řešení těchto problémů by měl dopomoci právě komplexní test popsaný blíže v kapitole 4. V následujících podkapitolách jsou pak uvedena vyhodnocení dvou komplexních testů.

5.1 Forma výstupu komplexního testu

5.1.1 Vyhodnocení komplexního testu

Vyhodnocení komplexního testu je dokument, ve kterém jsou uvedeny záznamy z průběhu měření daného akumulátoru, tedy informace o čase a místě měření, kontakt na odpovědnou osobu za měření a další převážně technické parametry akumulátoru. Dále jsou zde uvedeny parametry pro náhradní elektrický obvod a model akumulátoru vyhodnocené na základě komplexního testu. Výsledky jsou uvedeny pro každou teplotu a pro nabíjení a vybíjení zvlášť. Dále jsou zde uvedeny tabulky s hodnotami opotřebení pro uskutečněné testy opotřebení. Poslední částí je stručné seznámení s náhradním elektrickým obvodem pro model akumulátoru a jím souvisejícími parametry. Vyhodnocení prvního zkušebního komplexního testu pro akumulátor LiFeYPO_4 a vyhodnocení druhého zkušebního komplexního testu pro akumulátor LTO je uvedeno v příloze 1.

Výsledná forma komplexního testu je patrná z provedených vyhodnocení.

5.1.2 Datové soubory

Forma výstupu datových souborů pro Test opotřebení je blíže popsána v kapitole 4.5.2. Forma výstupu datových souborů pro Měření vnitřního odporu je blíže popsána v kapitole 4.5.1. Všechna naměřená data se ukládají do datových souborů. Testy opotřebení se ukládají do adresáře `C:/.../data/MereniOp`. Měření vnitřního odporu se ukládají do adresářů `C:/.../data/MereniRi1` a `C:/.../data/MereniRi2`.

5.2 Technologie použitých lithiových akumulátorů

Jelikož oba akumulátory použité pro komplexní testování jsou lithium iontové akumulátory, bude zde uveden alespoň stručný popis této technologie.

Ačkoli byl prvek lithium objeven v roce 1817 a s prvními lithiovými akumulátory se začalo experimentovat v roce 1912, přišly do komerčního využití v prvních modifikacích teprve až po roce 1970.

Tyto akumulátory se skládají z kladné elektrody, záporné elektrody, elektrolytu separátoru a obalu. Separátor slouží k oddělení kladné a záporné elektrody, zabraňuje průchodu elektronů, ale propouští nabité ionty. Chemickou reakci zde probíhající nazýváme elektrolýza, kdy na katodě probíhá oxidace a na anodě redukce. Lithium je zde přítomno buď ve formě kladně nabitých iontů, nebo jako lithiová sůl součástí elektrolytu.

Výhody lithia jsou tyto: je to nejlehčí kov, nejvíce reaktivní kov a také má ze všech kovů nejvyšší elektrochemický potenciál. Tyto vlastnosti ho již předurčují k použití v chemických akumulátorech energie. Výhody a nevýhody lithiových akumulátorů pak jsou:

- Výhody: velmi malé samovybití cca 1% za měsíc, malá specifická hmotnost a velká hustota energie, žádný paměťový efekt a bezúdržbový provoz.
- Nevýhody: vyšší cena, u některých technologií zvýšené riziko exotermických reakcí.

Oba typy testovaných akumulátorů patří z hlediska technologie pod Lithium iontové akumulátory, proto je zde tato technologie stručně popsána.

U lithium iontových (Li-ion) akumulátorů jsou obě elektrody tvořeny tzv. interkalačními hostitelskými látkami, kde při elektrochemické reakci přecházejí ionty lithia (Li⁺) pomocí iontově vodivého elektrolytu mezi kladnou a zápornou elektrodou. Lithium tak není v akumulátoru přítomno v podobě kovu (jako například v jiných technologiích lithiových akumulátorů), ale ve formě iontů. Materiál záporné elektrody ovlivňuje vlastnosti tohoto typu akumulátorů, zejména pak jeho kapacitu a rychlost vybití. Jejich výhody se shodují s výhodami lithiových akumulátorů: vysoká hustota energie, nízký objem, dobrá životnost, nevyskytuje se zde paměťový efekt a mají nízké samovybití.

5.3 Komplexní test s akumulátorem LiFeYPO₄

5.3.1 Popis technologie LiFeYPO₄

Tyto akumulátory jsou pro trakční aplikace zajímavé, jelikož se v současné době hojně používají v nejrůznějších dopravních prostředcích a to zejména díky výhodnému poměru jejich vlastností ku ceně.

Elektrolyt je zde roztok lithiových solí v rozpouštědle. Kladná elektroda je zde tvořena fosfátem (oxidem fosforu). Na kladné elektrodě se neuvolňuje kyslík, takže je u těchto akumulátorů snižené riziko požáru či exploze a jsou tedy více bezpečné. Mřížka železa (Fe) je navíc dotovaná Yttriem pro zajištění vyšší kapacity a delší životnosti článku. Lze je plně vybit až do 100 % DOD a mají také vysokou životnost až 5000 cyklů. Samovybití je u těchto článků minimální a mohou být dobíjeny v jakémkoliv stavu vybití, jelikož nemají paměťový efekt¹³. Před prvním použitím akumulátoru je nutné provést tzv. formátování cca pěti cykly proudem o velikosti 0,5 C do hloubky 50 % DOD.

5.3.2 Popis měřeného vzorku

Prvním testovaným vzorkem byl akumulátor čínského výrobce Winston Battery LiFeYPO₄ o kapacitě 90 Ah. Přestože většina vlastností toho akumulátoru je velmi dobrá, díky čemuž je také v praxi hojně používán, jeho pořizovací náklady jsou stále poměrně vysoké. Na současném trhu se pohybují okolo 2500 Kč/kus. Parametry testovaného akumulátoru jsou uvedeny v tabulce 12.

Veličina [jednotka]	Hodnoty pro: Winston LiFeYPO ₄ 90Ah
Jmenovité napětí [V]	3,20 V
Jmenovitá kapacita[Ah]	90 Ah
Maximální napětí článku [V]	4,00 V
Minimální napětí článku [V]	2,50 V
Provozní napětí [V]	2,80 V – 3,80 V
Maximální vybíjecí proud [A]	270 A ~ 3 C
Maximální nabíjecí proud [A]	270 A ~ 3 C
Vnitřní odpor [Ω]	0,0004 Ω ~ 1 m Ω
Provozní vybíjecí teplota [°C]	-45°C až +85°C
Provozní nabíjecí teplota [°C]	-15°C až +45°C
Hmotnost [kg]	3,20 kg

Tabulka 12 Parametry akumulátoru Winston LiFeYPO₄ 90Ah [11]

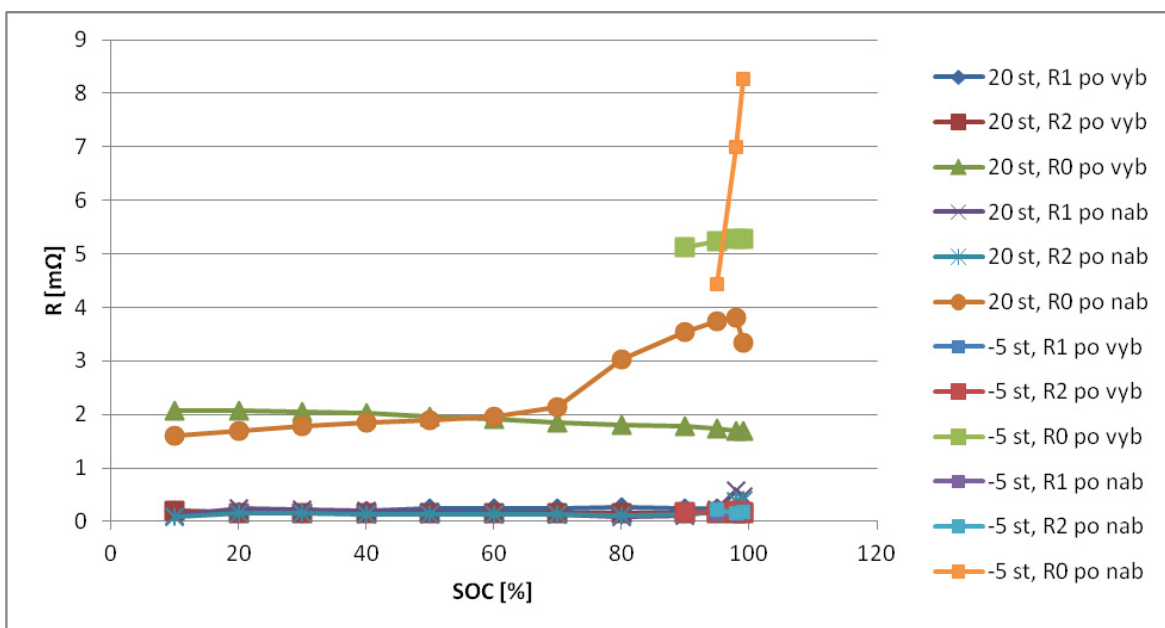
¹³ Paměťový efekt se vyskytuje zejména u NiCd akumulátorů. U lithiových akumulátorů se vyskytuje také, nicméně ve značně omezené míře. Jeho podstatou jsou změny krystalové struktury záporné elektrody. Vzniká při něm tzv. druhý vybíjecí stupeň, který se projevuje poklesem napětí akumulátoru v závěrečné fázi vybití až o 0,1 V. Tento jev lze odstranit plným vybitím akumulátoru [15].



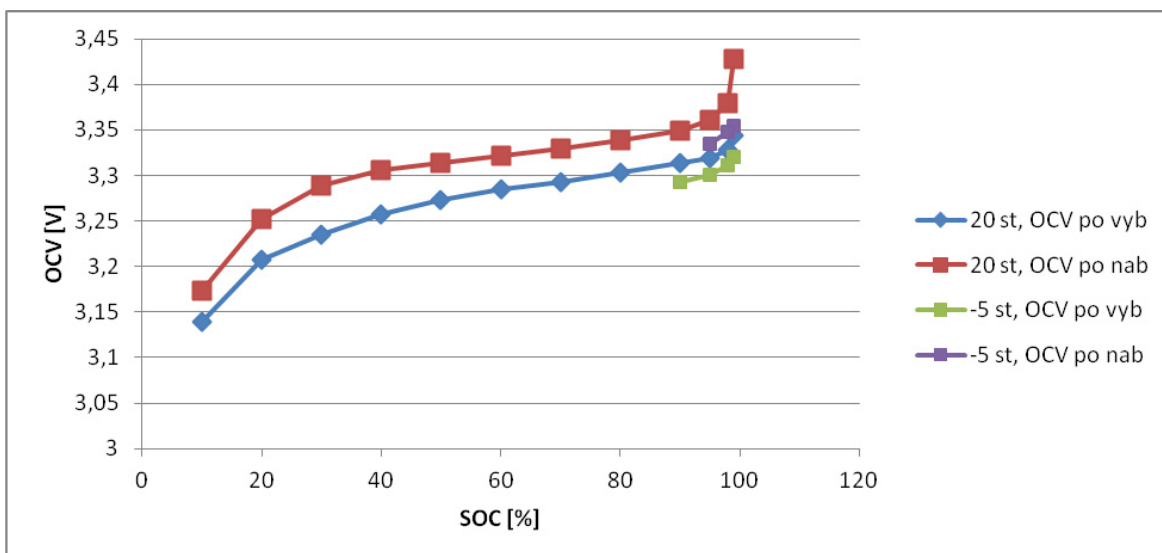
Obrázek 24 Winston LiFeYPO₄ 90Ah[11]

5.3.3 Vyhodnocení prvního zkušebního testu

Data z měření jsou uložena v datových souborech v příslušných složkách. Všechna data se naměřila úspěšně. Celkové vyhodnocení prvního zkušebního testu je uvedeno v tzv. Vyhodnocení komplexního testu v příloze 1. Na následujících obrázcích jsou zejména grafické výstupy z vyhodnocení prvního zkušebního testu, z kterých lze přehledně získat informace o průběhu daného měření.



Obrázek 25 Průměrné hodnoty parametrů R0 až C2



Obrázek 26 Průměrné hodnoty OCV

	Inab a Ivyb [xC]	DOD [%]	U_nab [V]	I_end [xC]	t_vyb [°C]	t_nab [°C]	OP 0-1 [-]	OP 1-2 [-]	OP 2-3 [-]	OP 0-3 [-]	Cena opotřebení [Kč/kWh]	Počet cyklů za život [-]
test opotřebení 1	0,5	50	3,7	0,005	20	20	0,000754	0	-0,000022	0,000244	0	Inf
test opotřebení 2	2	50	3,7	0,005	20	20	0,000111	0,00302	0,006106	0,00308	89,07	97
test opotřebení 3	1	20	3,7	0,005	20	20	0,005196	-0,000666	-0,000222	0,002689	77,73	186
test opotřebení 4	1	80	3,7	0,005	20	20	-0,000055	-0,00042	-0,000763	-0,000525	0	Inf
test opotřebení 5	1	50	3,5	0,005	20	20	0,00106	0,000999	0,000244	0,000804	23,14	328
test opotřebení 6	1	50	3,7	0,05	20	20	0,000178	-0,000067	0,000155	0,000089	2,7	3214
test opotřebení 7	1	50	3,7	0,005	0	0	0,000178	0,007353	0,008397	0,005309	153,49	57
test opotřebení 8	1	50	3,7	0,005	20	20	0,007814	-0,000644	-0,000089	0,00232	67,21	130

Tabulka 13 Vyhodnocení měření opotřebení

První zkušební komplexní test proběhl úspěšně. Proběhly všechny části komplexního testu a naměřená data se správně zapsala do datových souborů a vyhodnotila. Lze tedy říci, že implementace programu komplexního testu obstála a splnila očekávané požadavky.

