



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Diplomová práce

Systém pro testování akumulátorů s vysokou kapacitou

Bc. Lukáš Dastych

**Kybernetika a robotika - Kybernetika a robotika
dastyluk@fel.cvut.cz**

Květen 2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dastych** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **406317**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Systém pro testování akumulátorů s vysokou kapacitou

Název diplomové práce anglicky:

System for High Capacity Battery Testing

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rozbor metod pro zjišťování stavu akumulátorů s kapacitami v řádu desítek až stovek Ah. Navrhněte a realizujte tester pro Pb a LiFePO₄ akumulátory s kapacitou 1 až 100 Ah. Dále navrhněte komplexní systém pro zálohování napájení časových a frekvenčních etalonů a dalších přístrojů v Laboratoři přesného času a frekvence FEL ČVUT. Navržený tester použijte pro kontinuální monitoring stavu zálohovacích akumulátorů. Vypracujte metodiku pro zajištění optimálního provozu těchto akumulátorů s ohledem na dosažení vysoké spolehlivosti zálohovacího systému a maximální životnosti použitých akumulátorů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Schweiger, H. G. - Obeidi, O. - Komesker, O.: Raschke, A. - Schiemann, M. - Zehner, C. - Gehnen, M. - Keller, M. and Birke, P.: Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells. Sensors 2010, 10, pp. 5604-5625.
[2] Capacity Testing of VRLA Batteries. Technical Bulletin 41-7135. C&D Technologies, 2012.
http://www.cdtechno.com/pdf/ref/41_7135_0412.pdf.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc., katedra měření FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **22.01.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2018/2019

doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Jaroslavovi Roztočilovi, CSc., za podnětné rady, ochotu a čas strávený při řešení problémů vzniklých v jejím průběhu. Dále bych chtěl poděkovat pánům Ing. V. Vignero-
vi, Ph.D., prof. Ing. V. Papeži, CSc. a Ing. T. Reichlovi za podnětné rady a konzultace. V neposlední řadě také celé své rodině za podporu během zpracování této závěrečné práce, ale především během celého studia.

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

V Praze dne 25. 5. 2018

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce se zaměřuje na návrh systému pro zálohování napájení etalonů času a frekvence a dalších přístrojů v Laboratoři přesného času a frekvence na FEL ČVUT. Velkou část této práce tvoří návrh a realizace zařízení pro testování stavu akumulátorů, který úzce souvisí s navrhovaným systémem zálohovaného napájení. Pomocí tohoto zařízení byly provedeny různé testy na olověných akumulátorech pro ověření teoretických předpokladů a správnosti návrhu. Poslední část práce se zabývá metodikou provozu akumulátorů v systému zálohovaného napájení pro zajištění maximální životnosti použitých akumulátorů a zároveň vysoké spolehlivosti zálohovacího systému.

Klíčová slova: akumulátory, baterie, metody zjišťování stavu akumulátorů, tester akumulátorů; optimální provoz akumulátorů, vysoká životnost; systém pro zálohování napájení.

This work focuses on the design of a system for power backup of time and frequency standards and other devices in the Laboratory of Precise Time and Frequency at FEL CTU. A big part of this work consists of the design and implementation of equipment for testing the battery state which is closely related to the proposed system of power backup. With this device, I have carried out various tests on lead acid accumulators to verify the theoretical assumptions and correctness of design. The last part of the work deals with the methodology of battery operation in the power backup system to ensure the maximum life of the used batteries and the high reliability of the backup system.

Keywords: accumulators, battery, battery condition detection methods, battery tester; optimal battery operation, long service life; system for power backup.

Title translation: System for High Capacity Battery Testing

Obsah /

1 Úvod	1
2 Rozbor zadání	2
2.1 Účel návrhu systému zálohovaného napájení	2
2.1.1 Zálohování pomocí jednotky UPS	3
2.1.2 Zálohování pomocí externího bateriového systému	5
2.2 Typy akumulátorů pro systémy zálohovaného napájení	7
2.2.1 Olověný akumulátor	8
2.2.2 Nikl-kadmiový akumulátor	10
2.2.3 Lithium-Iontový akumulátor	12
2.2.4 Lithium-železo-fosfátový akumulátor	14
2.2.5 HE3DA akumulátor	16
2.2.6 Srovnání uvažovaných typů akumulátorů	17
2.3 Návrh systému pro zálohování napájení	21
3 Metody zjišťování stavu akumulátorů	31
3.1 Parametry akumulátorů	31
3.2 Metody testování parametrů akumulátorů	38
3.2.1 Odhad SoC pomocí svorkového napětí	41
3.2.2 Měření vnitřního odporu	42
3.2.3 Elektrochemická dynamická odezva	44
3.2.4 Měření kapacity vybíjecí metodou	45
3.2.5 Metoda monitorování náboje	46
4 Návrh testeru akumulátorů	48
4.1 Hardwarová část testeru akumulátorů	48
4.2 Softwarová část testeru akumulátorů	52
4.2.1 Hlavní okno aplikace	53
4.2.2 Rychlý test	57
4.2.3 Test vybíjením	60
4.2.4 Coulomb counting test ..	62
4.2.5 Akceptační test	65
5 Provedené testy akumulátorů ..	68
5.1 Zjištění kapacity baterie vybitím	68
5.2 Zjištění efektivity nabíjení	68
5.3 Dobití Pb baterie	69
5.4 Průběhy napětí při rychlém testu	70
5.5 Závislost svorkového napětí naprázdno na SoC	71
5.6 Závislost svorkového napětí naprázdno na zatěžovacím proudu	71
5.7 Odhad SoC v závislosti na dostupné kapacitě	71
5.8 Závislost vnitřního odporu na SoC	72
5.9 Závislost vnitřního odporu na zatěžovacím proudu	72
5.10 Porovnání měření vnitřního odporu při zatížení a zotavení	72
5.11 Závislost odezvy při zatížení a zotavení na SoC	73
5.12 Závislost odezvy při zatížení a zotavení na zatěžovacím proudu a délce zatěžování	73

6 Metodika optimálního provozu	
akumulátorů	75
7 Závěr	80
Literatura	82
A Zkratky použité v této práci	89
B Grafy provedených testů aku- mulátorů	91
C Obsah elektronické přílohy (CD) .	98

Tabulky / Obrázky

2.1. Napájecí požadavky etalonu frekvence Microsemi 5071A3	2.1. Cesiový etalon frekvence Microsemi 5071A2
2.2. Porovnání parametrů jednotlivých zkoumaných typů akumulátorů 20	2.2. Schematické připojení jednotky UPS4
2.3. Cenová kalkulace nákladů na pořízení systému pro zálohování napájení 28	2.3. Schematické připojení externího bateriového systému5
2.4. Porovnání nákladů na pořízení jednotlivých částí systému pro zálohování napájení 28	2.4. Vnitřní uspořádání VRLA olověného akumulátoru8
4.1. Rozlišení a přesnost měření napětí a proudu el. zátěží <i>Axiomet AX-EL600W</i> 51	2.5. Jednotlivé články a sestavené baterie NiCd 10
4.2. Přesnost měření napětí digitizerem <i>Agilent L4534A</i> 51	2.6. Baterie složená z článků Li-Ion 12
6.1. Pokles kapacity v závislosti na teplotě a stavu nabití Li-Ion akumulátoru 77	2.7. Jednotlivé články typu LiFePO4 15
6.2. Průměrný počet cyklů Pb startovací a trakční baterie a LiFePO4 akumulátorů 77	2.8. Prototyp akumulátoru HE3DA 16
	2.9. Vybrané vhodné akumulátory LiFePO4 a baterie Pb 24
	2.10. Vybrané vhodné nabíječe baterií Pb a LiFePO4 25
	2.11. Vybrané vhodné SBM a balancing moduly pro LiFePO4 akumulátory 26
	2.12. Vybraný vhodný detektor výpadku napájení a měnič 27
	2.13. Schematické zapojení kompletního systému pro zálohování napájení 30
	3.1. Náhradní elektrické schéma akumulátoru 32
	3.2. Závislost kapacity Pb baterie na pracovní teplotě 33
	3.3. Závislost kapacity a životnosti Li-Ion akumulátoru na hodnotě napětí pro ukončení nabíjení 34
	3.4. Nabíjecí charakteristiky Pb baterie Leaftron LTX12-5.4 34