V rámci naměřených dat z prvního a druhého měření Ri/OCV lze pozorovat omezování měření při zejména nižších hladinách SOC a nižších teplotách. Tato skutečnost je zřejmě způsobena výhradně fyzikálními vlastnostmi akumulátorů, takže s ní je nutno vždy dopředu počítat. Implementace programu komplexního testu by na toto neměla mít vliv. Z průměrných hodnot OCV z prvního měření Ri/OCV a druhého měření Ri/OCV na obrázku 26 je nicméně patrné, že měření probíhalo správně v souladu s již v minulosti měřenými daty a bez žádných výrazných výkyvů. Rovněž z obrázku 25 je patrné, že výsledky odpovídají teoretickým předpokladům.

Z naměřených dat z měření opotřebení je patrné, že někdy vyšlo opotřebení i záporné, tedy akumulátor se jakoby uzdravoval. Tento jev se objevil i při druhém zkušebním testu a bude tudíž blíže popsán ve vyhodnocení celého zkušebního testování v kapitole 5.5.

5.4 Komplexní test s akumulátorem $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$

5.4.1 Popis technologie LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Tyto akumulátory spadají pod technologii Lithium iontových akumulátorů blíže popsanou kapitole 5.2. Tyto akumulátory mají celou řadu výhod. Toho je docíleno zejména jiným chemickým složením elektrod, ale i jiným elektrolytem oproti ostatním Li-ion akumulátorům.

Významným nedostatkem většiny Li-ion akumulátorů je nízká vodivost elektrolytu při nízkých teplotách pod bodem mrazu. Dále u nich také při takto nízkých teplotách nebo při nabíjení vyššími proudy dochází k pokovování anod lithiem, což vede k snížené kapacitě a tím použitelnosti celého akumulátoru. Také často dochází ke snížené bezpečnosti provozu Li-ion akumulátorů. Při provozu akumulátorů při vyšších teplotách dochází kvůli teplotní nestabilitě elektrolytu a tím způsobenými chemickými reakcemi mezi elektrolytem a elektrodami, k výraznějšímu snižování životnosti akumulátoru. Při vyšších teplotách také dochází při chemických reakcích k uvolňování nezanedbatelného množství plynné složky, které musí být umožněn únik z akumulátoru, což vede k poměrně výrazným omezením při volbě designu a celkového tvaru akumulátoru [14]. Lithium titanitový akumulátor uvedené nedostatky maximálně potlačuje.

Kladná elektroda je obvykle tvořena sloučeninami LiCoO_2 nebo LiMn_2O_4 . Záporná elektroda je tvořena sloučeninou $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Titan je zde velmi důležitý, jelikož si díky němu elektroda i po extrakci většiny lithiových iontů udržuje svojí spinelovou strukturu¹⁴, což zajišťuje mimo jiné dlouhodobou životnost akumulátoru, u některých typů se počítá až s 18000 cykly, při plné DOD. Pozitivní vliv na životnost má i nízká objemová změna lithia během výroby těchto typů akumulátorů.

Při výrobě těchto akumulátorů se používají nanotechnologie, které umožňují značné zvětšení aktivní plochy anody, zamezení tvorby dendritů Li u anod, snížení hmotnosti akumulátoru a zajištění odolnosti proti požáru při zkratu článku. LTO také eliminuje rizika spojená s přetížením nebo přehřátím a akumulátor se nevznítí ani při vysokých teplotách. Naopak je možné jej nabíjet i při velmi nízkých teplotách (-30 °C).

Hustota energie je velmi vysoká, až téměř 200 Wh/kg. Mají možnost velmi rychlého nabíjení okolo 90% kapacity za cca 10 minut [13]. Tato vlastnost se zdá být do budoucna

¹⁴ Základem spinelové struktury je plošně centrovaná kubická mřížka kyslíkových aniontů. Tato mřížka je vedle mřížky hexagonální jediným uspořádáním, které vede při kulové symetrii jednotlivých částic k maximálnímu vyplnění objemu krystalu.

velkou perspektivou nejen pro klasické elektromobily, ale i například pro elektrobuses v městských linkách, u nichž by bylo možné efektivně dobíjet akumulátory na konečných zastávkách bez nutných větších zásahů do jízdnicích řádů.

Vlastnosti této technologie akumulátorů jsou tak zatím ze všech typů lithiových akumulátorů nejlepší.

5.4.2 Popis měřeného vzorku

Akumulátory $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ se skládají z kladné elektrody CAM 7 (LiNiO_2), záporné elektrody LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), elektrolytu a separátoru.

Nejprve se tento typ používal pro knoflíkové akumulátory, dnes se již začínají vyrábět články o kapacitě desítek Ah. Provozní napětí těchto článků je poměrně nízké v rozsahu 1,4 V až 2,75 V. Disponují velmi vysokou hustotou energie a to konkrétně 90 Wh/kg, respektive 250 Wh/l. Mají velmi vysokou životnost, výrobce uvádí, že hodnoty opotřebení u těchto článků jsou během prvních 1000 cyklů prakticky nulové. Jsou schopny zvládat nabíjení i při nízkých teplotách. Efektivní nabíjení i při nižších teplotách má pak přínos i pro ekonomii provozu těchto akumulátorů. Horní teplotní hranice provozu těchto akumulátorů je pak stanovena na 70 °C. Při 70 °C již bude opotřebení znatelné, jelikož jsme ho naměřili už při 40 °C. Takovému rozsahu provozních teplot nemůže konkurovat prakticky žádný typ v současnosti vyráběných akumulátor. Tyto akumulátory se také vlastním provozem méně zahřívají [14].

LTO záporná elektroda: zajišťuje lepší výkon, životnost, umožňuje lepší design, jelikož nevznikají plyny. Nevzniká na ní ani SEI¹⁵ vrstva z lithia, jelikož potenciál anody je oproti lithiu vyšší o cca 1,55 V. Její nevýhodou je, že její materiál má nižší hustotu energie než uhlíkové anody u Li-ion akumulátorů. Tento nedostatek je kompenzován katodou CAM 7, jejíž materiál má vyšší hustotu energie.

CAM 7 kladná elektroda: kromě již výše zmíněné vyšší hustoty energie jejího materiálu zajišťuje také vyšší výkon při nižších teplotách, vyšší kapacitu a vyšší průměrné napětí v rámci celého akumulátoru.

Elektrolyt: Klasický elektrolyt Li-ion akumulátorů se skládá ze solí LiPF_6 v etylen-uhlíkovém roztoku. Tento typ elektrolytu má ale bod tuhnutí a bod viskozity při poměrně vysokých teplotách, proto tyto akumulátory nemají přijatelný výkon při teplotách podle praxe již pod 0 °C. Tento elektrolyt je řidší, a zejména lineární uhličitany jsou nahrazeny

¹⁵ SEI (solid electrolyte interface) je vrstva, která vzniká na elektrodě usazováním částic, kterými jsou v těchto akumulátorech právě ionty lithia a snižuje tak její vodivost.

prvky s nižší dielektrickou konstantou. Je tak docíleno nižší viskozity a nižšího bodu tuhnutí. Proto jsou přidány také pomocná rozpouštědla na bázi nitrilů a esterů, které oproti uhličitanům posunou bod tuhnutí do nižších teplot.

Konkrétní akumulátor, který byl v rámci komplexního testu testován má označení GWL/Power CP-LTO-10AH. Cena testovaného akumulátoru se na současném trhu pohybuje okolo 750 Kč/kus.

Parametry testovaného akumulátoru jsou uvedeny v tabulce 14.

Veličina [jednotka]	Hodnoty pro: CP-LTO-10AH
Jmenovité napětí [V]	2,20 V
Jmenovitá kapacita [Ah]	10 Ah
Maximální napětí článku [V]	2,80 V
Minimální napětí článku [V]	1,50 V
Provozní napětí [V]	1,85 V – 2,75 V
Maximální vybíjecí proud [A]	100 A ~ 10 C
Maximální nabíjecí proud [A]	60 A ~ 6 C
Vnitřní odpor [Ω]	0,001 Ω
Provozní vybíjecí teplota [$^{\circ}\text{C}$]	-25 $^{\circ}\text{C}$ až +55 $^{\circ}\text{C}$
Provozní nabíjecí teplota [$^{\circ}\text{C}$]	-15 $^{\circ}\text{C}$ až +45 $^{\circ}\text{C}$
Hmotnost [kg]	0,360 kg

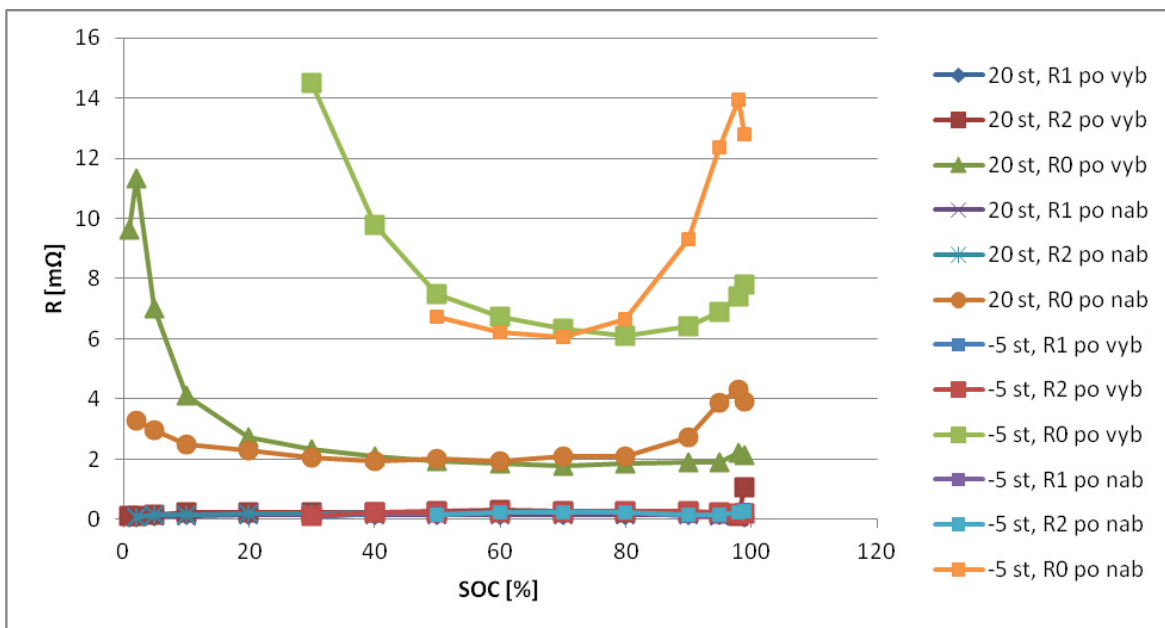
Tabulka 14 Parametry akumulátoru GWL/Power CP-LTO-10AH [12]



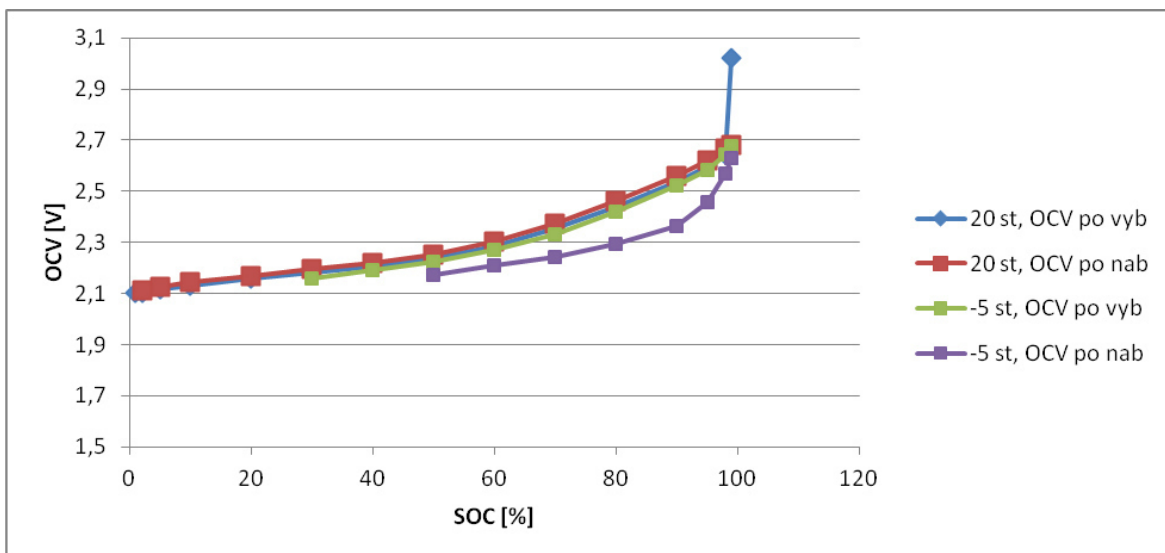
Obrázek 27 GWL/Power CP-LTO-10AH akumulátor [12]

5.4.3 Vyhodnocení druhého zkušebního testu

Data z měření jsou uložena v datových souborech v příslušných složkách. Všechna data se naměřila úspěšně. Celkové vyhodnocení druhého zkušebního testu je uvedeno v tzv. Vyhodnocení komplexního testu v příloze 1. Na následujících obrázcích jsou zejména grafické výstupy z vyhodnocení druhého zkušebního testu, z kterých lze přehledně získat informace o průběhu daného měření.



Obrázek 28 Průměrné hodnoty parametrů R0 až C2



Obrázek 29 Průměrné hodnoty OCV

	Inab a Ivyb	DOD	U_nab	I_end	t_vyb	t_nab	OP 0-1	OP 1-2	OP 2-3	OP 0-3	Cena opotřebení	Počet cyklů za život
	[xC]	[%]	[V]	[xC]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[Kč/kWh]	[-]
test opotřebení 1	3	70	2,75	0,05	20	20	-0,000142	-0,000071	-0,000143	-0,000118	0	Inf
test opotřebení 2	1	70	2,75	0,05	20	20	-0,000071	0	-0,000143	-0,000071	0	Inf
test opotřebení 3	6	70	2,75	0,05	20	20	-0,000071	-0,000071	-0,000071	-0,000071	0	Inf
test opotřebení 4	3	70	2,75	0,05	20	20	-0,000071	0	-0,000071	-0,000048	0	Inf
test opotřebení 5	3	90	2,75	0,05	20	20	0	0	0	0	0	Inf
test opotřebení 6	3	70	2,75	0,05	20	20	-0,000055	0	-0,000071	-0,000043	0	Inf
test opotřebení 7	3	70	2,75	0,5	20	20	0	0,000071	0	0,000024	3,24	7500
test opotřebení 8	3	70	2,75	0,05	-5	-5	0	0,000071	-0,000071	0	0	Inf
test opotřebení 9	3	70	2,75	0,05	20	20	-0,000071	-0,000071	-0,000071	-0,000071	0	Inf

Tabulka 15 Vyhodnocení měření opotřebení

Druhý zkušební komplexní test proběhl úspěšně. Proběhly všechny části komplexního testu a naměřená data se správně zapsala do datových souborů a vyhodnotila. Program komplexního testu tedy obstál i při druhém zkušebním testu.

V rámci naměřených dat z prvního a druhého měření Ri/OCV lze pozorovat omezování měření při zejména nižších hladinách SOC a nižších teplotách. Tato skutečnost je zřejmě způsobena výhradně fyzikálními vlastnostmi akumulátorů, takže s ní je nutno vždy dopředu počítat. Implementace programu komplexního testu by na toto neměla mít vliv. Z průměrných hodnot OCV z prvního měření Ri/OCV a druhého měření Ri/OCV na obrázku 29 je nicméně patrné, že měření probíhalo správně v souladu s již v minulosti měřenými daty a bez žádných výrazných výkyvů. Rovněž z obrázku 28 je patrné, že výsledky odpovídají teoretickým předpokladům.

Z naměřených dat z měření opotřebení je patrné, že někdy se opotřebení zdánlivě i snižovalo, podobně jako v případě prvního zkušebního testu. Z tohoto důvodu jsou možné příčiny tohoto jevu popsány ve vyhodnocení celého zkušebního testování v kapitole 5.5.

5.5 Celkové vyhodnocení zkušebních komplexních testů

Z naměřených a posléze vyhodnocených dat pro první i druhý zkušební komplexní test, která jsou uvedena ve vyhodnocení komplexního testu v příloze 1 si lze povšimnout, že u vyšších SOC dochází k náhlému poklesu parametrů R0, R1 i R2 a to až o několik miliohmů. Tento jev je pravděpodobně, v případě parametru R0, způsoben zvýšením polarizačního odporu akumulátoru u vyšších SOC, čímž dochází k zvýšení napětí akumulátoru a z důvodu dodržení Ohmova zákona se musí odpor na rezistoru R₀ snížit. V případě parametrů R1 a R2 je tato skutečnost pravděpodobně z větší míry zaviněna nedostatečným přizpůsobením se fitness funkce na naměřená data, kdy tato funkce volí vyšší hodnoty pro parametr UC10 a nižší hodnoty pro R1. Obdobně také vyšší hodnoty pro UC20 a nižší hodnoty pro R2. Tento problém by tedy mělo být možné pro parametry R1 a R2 alespoň částečně odstranit změnou fitness funkce, nicméně toto již nebylo v rámci této práce řešeno.

Ve vyhodnocení opotřebenění pro oba zkušební komplexní testy si lze všimnout, že hodnoty cen opotřebenění a počtů cyklů za život akumulátoru se pohybují ve značně širokém spektru a v některých případech nabývají hodnoty opotřebenění i záporných hodnot, což by znamenalo, že se akumulátor v takových případech během testu opotřebenění dokonce „uzdravil“. Tyto výsledky mohou mít více příčin. Základní příčiny mohou být následující.

Nejistota měření změny SOH během jednoho testu opotřebenění se pohybuje řádově v setinách procent kapacity akumulátoru. Hodnoty změny SOH při krátkých testech opotřebenění, čítající pouze tři metacykly o pěti či deseti normálních cyklech se pohybují obvykle právě také na úrovni setin procenta kapacity akumulátoru. Nejistota měření je pak v tomto případě řádově shodná s naměřenými daty, což způsobuje značné výkyvy naměřených hodnot. Tento nedostatek by šel alespoň částečně eliminovat navýšením délky jednotlivých testů opotřebenění, tak aby změna SOH při jednotlivých testech opotřebenění byla vyšší. Toto by nicméně také vedlo ke značnému časovému prodloužení celého měření opotřebenění a tím i celého komplexního testu, což není zcela žádoucí. Další možnou příčinou je z naměřených dat vyzorovaná vlastnost testovaných akumulátorů, jejímž vlivem dochází k jakési setrvačnosti reakce akumulátoru na změnu parametrů provozu při přechodech mezi různými provozu akumulátoru. Akumulátoru tak při přechodu na provoz s jinými parametry má jakousi snahu zůstat na provozních charakteristikách jeho předchozího provozu a nějaký čas trvá, než se akumulátor novému provozu přizpůsobí. Ke změnám parametrů provozu akumulátoru dochází mezi jednotlivými testy opotřebenění, takže hodnoty opotřebenění při prvním metacyklu následujícího testu opotřebenění mohou být ovlivněny provozem akumulátoru z předchozího testu opotřebenění a tudíž zkreslené. Tento problém by bylo zřejmě možné zmírnit opět navýšením délky jednotlivých testů opotřebenění. Tím by toto zkreslení počátku testu opotřebenění nebylo vzhledem k vyšší délce testu opotřebenění tolik výrazné. Toto by ovšem opět způsobilo nežádoucí nárůst délky celého měření opotřebenění a tak i celého komplexního testu.

I přesto, že vyhodnocení naměřených dat je zatíženo určitými výše zmíněnými chybami, neměly by tyto problémy být způsobeny pouze povahou softwaru, ale z větší části spíše uživatelskými nároky na co možná nejrychlejší a tím i neekonomičtější provedení komplexního testu. Dalo by se tedy konstatovat, že uživatel vždy volí kompromis mezi ekonomičností daného testu a kvalitou naměřených dat. I když komplexní test celkové měření zefektivňuje a tak urychluje a zlevňuje, nemůže zvládnout obejít fyzikální vlastnosti akumulátorů, nebo vlastnosti testovacího pracoviště. Realizované řešení dvou zkušebních komplexních testů, byť za daných podmínek byly kladeny bohužel vyšší

nároky na časový průběh měření než na kvalitu naměřených dat, kdy komplexní testy trvaly vždy okolo dvou týdnů, považuji přesto za rozumný kompromis mezi cenou a kvalitou naměřených dat.

Oba zkušební komplexní testy proběhly úspěšně a prokázaly tak funkčnost tohoto nového softwaru na testovacím pracovišti.

6 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření softwaru pro komplexní testování elektrických akumulátorů a to zejména lithium iontových akumulátorů pro trakční aplikace. Byly provedeny dva komplexní testy, jejichž výsledky jsou uvedeny v kapitole 5. Obě tato měření dopadla úspěšně. V této práci jsem popsal základní typy modelů elektrických akumulátorů, hardwarové uspořádání pracoviště pro testování elektrických akumulátorů a výslednou implementaci nově vytvořeného softwaru na tomto pracovišti. Již během vytváření nového softwaru probíhalo testování akumulátorů a tak byla možnost otestovat vznikající verzi v běžných testovacích podmínkách. Úspěšné odzkoušení nového programu proběhlo v rámci dvou nezávislých výše zmíněných komplexních testů, a to na různých technologiích akumulátorů. Odzkoušení implementace tohoto nového programu tak dopadlo úspěšně a lze tedy chování programu považovat za správné. Implementace programu Komplexního testu na pracovišti pro testování elektrických akumulátorů se tedy podařila.

V programu Komplexního testu jsou v současné době použity dvě parametrizace, které nejsou implementovány v celém Komplexním testu, ale pouze v některých jeho částech. Tyto parametrizace chybí v měření R_i/OCV , a nelze tak celý komplexní test s těmito parametrizacemi provádět. Tyto parametrizace jsou možností použití komplexního testu pro testování různých typů zásobníků elektrické energie, tedy akumulátorů nebo superkapacitorů a dále parametrizace, která by umožnila testovat současně až šest akumulátorů nebo superkapacitorů v sérii. Implementace těchto parametrizací v programu Komplexního testu ale nebyly náplní této diplomové práce.

Do budoucna se počítá se zavedením těchto dvou parametrizací pro celý program Komplexního testu. Tímto by mělo dojít k značné úspoře času, jelikož bude možné za stejný čas otestovat vyšší počet akumulátorů nebo superkapacitorů. Jsou zde tedy i do budoucna možnosti tento software nadále rozvíjet.

7 Odkazy, literatura

- [1] ANTOŠ, J.: Testování elektrických akumulátorů s využitím konečného stavového automatu, Praha, ČVUT, 2014. 6 s.
- [2] SADIL, J.: Modelování účinnosti nabíjení elektrochemických akumulátorů LiFe(Y)PO_4 , Praha, ČVUT, 2013
- [3] GLAIZE, CH., GENIESE, S.: Lithium Batteries and Other Electrochemical Storage Systems, Great Britain, 2013, ISTE, WILEY, 58s - 78s, ISBN 978-1-84821-496-5
- [4] SADIL J., LESO M.: Workplace for Performance Testing of Energy Accumulators for Electric Devices. Advances in Military Technology. University of Defence in Brno, June 2012, vol. 7, no. 1. ISSN 1802-2308.
- [5] SADIL J., LESO M.: Pracoviště pro krátkodobé a dlouhodobé testování elektrických akumulátorů energie, prezentace na semináři, ČVUT, 4.6. 2013
- [6] Web prodejce elektro-přístrojů Elim, Sankt-Peterburg, [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupný z www: <<http://www.elim.ru/item/750203>>
- [7] Web výrobce transformátorů a Hallových sensorů Telcon, Crawley, United Kingdom, [online]. [cit. 2015-04-1]. Dostupný z www: <<http://www.telcon.co.uk/PDF%20Files/HT300M.pdf>>
- [8] Web výrobce termoregulační techniky, Seelbach, [online]. [cit. 2015-03-9]. Dostupný z www: <<http://www.julabo.com/en/products/refrigerated-circulators/refrigerated-heating-circulators/f33-ma-refrigerated-heating-circulator>>
- [9] Web výrobce elektro-přístrojů Enelec, [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupný z www: <<http://www.enelec.es/web/pdfs/castellano/A6kW.pdf>>
- [10] Web výrobce softwaru National Instruments, [online], [cit. 2015-03-25]. Dostupný z www: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/207407>>
- [11] Web prodejce elektro-přístrojů Ev-cars, [online], [cit. 2015-05-06]. Dostupný z www: <<http://www.ev-cars.at/batterien/wb-lyp90aha-lifeypo4-3-2v-90ah.html#!prettyPhoto>>

- [12] Web prodejce elektro-přístrojů EV-Power, The summary of the technical specification Lithium Titanate High-power cell CP-LTO-10AH , [online], [cit. 2015-03-06]. Dostupný z www: <<http://www.ev-power.eu/>>
- [13] Web online časopisu Odbornecasopisy.cz , [online], [cit. 2015-05-13]. Dostupný z www: <http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp user/konference/2013/eprob_X_MSV/04-hladik-abaf-toshiba-landis-gyr-secondary-cells-and-accumulation-cz.pdf>
- [14] PÉRA M. C., HISSEL D., GUALOUS H.,TURPIN C.: Electrochemical Components, Great Britain, 2013, ISTE, WILEY, 253s - 276s , ISBN 978-1-84821-401-9
- [15] Webový informační portal firmy Battex [online], [cit. 2015-05-20]. Dostupný z www: <<http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/povery-a-myty-o-hermetickych-akumulatorech/pametovy-efekt-memory-effect>>