3.5.	Vybíjecí charakteristiky Pb baterie Leaftron LTX12-5.4....	35
3.6.	Závislost životnosti Pb bate- rie na hloubce vybití (DoD) ...	35
3.7.	Závislost vnitřního odporu Pb baterie na hloubce vybití (DoD).....	36
3.8.	Závislost kapacity Pb baterie na délce uskladnění a okolní teplotě – samovybití	36
3.9.	Grafická ilustrace pojmů ka- pacita, SoC a CCA.....	40
3.10.	Závislost svorkového napětí naprázdno na stavu nabití Pb akumulátoru	41
3.11.	Vybíjecí charakteristiky růz- ných LiFePO4 akumulátorů ...	42
3.12.	Princip měření vnitřního od- poru akumulátorů.....	44
3.13.	Princip vyhodnocení odezvy u EDR metody	44
4.1.	Schematické znázornění tes- teru akumulátorů	49
4.2.	Elektronická zátěž Axiomet AX-EL600W.....	50
4.3.	Digitizer Agilent L4534A	51
4.4.	Fotografie testeru akumulá- torů	53
4.5.	Hlavní obrazovka aplikace testeru	54
4.6.	Zobrazení načteného profilu akumulátoru v aplikaci tes- teru	55
4.7.	Panel nastavení přístrojů aplikace testeru.....	56
4.8.	Okno pro přechod k „rych- lému testu“ s popisem testu	

	a požadovanými připojenými měřicími přístroji.....	56
4.9.	Panel „rychlého testu“ po dokončení testu se zobrazenými výsledky	57
4.10.	Panel „testu vybíjením“ po dokončení testu se zobrazenými výsledky	61
4.11.	Panel „coulomb counting“ testu po dokončení testu se zobrazenými výsledky	64
4.12.	Ukázka panelu „akceptačního testu“	66
6.1.	Závislost životnosti Pb akumulátorů na teplotě	76
6.2.	Závislost počtu cyklů Li-Ion akumulátoru na rozsahu SoC ..	77
6.3.	Životnost Li-Ion akumulátoru v závislosti na vybíjecím proudu	78
B.1.	Vybití Pb baterie pro zjištění dostupné kapacity	91
B.2.	Vybití a nabití Pb baterie pro zjištění účinnosti nabíjení	91
B.3.	Dobití Pb baterie 7,2 Ah – průběhy nabíjení	92
B.4.	Dobití Pb baterie 44 Ah – průběhy nabíjení	92
B.5.	Průběhy napětí při rychlém testu v závislosti na SoC	93
B.6.	Průběhy napětí při rychlém testu v závislosti na zatěžovacím proudu	93
B.7.	Průběhy napětí při rychlém testu v závislosti na délce zatěžování	93
B.8.	Závislost svorkového napětí naprázdno na SoC	94

B.9.	Závislost svorkového napětí naprázdno na zatěžovacím proudu	94
B.10.	Odhad SoC v závislosti na dostupné kapacitě	94
B.11.	Závislost vnitřního odporu na SoC	95
B.12.	Závislost vnitřního odporu na zatěžovacím proudu	95
B.13.	Porovnání měření vnitřního odporu při zatížení a zotavení .	95
B.14.	Závislost odezvy při zatížení a zotavení na SoC	96
B.15.	Závislost odezvy při zatížení na zatěžovacím proudu	96
B.16.	Závislost odezvy při zotavení na zatěžovacím proudu	96
B.17.	Závislost odezvy při zatížení na délce zatěžování	97
B.18.	Závislost odezvy při zotavení na délce zatěžování	97

Kapitola 1

Úvod

Cílem této diplomové práce je navrhnout systém pro zálohování napájení přesných laboratorních přístrojů a etalonů času a frekvence v Laboratoři přesného času a frekvence na FEL ČVUT, se kterým úzce souvisí testovací systém pro akumulátory typu Pb a LiFePO₄ 2.2.

Jelikož navrhovaný systém bude sloužit pro zálohované napájení přesných laboratorních přístrojů citlivých na výpadky napájení, je nutné, aby byl co možná nejspolehlivější a dokázal napájet všechna připojená zařízení po dobu několika hodin. Tyto dva parametry se odvíjí od typu použitých akumulátorů, jejich kapacitě a v neposlední řadě také jejich údržbě. Všechny tyto otázky budou podrobněji rozebrány dále v této práci.

Aby akumulátory použité v tomto systému vykazovaly vysokou spolehlivost a životnost, je nutné se o ně správně starat. A to je další úkol této práce – navrhnout vhodné podmínky pro používání různých typů akumulátorů, dále pak vhodné metody testování jejich parametrů a metodiku jejich údržby.