Seznam použitých zkratek

Použité zkratky		popis
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench	Název vývojového prostředí
PCE	Power Control Electronic	Výrobce elektropřístrojů
OCV	Open Circuit Voltage	Napětí akumulátoru naprázdno
SOC	State of Charge	Stav nabití akumulátoru, udává se v procentech kapacity, přičemž 100% odpovídá aktuální hodnotě SOH
RC	Resistor Capacitor	Rezistor a kondenzátor zapojeny paralelně
RS 232	Recommended Standard 232	Rozhraní, konektor
DAQ	Data Acquisition	Pořizování dat
SOH	State of Health	Stav zdraví akumulátoru, uvádí se v procentech jmenovité kapacity akumulátoru
Ri/OCV	měření vnitřního odporu	Jedna z částí komplexního testu
VI	Virtual Instrument	Program ve vývojovém prostředí LabVIEW
SubVI	Podprogram VI	Podprogram ve vývojovém prostředí LabVIEW
DOD	Depth of discharge	Hloubka vybití [%]
CC	Constant Current	Režim nabíjení akumulátoru při konstantním proudu
CV	Constant Voltage	Režim nabíjení akumulátoru při konstantním napětí
xC	multiple Capacity	Násobek ampér hodinové kapacity akumulátoru
NaN	Not a Number	Hodnota nerepresentující číslo
LTO	Lithium titanium oxide	Typ akumulátorů
SEI	Solid Electrolyte Interface	Přechod z pevných částic
C	Capacity	Kapacita akumulátoru [Ah]
Ri	Internal resistance	Vnitřní odpor [Ω]

Seznam obrázků

Obrázek 1	Obvod akumulátoru a zdroje.....	11
Obrázek 2	Model s 1 vnitřním odporem	11
Obrázek 3	Model s 1 časovou konstantou.....	12
Obrázek 4	Model se dvěma časovými konstantami	13
Obrázek 5	Model se závislostí na směru proudu.....	13
Obrázek 6	Kompletní obvodový model celého akumulátoru.....	14
Obrázek 7	Průběh napětí OCV aku/model	15
Obrázek 8	Schéma pracoviště pro testování elektrických akumulátorů (převzato z [6]) 16	
Obrázek 9	Pracoviště pro testování elektrických akumulátorů [7]	17
Obrázek 10	Programovatelný zdroj A6KW (převzato z [11]).....	18
Obrázek 11	Programovatelná zátěž EL-9080-400 [8]	19
Obrázek 12	Julabo F 33 - MA [10].....	19
Obrázek 13	Převodník proudu s Hallovou sondou HT300M (převzato z [9])	20
Obrázek 14	16-bitová měřicí karta DAQ PCie-6341 (převzato z [14]).....	21
Obrázek 15	Struktura - blokový diagramu programu.....	22
Obrázek 16	Struktura subVI měření R_i /OCV	24
Obrázek 17	Schéma stavového automatu pro Měření vnitřního odporu	26
Obrázek 18	Měřicí While smyčka	33
Obrázek 19	Zapisovací While smyčka	34
Obrázek 20	Blokový diagram měření opotřebení.....	35
Obrázek 21	Schéma stavového automatu pro jeden test opotřebení	37
Obrázek 22	Umístění vyhodnocení v blokovém diagramu komplexního testu.....	43
Obrázek 23	Tabulka parametrů modelu akumulátoru	44
Obrázek 24	Winston LiFeYPO ₄ 90Ah[16].....	52
Obrázek 25	Průměrné hodnoty parametrů R0 až C2	52
Obrázek 26	Průměrné hodnoty OCV	53
Obrázek 27	GWL/Power CP-LTO-10AH akumulátor [17]	56
Obrázek 28	Průměrné hodnoty parametrů R0 až C2	57
Obrázek 29	Průměrné hodnoty OCV	57

Seznam tabulek

Tabulka 1	Přechodová tabulka - část 1	27
Tabulka 2	Přechodová tabulka - část 2	27
Tabulka 3	Přechodová tabulka - část 3	28
Tabulka 4	Přechodová tabulka - část 4	28
Tabulka 5	Přechodová tabulka - část 5	29
Tabulka 6	Přechodová tabulka - část 1	38
Tabulka 7	Přechodová tabulka - část 2	38
Tabulka 8	Přechodová tabulka - část 3	39
Tabulka 9	Přechodová tabulka - část 4	39
Tabulka 10	Přechodová tabulka - část 5.....	40
Tabulka 11	Parametry	44
Tabulka 12	Parametry akumulátoru Winston LiFeYPO ₄ 90Ah [16]	51
Tabulka 13	Vyhodnocení měření opotřebení	53
Tabulka 14	Parametry akumulátoru GWL/Power CP-LTO-10AH [17].....	56
Tabulka 15	Vyhodnocení měření opotřebení	58

Přílohy

Příloha 1: Vyhodnocení komplexního testu pro první a druhý zkušební test

V této příloze jsou uvedeny přehledné výstupy vyhodnocených dat komplexních testů, tedy tzv. „Vyhodnocení komplexního testu“. Na následujících osmi stranách této přílohy jsou v originální podobě uvedeny dvě „Vyhodnocení komplexního testu“ postupně pro první zkušební komplexní test s technologií akumulátoru LiFeYPO_4 a pro druhý zkušební komplexní test s technologií akumulátoru LTO.



Vyhodnocení komplexního testu akumulátoru

Datum testování: 20.3.2015 – 4.4.2015

Technologie akumulátoru: LiFeYPO₄/C (kladná/záporná elektroda)

Výrobce, dodavatel akumulátoru: Winston battery, i4wifi

Typ akumulátoru: LYP90Aha, kapacita 90 Ah, označení LF1

Místo testování: Pracoviště pro testování akumulátorů, Konviktská 20, Praha 1

Osoba zodpovědná za test: Jindřich Sadil, sadil@fd.cvut.cz

Testy provedl: Jan Antoš

Další vlastnosti akumulátoru:

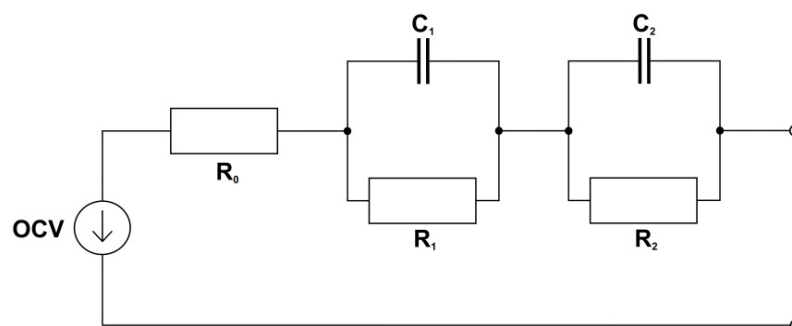
Pořizovací cena: 2500 Kč

Počet cyklů¹⁶ provedených před komplexním testem: 166

Použitá označení parametrů:

Parametry	popis
UC10	Napětí na rezistoru R ₁
R1	Odpor rezistoru R ₁
C1	Kapacita kondenzátoru C ₁
UC20	Napětí na rezistoru R ₂
R2	Odpor rezistoru R ₂
C2	Kapacita kondenzátoru C ₂
OCV	Napětí zdroje naprázdno
R0	Odpor rezistoru R ₀ , vnitřní odpor akumulátoru

Parametry uvedeny v tabulce odpovídají zapojení v modelu náhradního elektrického obvodu znázorněného na obrázku 1.



Obrázek 1: Schéma modelu náhradního elektrického obvodu akumulátoru

¹⁶ Přepočteno na plné cykly (DOD = 100%)



Naměřené hodnoty:

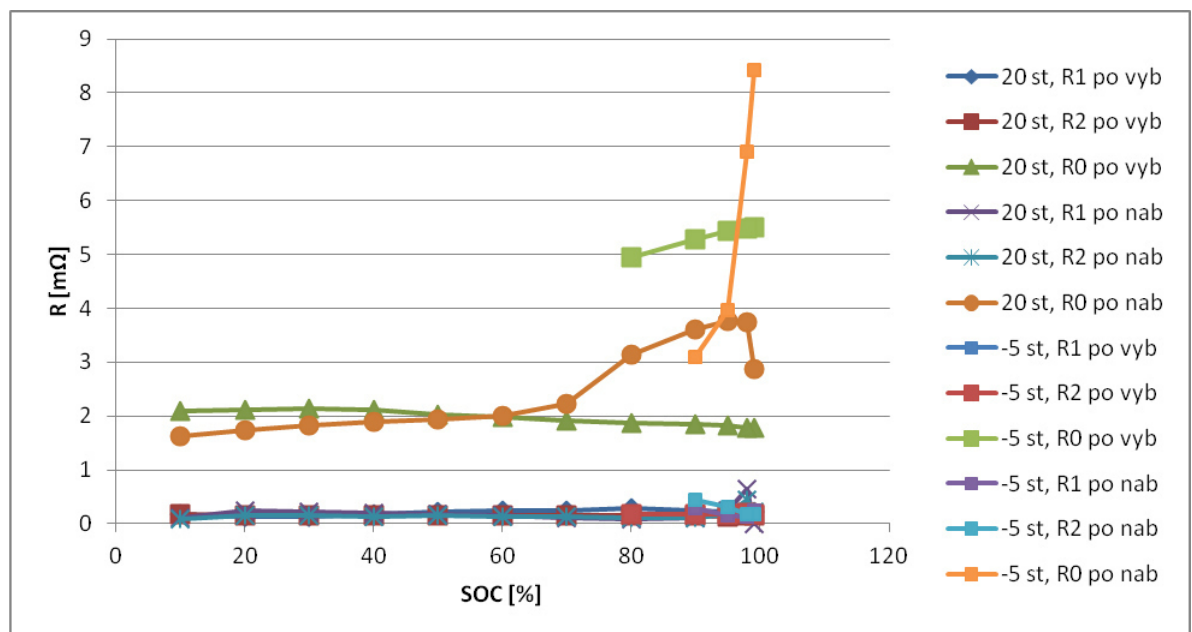
1) První měření Ri a OCV:

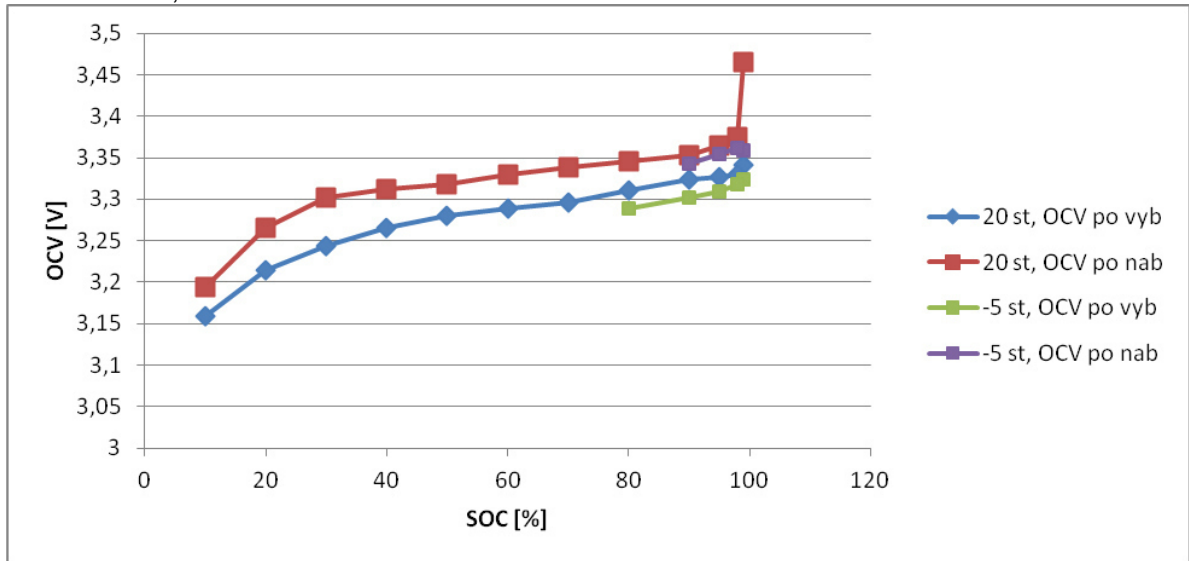
a) Teplota 20°C:

teplota=20°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (vyb) [V]	0,0206	0,0181	0,02	0,0228	0,0276	0,0258	0,029	0,0344	0,0431	0,0607	0,0828	0,1107	NaN	NaN	NaN
R1 (vyb) [mOhm]	0,214	0,2116	0,2274	0,2519	0,2952	0,2453	0,2404	0,2167	0,166	0,1375	0,132	0,1646	NaN	NaN	NaN
C1 (vyb) [F]	100000	100000	100000	100000	99971	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN
UC20 (vyb) [V]	0,0286	0,0268	0,0413	0,0497	0,0526	0,0576	0,064	0,0725	0,0809	0,0871	0,1021	0,1405	NaN	NaN	NaN
R2 (vyb) [mOhm]	0,1456	0,1441	0,1336	0,1448	0,1599	0,1431	0,1482	0,1576	0,1565	0,1529	0,1463	0,1862	NaN	NaN	NaN
C2 (vyb) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN
OCV (vyb) [V]	3,3414	3,3303	3,3264	3,3238	3,311	3,2962	3,2884	3,2801	3,2653	3,243	3,2151	3,159	NaN	NaN	NaN
R0 (vyb) [mOhm]	1,7817	1,7817	1,8255	1,8473	1,87	1,9145	1,9817	2,0263	2,1149	2,1376	2,1149	2,0921	NaN	NaN	NaN
teplota=20°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (nab) [V]	-0,0068	-0,1475	-0,1614	-0,1627	-0,1215	-0,0528	-0,0346	-0,0281	-0,0236	-0,023	-0,0221	-0,0133	NaN	NaN	NaN
R1 (nab) [mOhm]	0,0001	0,645	0,2346	0,1173	0,0844	0,1171	0,1484	0,1735	0,188	0,2258	0,2513	0,1144	NaN	NaN	NaN
C1 (nab) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN
UC20 (nab) [V]	-0,2257	-0,1709	-0,1541	-0,1295	-0,1066	-0,0758	-0,0672	-0,0638	-0,0567	-0,0493	-0,0453	-0,035	NaN	NaN	NaN
R2 (nab) [mOhm]	0,2151	0,4439	0,1766	0,1146	0,1065	0,1243	0,1386	0,1457	0,1383	0,1486	0,1577	0,0893	NaN	NaN	NaN
C2 (nab) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN
OCV (nab) [V]	3,4645	3,3752	3,3639	3,3533	3,3451	3,3385	3,3296	3,3185	3,3126	3,3016	3,266	3,1938	NaN	NaN	NaN
R0 (nab) [mOhm]	2,8777	3,7313	3,7711	3,6157	3,1472	2,2158	1,9942	1,9273	1,8839	1,8162	1,7287	1,6175	NaN	NaN	NaN

b) Teplota -5°C:

teplota=-5°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (vyb) [V]	0,0284	0,0282	0,0322	0,0352	0,0408	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R1 (vyb) [mOhm]	0,1376	0,151	0,1656	0,1707	0,1677	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C1 (vyb) [F]	100000	100453	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
UC20 (vyb) [V]	0,0487	0,0516	0,0807	0,0994	0,114	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R2 (vyb) [mOhm]	0,1717	0,1869	0,1843	0,1817	0,1766	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C2 (vyb) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
OCV (vyb) [V]	3,3233	3,3174	3,3094	3,3017	3,2885	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R0 (vyb) [mOhm]	5,5023	5,4801	5,4355	5,2796	4,9454	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
teplota=-5°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (nab) [V]	-0,1693	-0,1452	-0,0717	-0,0436	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R1 (nab) [mOhm]	0,2427	0,1398	0,1522	0,2831	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C1 (nab) [F]	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
UC20 (nab) [V]	-0,1136	-0,1062	-0,0924	-0,089	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R2 (nab) [mOhm]	0,1857	0,173	0,3016	0,4525	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C2 (nab) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
OCV (nab) [V]	3,3588	3,3622	3,3545	3,3429	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R0 (nab) [mOhm]	8,4321	6,9091	3,9686	3,1028	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN





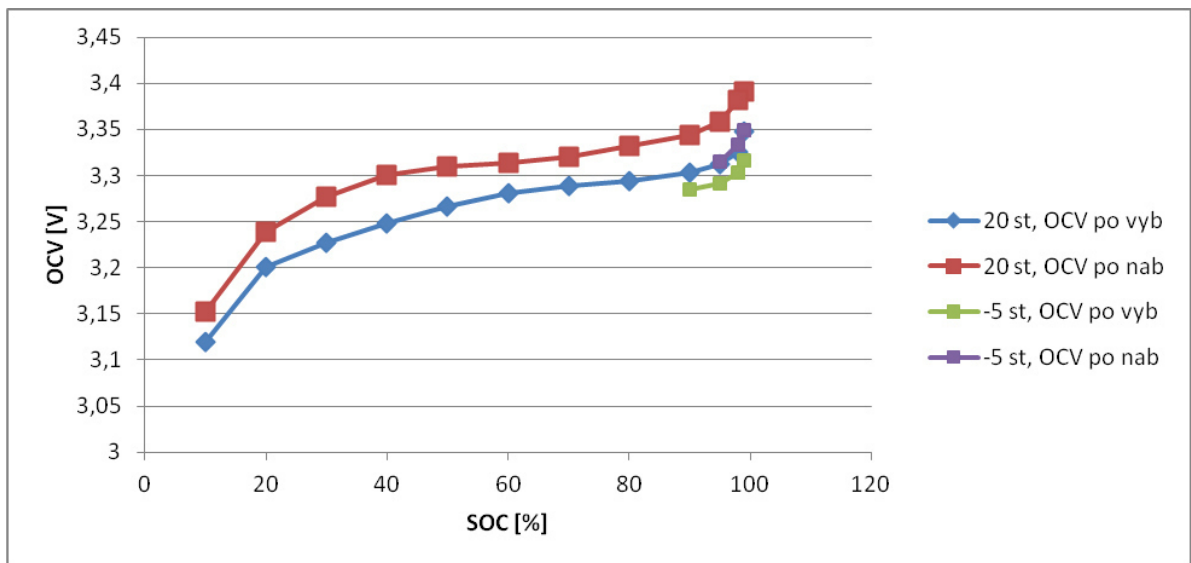
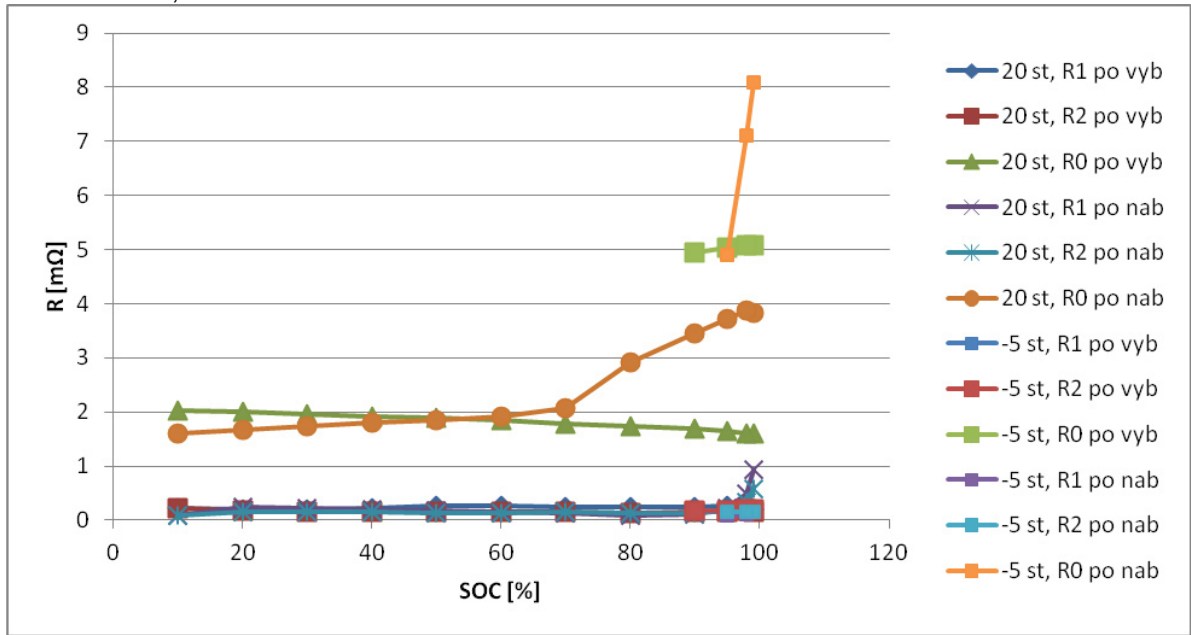
2) Druhé měření Ri a OCV:

a) Teplota 20°C:

teplota=20°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (vyb) [V]	0,0239	0,0198	0,0219	0,0227	0,0232	0,0248	0,0286	0,0307	0,0338	0,0385	0,0509	0,0676	NaN	NaN	NaN
R1 (vyb) [mOhm]	0,1941	0,2264	0,254	0,2468	0,239	0,2405	0,2653	0,2558	0,2247	0,1888	0,2004	0,2144	NaN	NaN	NaN
C1 (vyb) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN
UC20 (vyb) [V]	0,0311	0,0273	0,0352	0,0405	0,0486	0,0559	0,0602	0,0644	0,0682	0,0741	0,0923	0,1208	NaN	NaN	NaN
R2 (vyb) [mOhm]	0,1429	0,1794	0,1616	0,1466	0,1367	0,1439	0,1599	0,1628	0,1623	0,1518	0,174	0,2113	NaN	NaN	NaN
C2 (vyb) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN
OCV (vyb) [V]	3,3475	3,3259	3,3126	3,3033	3,2943	3,289	3,2805	3,2665	3,2486	3,2268	3,2008	3,1198	NaN	NaN	NaN
R0 (vyb) [mOhm]	1,6107	1,6111	1,6555	1,7006	1,7457	1,7897	1,8572	1,9016	1,9239	1,9691	2,0139	2,0358	NaN	NaN	NaN
teplota=20°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (nab) [V]	-0,1407	-0,145	-0,1635	-0,1606	-0,0975	-0,0444	-0,0303	-0,025	-0,0239	-0,023	-0,0237	-0,0144	NaN	NaN	NaN
R1 (nab) [mOhm]	0,9363	0,4971	0,2103	0,1125	0,089	0,1396	0,1509	0,1651	0,2049	0,2266	0,2478	0,0867	NaN	NaN	NaN
C1 (nab) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN
UC20 (nab) [V]	-0,1623	-0,1637	-0,1518	-0,1329	-0,0998	-0,0724	-0,0643	-0,0583	-0,0528	-0,0513	-0,0463	-0,0421	NaN	NaN	NaN
R2 (nab) [mOhm]	0,5747	0,3267	0,1824	0,1307	0,1242	0,1461	0,1408	0,137	0,1442	0,1634	0,162	0,076	NaN	NaN	NaN
C2 (nab) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN
OCV (nab) [V]	3,3915	3,3823	3,3585	3,3444	3,3316	3,3197	3,3137	3,3094	3,3004	3,2767	3,2394	3,1525	NaN	NaN	NaN
R0 (nab) [mOhm]	3,8251	3,869	3,7155	3,453	2,9275	2,063	1,9073	1,842	1,7972	1,7306	1,6644	1,5972	NaN	NaN	NaN

b) Teplota -5°C:

teplota=-5°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (vyb) [V]	0,031	0,0294	0,0319	0,0345	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R1 (vyb) [mOhm]	0,1667	0,1705	0,1703	0,1631	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C1 (vyb) [F]	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
UC20 (vyb) [V]	0,0439	0,0428	0,0671	0,0856	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R2 (vyb) [mOhm]	0,2009	0,1955	0,1761	0,1735	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C2 (vyb) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
OCV (vyb) [V]	3,3165	3,3037	3,2918	3,2846	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R0 (vyb) [mOhm]	5,0783	5,0794	5,0358	4,9463	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
teplota=-5°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (nab) [V]	-0,1647	-0,125	-0,0487	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R1 (nab) [mOhm]	0,1609	0,1011	0,087	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C1 (nab) [F]	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
UC20 (nab) [V]	-0,0932	-0,0934	-0,0847	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R2 (nab) [mOhm]	0,1442	0,1467	0,146	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C2 (nab) [F]	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
OCV (nab) [V]	3,3494	3,3333	3,3146	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R0 (nab) [mOhm]	8,0975	7,0988	4,9024	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



3) Test opotřebení:

	Inab a Ivyb [xC]	DOD [%]	U_nab [V]	I_end [xC]	t_vyb [°C]	t_nab [°C]	OP 0-1 [-]	OP 1-2 [-]	OP 2-3 [-]	OP 0-3 [-]	Cena opotřebení [Kč/kWh]	Počet cyklů za život [-]
test opotřebení 1	0,5	50	3,7	0,005	20	20	0,000754	0	-0,000022	0,000244	0	Inf
test opotřebení 2	2	50	3,7	0,005	20	20	0,000111	0,00302	0,006106	0,00308	89,07	97
test opotřebení 3	1	20	3,7	0,005	20	20	0,005196	-0,000666	-0,000222	0,002689	77,73	186
test opotřebení 4	1	80	3,7	0,005	20	20	-0,000055	-0,00042	-0,000763	-0,000525	0	Inf
test opotřebení 5	1	50	3,5	0,005	20	20	0,00106	0,000999	0,000244	0,000804	23,14	328
test opotřebení 6	1	50	3,7	0,05	20	20	0,000178	-0,000067	0,000155	0,000089	2,7	3214
test opotřebení 7	1	50	3,7	0,005	0	0	0,000178	0,007353	0,008397	0,005309	153,49	57
test opotřebení 8	1	50	3,7	0,005	20	20	0,007814	-0,000644	-0,000089	0,00232	67,21	130



Vyhodnocení komplexního testu akumulátoru

Datum testování: 24.4.2015 – 16.5.2015

Technologie akumulátoru: CAM 7/LTO (kladná/záporná elektroda)

Výrobce, dodavatel akumulátoru: CamX Power, i4wifi

Typ akumulátoru: LTO CP 10AH, kapacita 10 Ah, označení LTO1

Místo testování: Pracoviště pro testování akumulátorů, Konviktská 20, Praha 1

Osoba zodpovědná za test: Jindřich Sadil, sadil@fd.cvut.cz

Testy provedl: Jan Antoš

Další vlastnosti akumulátoru:

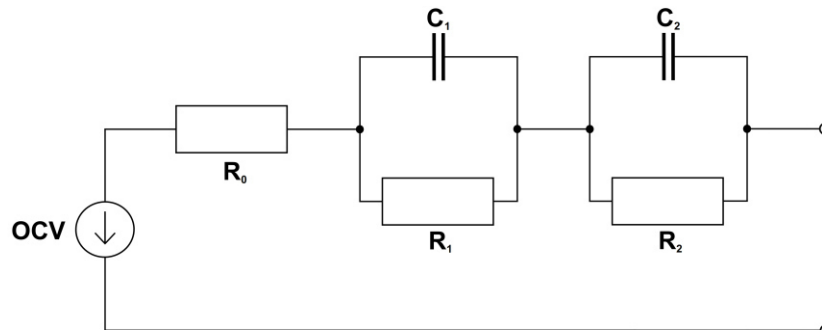
Pořizovací cena: 750 Kč

Počet cyklů¹⁷ provedených před komplexním testem: 73

Použitá označení parametrů:

Parametry	popis
UC10	Napětí na rezistoru R_1
R1	Odpor rezistoru R_1
C1	Kapacita kondenzátoru C_1
UC20	Napětí na rezistoru R_2
R2	Odpor rezistoru R_2
C2	Kapacita kondenzátoru C_2
OCV	Napětí zdroje naprázdno
R0	Odpor rezistoru R_0 , vnitřní odpor akumulátoru

Parametry uvedeny v tabulce odpovídají zapojení v modelu náhradního elektrického obvodu znázorněného na obrázku 1.