Velkou částí této práce je návrh a realizace již zmíněného testovacího systému pro akumulátory. Tento systém bude schopen pomocí různých vybraných metod pro testování parametrů akumulátorů zjistit stav předloženého akumulátoru. Testovaný akumulátor může být typu Pb nebo LiFePO₄, může mít různý počet článků (například sériově spojené 3 olověné baterie o nominálním napětí 12 V). Tyto akumulátory mohou být testovány jako volné (nepřipojené v žádném systému), nebo mohou být monitorovány připojené v zařízení. Jelikož bude testovací systém akumulátorů využíván jako laboratorní, bude jeho návrh uzpůsoben tak, aby ho bylo možné kdykoli jednoduše upravit nebo rozšířit o další funkce. Pomocí takto realizovaného testovacího systému akumulátorů bude ověřena vhodnost zvolených metod testování parametrů akumulátorů. Výsledný testovací systém bude použit pro kontinuální monitoring stavu akumulátorů v zálohovacím systému.

Tato práce by měla dát přehled jaké typy akumulátorů je vhodné v zálohovacích systémech používat, jaký způsob provozu a údržby je pro ně nejvhodnější a na co si dát pozor při jejich dlouhodobém provozování v zálohovacích systémech. Tento přehled a realizovaný testovací systém akumulátorů bude sloužit pro následné vytvoření a provoz systému zálohovaného napájení v Laboratoři přesného času a frekvence FEL ČVUT.

Kapitola 2

Rozbor zadání

V této kapitole budou postupně rozebrány jednotlivé části zadání, jako například návrh zálohovacího systému napájení a výběr vhodných typů akumulátorů pro tento systém. Dále pak metody pro testování parametrů akumulátorů a zjišťování jejich stavu.

2.1 Účel návrhu systému zálohovaného napájení

Navrhovaný systém zálohovaného napájení bude určen jako záložní (sekundární) zdroj napájení při výpadku hlavního (primárního) zdroje napájení, kterým je klasická elektrická rozvodná síť 230 V. Na tento záložní zdroj budou připojeny různé laboratorní přístroje v Laboratoři přesného času a frekvence. Bude se jednat především o etalony času a frekvence.



Obrázek 2.1. Cesiový etalon frekvence *Microsemi 5071A* (Zdroj: [1])

Hlavním etalonem, který vyžaduje zálohované napájení, je cesiový etalon frekvence od společnosti *Microsemi* typu *5071A* [2] uvedený na obr. 2.1). Jeho frekvenční přesnost je až $5 \cdot 10^{-13}$ a dlouhodobá stabilita lepší než $1 \cdot 10^{-14}$. Umožňuje automatickou synchronizaci pomocí signálu 1 PPS, který je možné získat například z GPS přijímače. Pokud k etalonu tento signál připojíme, získáme velice přesný etalon času. Vzdálená komunikace s tímto etalonem je možná pomocí rozhraní RS-232 a standardních příkazů pro programovatelné přístroje (SCPI). Tento etalon je také vybaven olověnými (Pb) akumulátory, které jsou schopné v případě výpadku primárního zdroje napájení etalon

napájet po dobu až 45 minut. Jelikož doba 45 minut je nedostatečná pro účely, pro které bude etalon sloužit, můžeme využít možnost externího stejnosměrného napájení, kterým tento etalon také disponuje.

Uváděný čas 45 minut provozu z akumulátorů pomocí vestavěného zálohovacího systému napájení je pouze ideální. Tento čas se samozřejmě bude se stářím vnitřních akumulátorů ještě zkracovat. Z důvodu požadavku na nepřetržitý provoz etalonu a možnosti dlouhodobějšího výpadku napájecí sítě, který je brán v úvahu i řádově několik hodin, je nezbytné doplnit nebo nahradit vnitřní bateriový záložní systém externím bateriovým záložním zdrojem napájení.

Pro návrh externího bateriového záložního zdroje napájení je nutné znát napájecí požadavky tohoto přístroje. Tyto parametry jsou uvedeny v tab. 2.1. Jedná se o výtah pouze nejdůležitějších parametrů potřebných pro následný návrh. Nejdůležitějším parametrem je možný rozsah napájecího napětí (DC) externě připojeného stejnosměrného zdroje napájení. Ten nám bude sloužit pro návrh počtu akumulátorů zapojených v sérii, které budou tvořit napájecí baterii. Dále pak uvedené hodnoty příkonu zařízení při DC napájení jsou nutné pro správný návrh kapacity akumulátorů použitých v napájecí baterii. Podrobnější informace k návrhu viz kapitola 2.3.