Obrázek 1: Schéma modelu náhradního elektrického obvodu akumulátoru

¹⁷ Přepočteno na plné cykly (DOD = 100%)



Naměřené hodnoty:

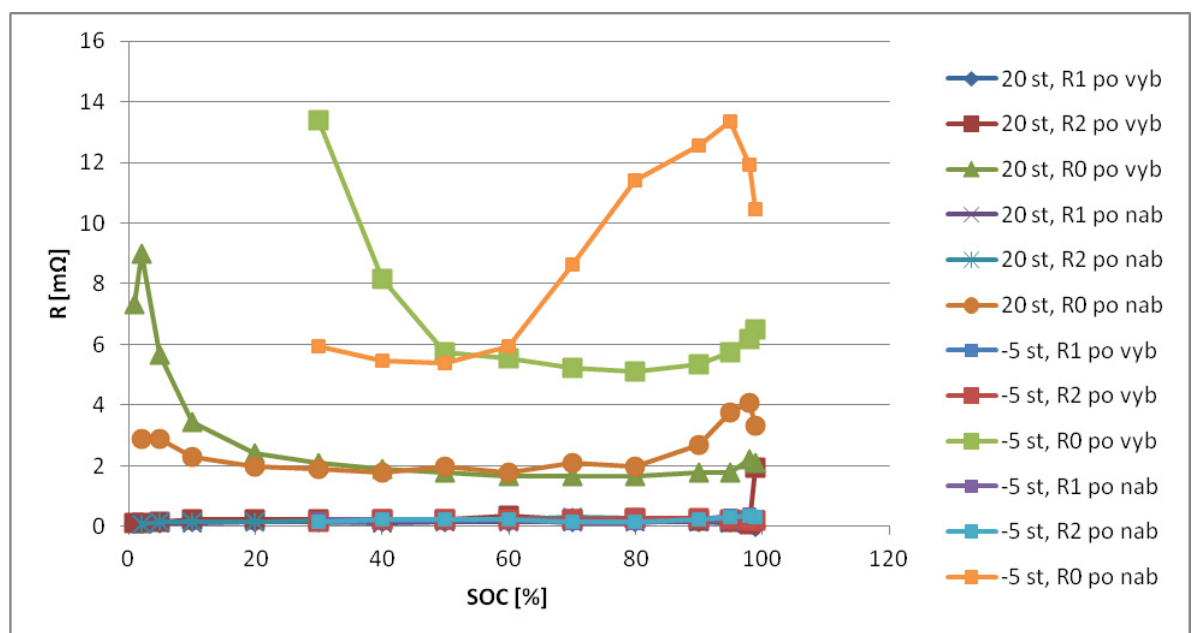
1) První měření Ri a OCV:

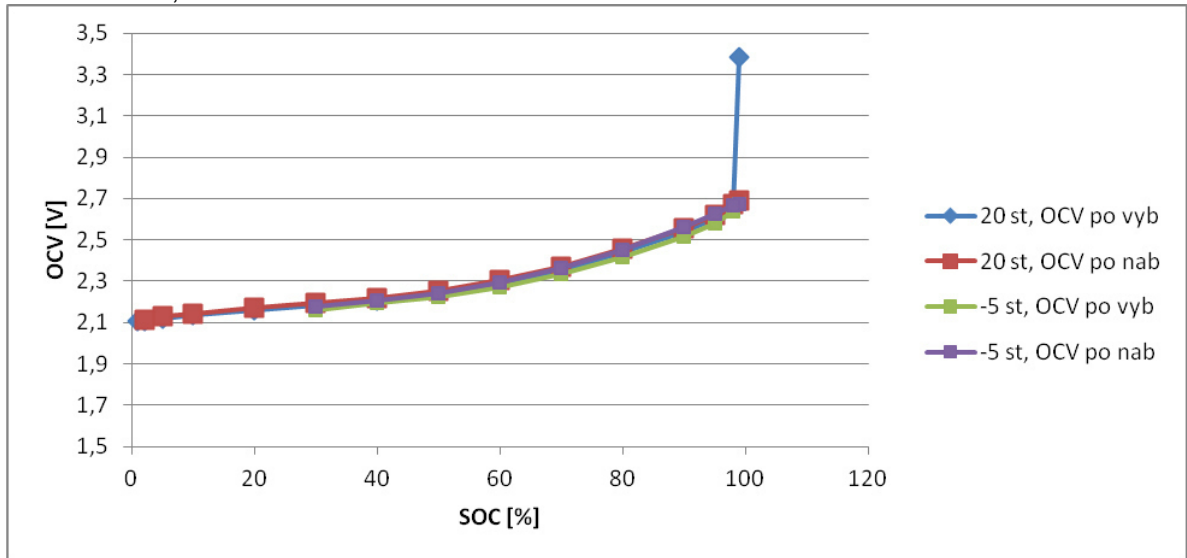
a) Teplota 20°C:

teplota=20°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (vyb) [V]	0,0726	0,0161	0,0124	0,0102	0,0104	0,0104	0,0107	0,0106	0,0108	0,0121	0,0141	0,0213	0,0356	0,062	0,0433
R1 (vyb) [mOhm]	0,0006	0,1332	0,1526	0,1521	0,1555	0,1394	0,1533	0,1483	0,1478	0,1487	0,1411	0,1467	0,1257	0,0952	0,0955
C1 (vyb) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
UC20 (vyb) [V]	0,7983	0,0067	0,0066	0,0057	0,0064	0,0068	0,0065	0,006	0,0063	0,007	0,0082	0,0114	0,0158	0,0245	0,0166
R2 (vyb) [mOhm]	1,9452	0,0892	0,1553	0,187	0,2527	0,2418	0,339	0,2467	0,2163	0,2409	0,2292	0,2231	0,1683	0,1148	0,1207
C2 (vyb) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
OCV (vyb) [V]	3,3864	2,6559	2,6002	2,5384	2,4387	2,3538	2,288	2,2406	2,2085	2,1834	2,1596	2,1336	2,1178	2,1067	2,1048
R0 (vyb) [mOhm]	2,0899	2,199	1,7764	1,7782	1,6736	1,6719	1,6736	1,7782	1,8828	2,0964	2,4059	3,4591	5,6485	8,9958	7,3222
teplota=20°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (nab) [V]	-0,0278	-0,0341	-0,05	-0,0249	-0,0152	-0,0127	-0,0114	-0,0111	-0,0109	-0,0105	-0,0099	-0,0113	-0,013	-0,0146	NaN
R1 (nab) [mOhm]	0,2151	0,2019	0,1325	0,1534	0,1538	0,156	0,1435	0,1422	0,1316	0,1397	0,1347	0,117	0,1221	0,1038	NaN
C1 (nab) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN
UC20 (nab) [V]	-0,0235	-0,0303	-0,0275	-0,0164	-0,009	-0,0075	-0,0064	-0,0059	-0,006	-0,006	-0,0063	-0,007	-0,0075	-0,007	NaN
R2 (nab) [mOhm]	0,248	0,2223	0,1821	0,227	0,2883	0,3053	0,2337	0,2154	0,2041	0,1903	0,1603	0,1462	0,1379	0,077	NaN
C2 (nab) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN
OCV (nab) [V]	2,689	2,6723	2,6213	2,5579	2,4581	2,372	2,3034	2,2541	2,2206	2,1946	2,1707	2,1445	2,1278	2,114	NaN
R0 (nab) [mOhm]	3,3088	4,0816	3,7698	2,6759	1,9841	2,0813	1,7857	1,9841	1,7839	1,8849	1,9802	2,2817	2,8798	2,8741	NaN

b) Teplota -5°C:

teplota=-5°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (vyb) [V]	0,0355	0,0247	0,0218	0,021	0,0214	0,0214	0,0225	0,0241	0,0288	0,0474	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R1 (vyb) [mOhm]	0,24	0,2202	0,2184	0,2228	0,2298	0,2133	0,2184	0,2044	0,199	0,1154	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C1 (vyb) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
UC20 (vyb) [V]	0,018	0,0201	0,0144	0,0135	0,013	0,0121	0,0118	0,0132	0,0151	0,0211	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R2 (vyb) [mOhm]	0,1767	0,1825	0,2375	0,2533	0,269	0,2251	0,2317	0,2134	0,2396	0,1523	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C2 (vyb) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
OCV (vyb) [V]	2,6732	2,6388	2,5804	2,5177	2,4171	2,3331	2,2698	2,2249	2,1921	2,1623	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R0 (vyb) [mOhm]	6,4921	6,1845	5,7592	5,3459	5,1255	5,2301	5,5497	5,7592	8,1675	13,4031	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
teplota=-5°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (nab) [V]	-0,0255	-0,0246	-0,0482	-0,0903	-0,1743	-0,0478	-0,0276	-0,0242	-0,0235	-0,0239	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R1 (nab) [mOhm]	0,3144	0,4057	0,3418	0,2406	0,1152	0,1151	0,2161	0,2404	0,2371	0,2138	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C1 (nab) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
UC20 (nab) [V]	-0,043	-0,0518	-0,0605	-0,0651	-0,0465	-0,0217	-0,0128	-0,0118	-0,0112	-0,0101	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R2 (nab) [mOhm]	0,3056	0,3387	0,3034	0,2314	0,1399	0,1356	0,2197	0,2417	0,2257	0,1521	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C2 (nab) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
OCV (nab) [V]	2,6714	2,6646	2,6252	2,564	2,4533	2,3616	2,2915	2,243	2,2073	2,1747	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R0 (nab) [mOhm]	10,4651	11,9403	13,3333	12,5506	11,4213	8,631	5,9524	5,3678	5,4509	5,9465	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN





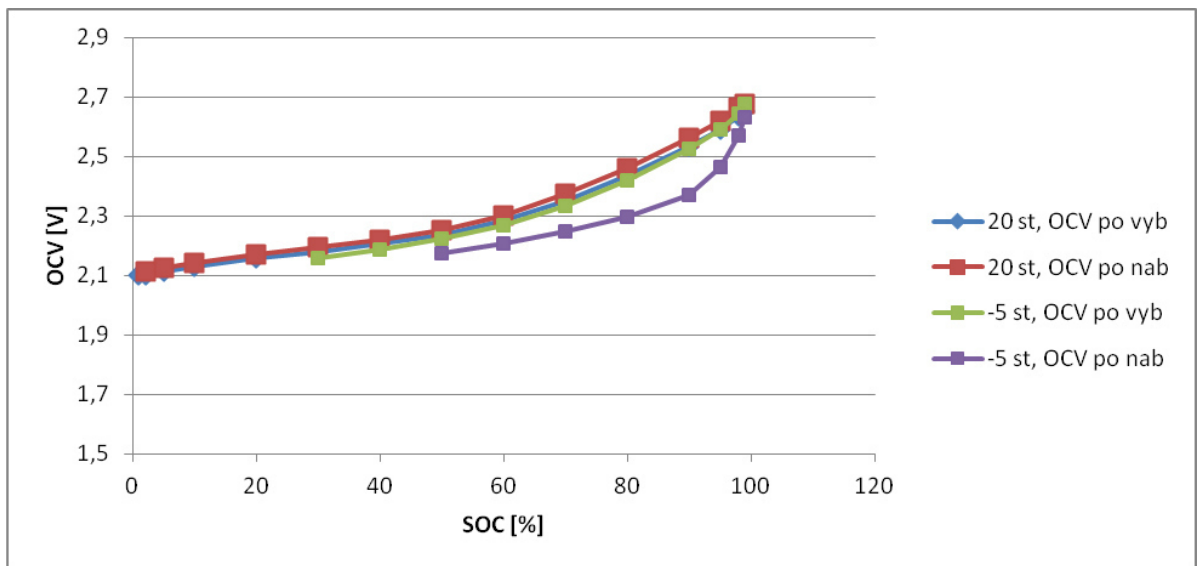
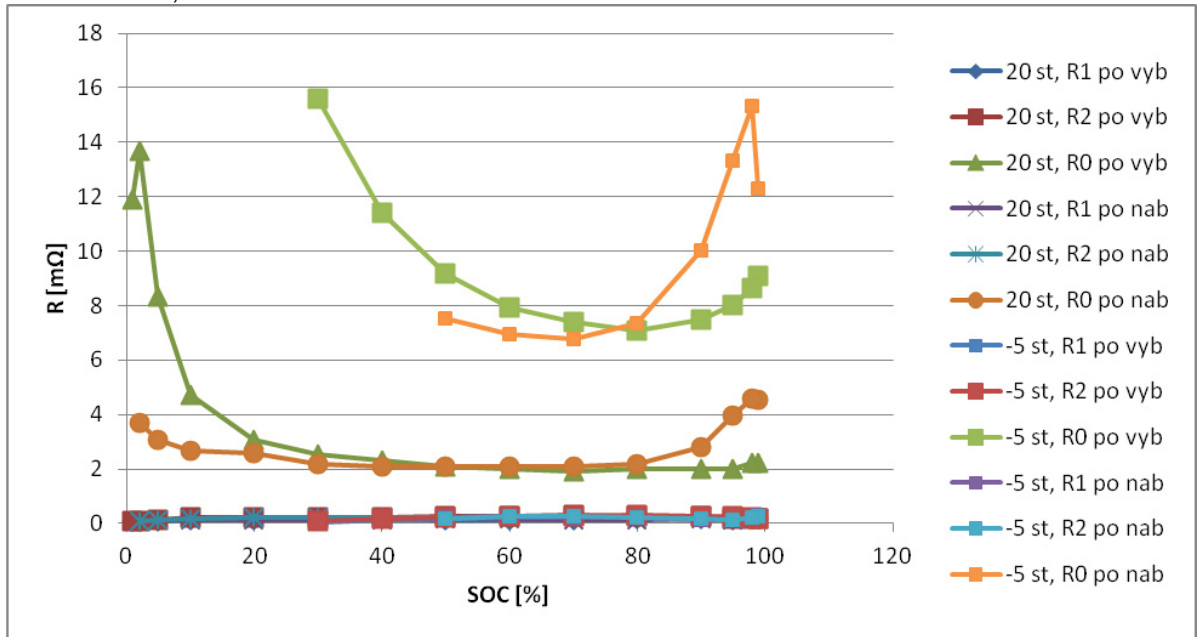
2) Druhé měření Ri a OCV:

a) Teplota 20°C:

teplota=20°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (vyb) [V]	0,0163	0,0144	0,0122	0,0114	0,0112	0,0112	0,0109	0,0112	0,0112	0,0125	0,0151	0,0251	0,0495	0,1033	0,0617
R1 (vyb) [mOhm]	0,1665	0,1676	0,1435	0,1526	0,1511	0,14	0,1434	0,1482	0,1506	0,1443	0,1454	0,1317	0,1033	0,0635	0,0695
C1 (vyb) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
UC20 (vyb) [V]	0,008	0,0074	0,0076	0,0072	0,0078	0,0081	0,0069	0,0066	0,0071	0,0079	0,0092	0,0134	0,0204	0,0376	0,022
R2 (vyb) [mOhm]	0,1697	0,1725	0,1924	0,2475	0,2513	0,2846	0,2531	0,263	0,228	0,2177	0,232	0,2038	0,1371	0,0864	0,0986
C2 (vyb) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
OCV (vyb) [V]	2,652	2,6342	2,5904	2,5344	2,4349	2,3501	2,2829	2,2368	2,205	2,1798	2,1563	2,1295	2,113	2,1012	2,1002
R0 (vyb) [mOhm]	2,2152	2,2152	2,0042	2,0042	2,0042	1,9007	2,0021	2,1075	2,3207	2,5316	3,0591	4,7368	8,3333	13,6986	11,9198
teplota=20°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (nab) [V]	-0,0354	-0,04	-0,0422	-0,0229	-0,0152	-0,0132	-0,012	-0,0112	-0,0112	-0,0111	-0,0111	-0,0115	-0,0139	-0,0164	NaN
R1 (nab) [mOhm]	0,1728	0,1699	0,1322	0,1548	0,147	0,1492	0,1509	0,151	0,1491	0,1463	0,1354	0,1231	0,1196	0,103	NaN
C1 (nab) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN
UC20 (nab) [V]	-0,0221	-0,0276	-0,0228	-0,0146	-0,0096	-0,008	-0,0074	-0,0068	-0,0067	-0,0069	-0,0073	-0,008	-0,009	-0,0086	NaN
R2 (nab) [mOhm]	0,198	0,1944	0,1812	0,2411	0,2615	0,2637	0,2673	0,2217	0,2344	0,2291	0,2078	0,1567	0,1361	0,0847	NaN
C2 (nab) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN
OCV (nab) [V]	2,6771	2,663	2,6197	2,561	2,4609	2,3731	2,3023	2,2524	2,2184	2,1924	2,1687	2,1425	2,1257	2,111	NaN
R0 (nab) [mOhm]	4,5238	4,5738	3,9761	2,7805	2,1847	2,0896	2,0813	2,0854	2,0854	2,1869	2,5845	2,6812	3,0754	3,6743	NaN

b) Teplota -5°C:

teplota=-5°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (vyb) [V]	0,0314	0,025	0,0246	0,0241	0,024	0,0239	0,025	0,0272	0,0349	0,0917	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R1 (vyb) [mOhm]	0,2307	0,2098	0,2242	0,2339	0,2358	0,2183	0,2129	0,1907	0,1478	0,0337	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C1 (vyb) [F]	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
UC20 (vyb) [V]	0,0252	0,0239	0,0199	0,0198	0,0199	0,0174	0,0157	0,0161	0,0182	0,0354	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R2 (vyb) [mOhm]	0,1753	0,209	0,2649	0,2749	0,2855	0,2588	0,2496	0,2188	0,1925	0,0803	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C2 (vyb) [F]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
OCV (vyb) [V]	2,6758	2,6446	2,5894	2,5257	2,42	2,3333	2,2677	2,2213	2,1873	2,1573	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R0 (vyb) [mOhm]	9,0813	8,6498	8,0253	7,4816	7,075	7,4074	7,9114	9,1772	11,4044	15,6118	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
teplota=-5°C	99	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2	1
UC10 (nab) [V]	NaN	NaN	-0,048	-0,0877	-0,1573	-0,0466	-0,0289	-0,0261	-0,0263	-0,0259	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R1 (nab) [mOhm]	NaN	NaN	0,3208	0,2284	0,1075	0,1255	0,2117	0,2355	0,2402	0,1993	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C1 (nab) [F]	NaN	NaN	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
UC20 (nab) [V]	NaN	NaN	-0,0526	-0,0539	-0,0432	-0,0236	-0,0171	-0,0157	-0,0139	-0,013	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R2 (nab) [mOhm]	NaN	NaN	0,2544	0,2082	0,1358	0,1568	0,2276	0,2454	0,2403	0,1501	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
C2 (nab) [F]	NaN	NaN	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
OCV (nab) [V]	NaN	NaN	2,6299	2,5719	2,4627	2,3691	2,2966	2,2456	2,2081	2,1743	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
R0 (nab) [mOhm]	NaN	NaN	12,2951	15,3226	13,307	10,0198	7,3413	6,7527	6,9583	7,5322	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



3) Test opotřebení:

	Inab a Ivyb [xC]	DOD [%]	U_nab [V]	I_end [xC]	t_vyb [°C]	t_nab [°C]	OP 0-1 [-]	OP 1-2 [-]	OP 2-3 [-]	OP 0-3 [-]	Cena opotřebení [Kč/kWh]	Počet cyklů za život [-]
test opotřebení 1	3	70	2,75	0,05	20	20	-0,000142	-0,000071	-0,000143	-0,000118	0	Inf
test opotřebení 2	1	70	2,75	0,05	20	20	-0,000071	0	-0,000143	-0,000071	0	Inf
test opotřebení 3	6	70	2,75	0,05	20	20	-0,000071	-0,000071	-0,000071	-0,000071	0	Inf
test opotřebení 4	3	70	2,75	0,05	20	20	-0,000071	0	-0,000071	-0,000048	0	Inf
test opotřebení 5	3	90	2,75	0,05	20	20	0	0	0	0	0	Inf
test opotřebení 6	3	70	2,75	0,05	20	20	-0,000055	0	-0,000071	-0,000043	0	Inf
test opotřebení 7	3	70	2,75	0,5	20	20	0	0,000071	0	0,000024	3,24	7500
test opotřebení 8	3	70	2,75	0,05	-5	-5	0	0,000071	-0,000071	0	0	Inf
test opotřebení 9	3	70	2,75	0,05	20	20	-0,000071	-0,000071	-0,000071	-0,000071	0	Inf

Příloha 2: Tabulky parametrů testování

1. Parametr „Konečný nabíjecí proud“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
Opotřebení + p. o. ²⁾	Nabíjení Test C	konstanta v daném stavu	-	0,5 A
Opotřebení	Nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Test opotřebení (main) → Testování (main)	tabulka
prvotní Opotřebení ²⁾	Nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	0,45 A
Opotřebení + p. o. ²⁾	Nabíjení normální (před testem C)	konstanta v daném stavu	-	0,5 A
OCV a Ri	Plně dobítí	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	0,6 A
OCV a Ri	Měření Ri po nab	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	0,6 A
OCV a Ri	Měření Ri po vyb	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	0,6 A
OCV a Ri	Nabíjení - změna SOC	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	0,6 A

2. Parametr „Hloubka vybíjení“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
Opotřebení	Vybíjení Test C	konstanta v daném stavu	-	150%
prvotní Opotřebení ²⁾	Vybíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	1%
OCV a Ri	Měření Ri po nab	ovladač ve front panelu (tabulka)	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	tabulka
OCV a Ri	Měření Ri po vyb	ovladač ve front panelu (tabulka)	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	tabulka
OCV a Ri	Vybíjení - změna SOC	ovladač ve front panelu (tabulka)	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	tabulka

3. Parametr „Proud nabíjení“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
prvotní Opotřebení ²⁾	Nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	
Opotřebení	Nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Test opotřebení (main) → Testování (main)	90 A
Opotřebení + p. o. ²⁾	Nabíjení Test C	výpočet v blokovém diagramu	-	0,5*Jmenovitá kapacita aku
Opotřebení + p. o. ²⁾	Nabíjení normální (před testem C)	výpočet v blokovém diagramu	-	0,5*Jmenovitá kapacita aku
OCV a Ri	Nabíjení - změna SOC	výpočet v blokovém diagramu	-	0,5*Jmenovitá kapacita aku
OCV a Ri	Plně dobítí	výpočet v blokovém diagramu	-	0,5*Jmenovitá kapacita aku
OCV a Ri	Měření Ri po vyb ³⁾	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	tabulka
OCV a Ri	Měření Ri po nab ³⁾	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	tabulka

4. Parametr „Proud vybíjení“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
prvotní Opotrebení ²⁾	Vybíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testovani (main)	90 A
Opotrebení	Vybíjení normální	ovladač ve front panelu	Test_opotrebeni (main) → Testovani (main)	tabulka
Opotrebení + p. o. ²⁾	Vybíjení Test C	výpočet v blokovém diagramu	-	0,5*Jmenovitá kapacita aku
OCV a Ri	Vybíjení - zmena SOC	výpočet v blokovém diagramu	-	0,5*Jmenovitá kapacita aku
OCV a Ri	Mereni Ri po vyb ³⁾	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testovani - mereni OCV a Ri (main)	tabulka
OCV a Ri	Mereni Ri po nab ³⁾	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testovani - mereni OCV a Ri (main)	tabulka

5. Parametr „Napětí nabíjení“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
OCV a Ri	Mereni Ri po vyb	vypočet v daném stavu z ovladače ⁶⁾	-	3,65 V + 0,1 V
OCV a Ri	Mereni Ri po nab	vypočet v daném stavu z ovladače ⁶⁾	-	3,65 V + 0,1 V
OCV a Ri	Nabíjení - zmena SOC	ovladač ve front panelu ⁶⁾	Komplexní test 1.0 → Testovani - mereni OCV a Ri (main)	3,65 V
OCV a Ri	Plne dobití	ovladač ve front panelu ⁶⁾	Komplexní test 1.0 → Testovani - mereni OCV a Ri (main)	3,65 V
prvotní Opotrebení ²⁾	Inicializace testování	ovladač ve front panelu ⁶⁾	Komplexní test 1.0 → Testovani (main)	3,7 V
Opotrebení	Inicializace testování	ovladač ve front panelu ⁶⁾	Komplexní test 1.0 → Test_opotrebeni (main) → Testovani (main)	tabulka
Opotrebení + p. o. ²⁾	Nabíjení normální	vypočet v daném stavu z ovladače ⁶⁾	-	tabulka + 0,15 V; 3,7 V + 0,15 V
Opotrebení + p. o. ²⁾	Nabíjení normální (před testem C)	vypočet v daném stavu z ovladače ⁶⁾	-	tabulka + 0,15 V; 3,7 V + 0,15 V
Opotrebení + p. o. ²⁾	Nabíjení Test C	vypočet v daném stavu z ovladače ⁶⁾	-	tabulka + 0,15 V; 3,7 V + 0,15 V
prvotní Opotrebení ²⁾	Nabíjení normální	ovladač ve front panelu ⁵⁾	Komplexní test 1.0 → Testovani (main)	3,7 V
Opotrebení	Nabíjení normální	ovladač ve front panelu ⁵⁾	Komplexní test 1.0 → Test_opotrebeni (main) → Testovani (main)	tabulka

6. Parametr „Napětí vybíjení“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
OCV a Ri	Mereni Ri po vyb	vypočet v daném stavu	-	2,8 V - 0,2 V
OCV a Ri	Mereni Ri po nab	vypočet v daném stavu	-	2,8 V - 0,2 V
OCV a Ri	Vybíjení - zmena SOC	vypočet v daném stavu	-	2,8 V - 0,2 V
Opotrebení + p. o. ²⁾	Vybíjení Test C	vypočet v daném stavu	-	tabulka - 0,1 V; 2,8 V - 0,1 V
Opotrebení + p. o. ²⁾	Vybíjení normální	vypočet v daném stavu	-	tabulka - 0,1 V; 2,8 V - 0,1 V