	AC napájení	DC napájení
napětí	220 – 240 VAC $\pm 10\%$	22 – 42 VDC
frekvence	45 – 66 Hz	DC
příkon (provozní)	50 – 58 W	45 – 50 W
příkon (Warm-up)	100 W	85 W

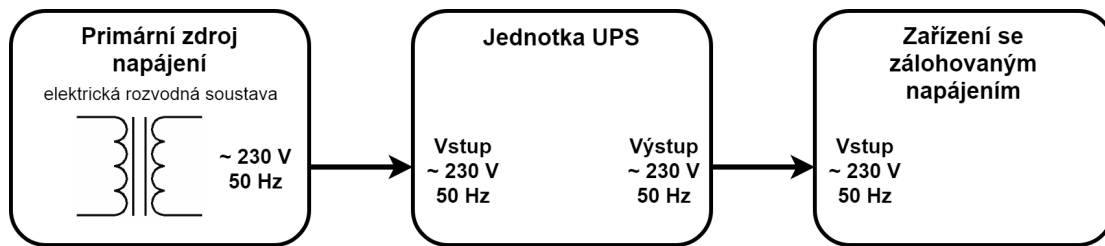
Tabulka 2.1. Napájecí požadavky etalonu frekvence *Microsemi 5071A* (Zdroj: [2])

Zálohování napájení je možné v zásadě dvěma způsoby:

- jednotka UPS (AC),
- externí bateriový zálohovací systém (DC).

■ 2.1.1 Zálohování pomocí jednotky UPS

Prvním způsobem je použití jednotky UPS (Uninterruptible Power Supply), což je zařízení, zajišťující nepřetržité napájení pro zařízení, která nesmějí být neočekávaně vypnuta. Jednotka UPS je zapojena mezi primárním zdrojem napájení (230 V) a vstupem síťového napájení zálohovaného zařízení. Schematické zapojení je znázorněno na obr. 2.2.



Obrázek 2.2. Schematické připojení jednotky UPS

Jednotka UPS obsahuje akumulátor(y), řídicí a výkonovou elektroniku. V normálním režimu (nepřerušená dodávka elektrické energie z primárního zdroje napájení) zajišťuje napájení zálohovaného zařízení a udržuje akumulátor(y) v nabitém stavu. Pokud dojde k přerušení dodávky elektrické energie z primárního zdroje napájení, ať už z důvodu odpojení obsluhou nebo výpadkem od dodavatele, elektronika tento stav okamžitě vyhodnotí a přepne zdroj energie dodávané na výstup z primárního na bateriový. Velikost ani charakter výstupního napětí se nemění, protože stejnosměrné napětí akumulátoru(ů) je pomocí zvyšujícího měniče a střídače změněno na střídavé napětí o sinusovém průběhu a efektivní hodnotě 230 V. Napájení zálohovaného zařízení jednotka UPS zajišťuje až do okamžiku vybití vnitřního akumulátoru(ů), nebo do obnovení dodávky elektrické energie primárním zdrojem napájení. Maximální doba, po kterou je jednotka UPS schopna napájet zálohované zařízení z vnitřního akumulátoru(ů), závisí především na kapacitě vnitřního akumulátoru(ů) a odběru (příkonu) zálohovaného zařízení. Tato doba se pohybuje v řádech minut až hodin. [3]

Některé jednotky UPS zároveň obsahují ochrany proti různým problémům elektrické rozvodné sítě. Těmito problémy mohou být:

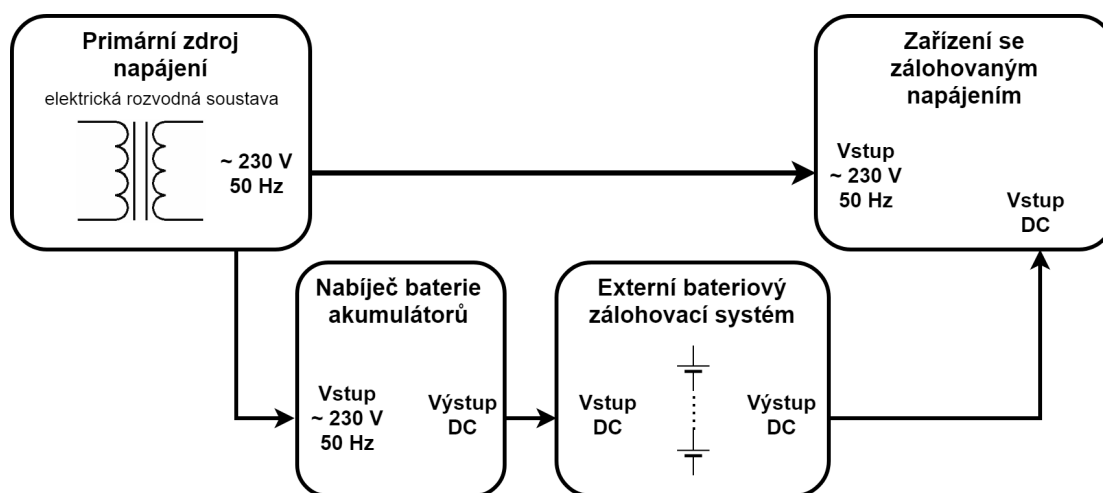
- ztráta napájení (blackout),
- krátkodobý pokles napětí,
- napěťová špička,
- dlouhodobé podpětí (brownout),
- dlouhodobé přepětí,
- rušení v síti (šum),
- změna frekvence,
- napěťové rázy,
- harmonické zkreslení.

Z těchto informací se může zdát, že jednotka UPS je ideální řešení problému zálohovaného napájení libovolných zařízení se síťovým napájením, ale jsou tu i určité nevýhody. Jednou z nich je zcela jistě relativně vysoká cena, neznámé vnitřní zapojení a princip udržování akumulátoru(ů) v kondici. Významnou nevýhodou při použití pro zálohované napájení zařízení, které umožňuje i napájení stejnosměrným napětím, je účinnost. Protože stejnosměrné napětí vnitřního akumulátoru(ů) je ztrátově převedeno

na napětí střídavé s vyšší hodnotou, kterým je napájeno zálohované zařízení, které uvnitř toto napětí převádí ztrátově zpět na stejnosměrné napětí s nižší hodnotou. Tímto dochází k významným ztrátám energie, které vedou ke zkrácení možné doby provozu zálohovaného zařízení energií z akumulátoru(ů).

2.1.2 Zálohování pomocí externího bateriového systému

Druhým způsobem zajištění zálohovaného napájení je použití externího bateriového zálohovacího systému. Tento systém je napájen z primárního zdroje a na jeho výstupu je stejnosměrné napětí, kterým je možné napájet zálohované zařízení. Z čehož vyplývá, že zálohovaným zařízením může být pouze takové zařízení, které je možné napájet stejnosměrným napětím. Principiální zapojení takového systému je znázorněno na obr. 2.3. Zálohované zařízení je standardně napájeno z primárního zdroje. Pokud dojde k přerušení dodávky energie z tohoto zdroje, je zálohované zařízení napájeno z externího bateriového systému. Za normálního stavu je bateriový systém udržován v nabitém stavu pomocí nabíječe baterie akumulátorů, který je napájen z primárního zdroje.



Obrázek 2.3. Schematické připojení externího bateriového zálohovacího systému

V zásadě se jedná o jednoduchý systém, který se skládá ze dvou základních částí: baterie akumulátorů a nabíječe baterie akumulátorů. K těmto základním částem mohou být doplněny různé další, jako například systém kontroly stavu akumulátorů, balancer, nebo systém detekce přerušení dodávky elektrické energie z primárního zdroje napájení. Všechny tyto části budou následně popsány detailněji.