7. Parametr „Teplota při nabíjení“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
prvotní Opotřebení ²⁾	Prodleva vybíjení -> nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	20 °C
prvotní Opotřebení ²⁾	Nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	20 °C
Opotřebení	Prodleva vybíjení -> nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Test opotřebení (main) → Testování (main)	20 °C
Opotřebení	Nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Test opotřebení (main) → Testování (main)	20 °C
Opotřebení + p. o. ²⁾	Prodleva vybíjení -> nabíjení normální (před testem C)	konstanta v blokovém diagramu	-	20 °C
Opotřebení + p. o. ²⁾	Nabíjení normální (před testem C)	konstanta v blokovém diagramu	-	20 °C
Opotřebení + p. o. ²⁾	Prodleva vybíjení -> nabíjení test C	konstanta v blokovém diagramu	-	20 °C
Opotřebení + p. o. ²⁾	Nabíjení test C	konstanta v blokovém diagramu	-	20 °C
OCV a Ri	všechny stavy	ovladač ve front panelu (tabulka)	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	20 °C, 0 °C

8. Parametr „Teplota při vybíjení“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
prvotní Opotřebení ²⁾	Inicializace testování	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	20 °C
prvotní Opotřebení ²⁾	Vybíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	20 °C
Opotřebení	Inicializace testování	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Test opotřebení (main) → Testování (main)	20 °C
Opotřebení	Vybíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Test opotřebení (main) → Testování (main)	20 °C
Opotřebení + p. o. ²⁾	Prodleva nabíjení (před testem C) -> vybíjení test C	konstanta v blokovém diagramu	-	20 °C
Opotřebení + p. o. ²⁾	Vybíjení Test C	konstanta v blokovém diagramu	-	20 °C
OCV a Ri	všechny stavy	ovladač ve front panelu (tabulka)	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	20 °C, 0 °C

9. Parametr „Prodlevy“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
prvotní Opotřebení ²⁾	Prodleva vybíjení -> nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	5 s + čas změny teploty + 10 min na ustálení teploty
Opotřebení	Prodleva vybíjení -> nabíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Test opotřebení (main) → Testování (main)	5 s + čas změny teploty + 10 min na ustálení teploty
Opotřebení + p. o. ²⁾	Prodleva vybíjení -> nabíjení normální (před testem C)	konstanta v daném stavu	-	10 min
Opotřebení + p. o. ²⁾	Prodleva nabíjení (před testem C) -> vybíjení test C	konstanta v daném stavu	-	10 min
Opotřebení + p. o. ²⁾	Prodleva vybíjení -> nabíjení test C	konstanta v daném stavu	-	1 min
prvotní Opotřebení ²⁾	Prodleva nabíjení -> vybíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování (main)	5 s
Opotřebení	Prodleva nabíjení -> vybíjení normální	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Test opotřebení (main) → Testování (main)	5 s
OCV a Ri	Měření OCV po vyb	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	10 min.
OCV a Ri	Měření OCV po nab	ovladač ve front panelu	Komplexní test 1.0 → Testování - měření OCV a Ri (main)	10 min.

10. Parametr „Vzorkovací periody“

měření	stavy	způsob zadání	umístění ovladače ¹⁾	výchozí hodnoty ⁴⁾
Opotřebení + p. o. ²⁾	While smyčka pro vykreslování grafů	konstanta v blokovém diagramu	-	1 s
— —	Inicializace testování	— —	-	1 s
— —	Vybíjení normální	— —	-	1 s
— —	Prodleva vybíjení -> nabíjení normální	— —	-	1 s
— —	Nabíjení normální	— —	-	1 s
— —	Prodleva vybíjení -> nabíjení normální (před testem C)	— —	-	1 s
— —	Nabíjení normální (před testem C)	— —	-	1 s
— —	Prodleva nabíjení (před testem C) -> vybíjení test C	— —	-	1 s
— —	Vybíjení test C	— —	-	1 s
— —	Prodleva vybíjení -> nabíjení test C	— —	-	1 s
— —	Nabíjení test C	— —	-	1 s
— —	Prodleva nabíjení -> vybíjení normální	— —	-	1 s
OCV a Ri	Měření Ri po vyb., Měření Ri po nab	ovladač ve front panelu	Testování - měření OCV a Ri (main)	10 ms
OCV a Ri	Inicializace testování	konstanta v blokovém diagramu	-	100 ms, 1s ⁸⁾
OCV a Ri	Vybíjení - změna SOC, Nabíjení - změna SOC, Konec	konstanta v blokovém diagramu	-	100 ms, 1s ⁸⁾
OCV a Ri	Měření OCV po vyb., Měření OCV po nab	konstanta v blokovém diagramu	-	100 ms, 1s ⁸⁾

Vysvětlivky k tabulkám v příloze 2:

- 1) výčet subVI, kde lze daný parametr zadat. Šipka (→) značí, že kromě výskytu se hodnoty z vyšších VI přenáší do vnořených subVI
- 2) prvotní opotřebení(zkratka.: p.o.) je 1 metacyklus na začátku komplexního testu pro určení skutečné kapacity akumulátoru
- 3) v těchto stavech probíhá obvykle vybíjení i nabíjení, samozřejmě v závislosti na vstupních zadaných hodnotách
- 4) uvedené hodnoty jsou vždy z nejnižšího subVI v rámci komplexního testu, které lze ještě spustit samostatně
- 5) skutečný název ovladače: Napeti akumulátoru pri nabijeni (V)
- 6) skutečný název ovladače: Maximalni napeti akumulátoru (V)
- 7) skutečný název ovladače: Minimální napětí akumulátoru (V)
- 8) hodnota 100 ms je pro Měřící While smyčku, hodnota 1 s je pro Hlavní While smyčku

Příloha 3: Čelní panel Komplexního testu

Celkové nastavení

Před spuštěním nutno vyprázdnit adresáře:
- data/MereniR1
- data/MereniR2
- data/MereniOp

Zadejte, které části komplexního měření chcete provést

1) Spuštění 1. metacyklu, Měření Ri a OCV

2) Spuštění testu měření opotřebení

3) Spuštění vyhodnocení 1) a 2

Tlačítka - ovladání měření

Tlačítko: Spuštění měření

Nyní je měření spuštěno

Po zmáčknutí tohoto tlačítka:
- měření se nespustí
- tlačítko měření se přeručí (dobětné 3cyklus)

Tlačítko: Měření teploty Tlačítko: Pustění lazne

Neměřit teploty (rychlé se měří) Nepoužívat lazne (rychlé se zapoutá)

Odhad konce Komplexního testu Startovací index pro .txt

19:41:30,211 121
6.5.2015

Průběh testování, HOTOVO:

prvotní metacyklus pro určení SOH

● **Měření Ri,OCV 1** Opotřebení:

● **Měření opotřebení** Počet dílčích testů opotřebení:

● **Měření Ri,OCV 2** Počet metacyklů:

● **Vyhodnocení** Počet cyklů:

Společné nastavení testování

Parametry dane výrobce

Minimální napeti akumulatoru (V)

Minimální napeti 1 clanku (V)

Jmenovita kapacita akumulatoru (Ah)

Maximální napeti akumulatoru (V)

Jmenovite napeti akumulatoru (V)

Parametry celeh testovani

Aku/skap?

Poc Aku

Oznaceni akumulatoru (v nazvu souboru)

Cislo akumulatoru (v nazvu souboru)

Prvotni metacyklus

Parametry prvotniho metacyklu

Proud vybijeni (A)

Proud nabijeni (A)

Hloubka vybijeni (%)

Napeti akumulatoru pri nabijeni (V)

Konecny nabijeci proud (A)

Teplota pri dilcim vybijeni

Teplota pri dilcim nabijeni

Pocet normalnich cyklu v prvotnim metacyklu

Měření Ri, OCV

Nastavení měření Ri

Konecny nabijeci proud (A)

Doba trvani OCV [min] (3h = 180min)

Parametry: teploty, SOC

Provedene SOC [%]

Provedene teploty

Vyb.-nab. proudy [xC]

Kombinace merenych parametru					
I nab [xIC]	Unab [V]	t,vyb [C]	I nab [xIC]	t,nab [C]	
3	70	2.75	0.05	20	20
1	70	2.75	0.05	20	20
6	70	2.75	0.05	20	20
3	70	2.75	0.05	20	20
3	90	2.75	0.05	20	20
3	70	2.75	0.05	20	20
3	70	2.75	0.5	20	20
3	70	2.75	0.05	-5	-5
3	70	2.75	0.05	20	20
0	0	0	0	0	0

Měření Opotřebení

Pocet cyklu

Pocet normalnich cyklu

Pocet metacyklu (norm. + 1x test C)

Pro pokrocile uzivatele(cluster)

Prodleva mezi vybijenim a nabijenim (s)

Prodleva mezi nabijenim a vybijenim (s)

OCV (A)

OVP baterie (V)

Pro pripad preruzeni zde lze pro opetovne spusteni omezit pocet nastavenych cyklu

zacatek od cyklu

zacatek od metacyklu

zacatek od dilcicho testu opotrebeni

tyto hodnoty lze nastavit v rozmezích:
zacatek od cyklu: (0 až (Pocet cyklu - 1))
zacatek od metacyklu: (0 až (Pocet metacyklu - 1))
viz "Parametrech testovani": Pocet cyklu, Pocet metacyklu

Příloha 4: Čelní panel testu opotřebení

Tlačítko: Konec

neukončit
(nyní se ve stavu konec UKONCI)

Nastavené parametry dle výrobce

Nastavení	Winston	LINCell	Wima (SC)	Ult (SC)
Umin	2.8	3	1.25	2.2
Kapacita	40.90.160	3:	0.208	1.467
Umax	3.7 (4.0)	4:	2.4 (2.5)	3.7 (3.8)
Un	3.2	3:	1.875	3
ImaxDis	3C	33C	400A	200A
ImaxCh	3C	13C	400A	200A

Kombinace meněných parametrů

lnab a Iyvb [kC]	Unab [V]	t_vyb [°C]
DOD [%]	L_end [xC]	t_nab [°C]

Pro pokročile uživatele (cluster)

Prodleva mezi vybitím a nabíjením (s)

Prodleva mezi nabíjením a vybitím (s)

OCP (A)

OVP baterie (V)

Pro případ prerušení zde lze pro opetovné zpuštění omezit počet nastavených cyklů

zacek od metacyklu

zacek od metacyklu

zacek od dlicho testu opotrebeni

Tyto hodnoty lze nastavit v rozmezích:

zacek od cyklu: (0 až (Počet cyklu - 1))

zacek od metacyklu: (0 až (Počet metacyklu - 1))

zacek dlicho testu opotrebeni: (0 až (Počet testu opotrebeni - 1))

viz "Parametrech testovani": Počet cyklu, Počet metacyklu pozn.: test opotrebeni=1 radek kombinace parametru v rámci testovani celkem 11 testu opotrebeni

Tlačítka - ovládání měření

Tlačítko: Spuštění měření

Nyní je měření spuštěno

Po zmáčknutí tohoto tlačítka:

- měření se nezpustí
- běžící měření se přeručí (doběhne 1cyklus)

Tlačítko: Měření teploty Tlačítko: Pustění lazně

Merit teplotu (nyní se nemerí) Pouziti lazni (nyní je vypnuta)

Nastavení parametru dlicich cyklu opotrebeni je stanoveno konstantou v blokovem diagramu

cas konce: 17:24:51.273 Soucasny stav: 11.4.2015 inicializace testovani

Pocitadlo dlicich testu opotrebeni: 2 Pocitadlo metacyklu: 0 Pocitadlo cyklu: 0

napieti akumulatoru (V): 3.546 Prubeh napieti

proud akumulatoru (A): -0.0464 Pibeh proudu

teplota lazne (°C): 21.82 teplota akumulatoru (°C): 23.52 Prubeh teploty pouzdra aku

Parametry dane vyrobcem

Minimalni napieti akumulatoru (V): 2.8 2.2

Minimalni napieti 1 clanku (V): 2.8

Jmenovita kapacita akumulatoru (Ah): 90

Jmenovite napieti akumulatoru (V): 3.2

Parametry testovani dlicic/cele - pocet cyklu: 5

Pocet metacyklu (cykly + 1x test kapacity): 3

Parametry celeho testovani (cluster)

Aku/skap? Akumulator

Poc Aku: 1

Oznaceni akumulatoru (v nazvu souboru): LF

Cislo akumulatoru (v nazvu souboru): 1

Startovaci index pro .txt: 1504 index pro pristi txt: 1546

Testy opotrebeni

1	50	3.7	0.01	20	20	0
0.5	50	3.7	0.01	20	20	0
2	50	3.7	0.01	20	20	0
1	20	3.7	0.01	20	20	0
1	80	3.7	0.01	20	20	0
1	50	3.5	0.01	20	20	0
1	50	3.7	0.1	20	20	0
1	50	3.7	0.01	0	0	0
1	50	3.7	0.01	20	20	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

napieti (V)

Prubeh napieti

Vzorek mereni

202

Proud (A)

Pibeh proudu

Vzorek mereni

202

Teplota (°C)

Prubeh teploty v lazni

Vzorek mereni

202