Baterie akumulátorů je složena z jednotlivých akumulátorů (akumulátorových článků) nebo z baterií, které jsou již z jednotlivých článků poskládány z výroby. Takovou baterií může být například běžně známá olověná baterie o nominálním napětí 12 V, která je složena ze 6-ti jednotlivých akumulátorových článků, které mají nominální napětí 2 V. Akumulátory nebo baterie můžeme spojovat sériově, paralelně, nebo sério-paralelně. Vždy ale musíme dbát na to, abychom spojovali akumulátory stejného typu, napětí, kapacity a nejlépe i ze stejné výrobní série, aby měly pokud možno shodné parametry. Sériovým spojením akumulátorů získáme baterii, která bude mít napětí rovnající se součtu napětí jednotlivých akumulátorů a kapacitu shodnou s akumulátorem o nejnižší kapacitě. Při paralelním spojení akumulátorů získáme baterii, která bude mít napětí shodné s napětím použitých akumulátorů a kapacita bude dána součtem kapacit jednotlivých akumulátorů. Při sério-paralelním spojení akumulátorů jsou sériově spojené akumulátory spojovány dále paralelně. Tímto typem spojení jsme schopni získat baterii o různém napětí (dáno sériovým spojením) a různé kapacity (dáno paralelním spojením). Zejména u paralelního spojování musíme dbát na shodnost spojovaných akumulátorů (baterií), protože zde protékají vyrovnávací proudy, které mohou zkrátit životnost akumulátorů, ale může dojít i k explozi nejslabšího akumulátoru. Více informací o typech akumulátorů uvažovaných v této práci je uvedeno v kap. 2.2.

O správné nabíjení baterie akumulátorů a udržování v nabitém stavu se stará nabíječ baterie akumulátorů. Nabíječ je externí elektronické zařízení, napájené z primárního zdroje napětí, jehož výstup je připojen k baterii akumulátorů. Je nutné dbát na to, aby byl používán vždy nabíječ vhodný pro daný typ použitých akumulátorů a aby jeho jmenovité výstupní napětí bylo shodné s jmenovitým napětím baterie akumulátorů. Výstupní nabíjecí proud nabíječe nemusí být pouze stejnosměrný, ale může být pouze jednocestně usměrněný, nebo různého pulzního průběhu. Je vhodné volit takový nabíječ, který má dostatečnou velikost výstupního proudu a má nejen režim nabíjení, ale i tzv. udržovací režim, ve kterém je baterie akumulátorů šetrně udržována v plně nabitém stavu.

Jedním z doplňkových prvků je systém kontroly stavu akumulátorů. Ten zjišťuje, nebo monitoruje, aktuální stav, v jakém se nacházejí jednotlivé akumulátory. Použití tohoto systému může být občasné, nejlépe však pravidelné, nebo nepřetržité. Při občasnému použití se systém postupně připojí ke všem akumulátorům a zjistí se stav každého z nich. Toto se opakuje nejlépe v pravidelných intervalech a naměřené hodnoty se porovnávají s hodnotami z předchozího měření a z prvního měření akumulátoru. Výsledkem je vyhodnocení aktuálního stavu akumulátoru a zda vyhovuje dalšímu používání v daném systému zálohovaného napájení. U nepřetržitého monitorování baterie, nebo lépe všech jednotlivých článků, je systém permanentně připojen k akumulátoru a monitoruje proud tekoucí z akumulátoru (vybíjení) a do akumulátoru (nabíjení).

Díky této informaci zná systém přibližnou aktuální kapacitu akumulátorů libovolné technologie. Z důvodu energetických ztrát při nabíjení, nebo vnitřním samovybíjením akumulátoru, je nutné v pravidelných intervalech provést stejný test, jako se provádí při občasné testování uvedeném výše. Vývojem tohoto systému se zabývá velká část této práce a podrobněji se touto problematikou zabývá kap. 4.

Dalším z doplňkových prvků je balancer, který se stará o rovnoměrné nabíjení a vybíjení jednotlivých akumulátorů (článků) v baterii. V anglické literatuře bývá balancer označován jako Battery Management System (BMS), nebo Simple Battery Management (SBM). Jelikož žádné dva akumulátorové články nejsou zcela totožné, je vhodné zacházet s každým článkem jinak. Jednotlivé články použité v baterii mají rozdílnou kapacitu, nabíjecí a vybíjecí charakteristiku a tyto parametry se u jednotlivých článků ještě různě mění v čase. Je tedy vhodné pomocí balanceru měřit napětí na každém článku baterie („hlídat“ jeho stav) a pokud dojde k překročení minimálního nebo maximálního napětí (dané technologií použitého článku) na libovolném článku, balancer odpojí baterii od zátěže nebo nabíječe, neboli přeruší průtok proudu z nebo do baterie. Balancer je nutné používat u akumulátorů, které jsou citlivé na podbití nebo přebití. Typickým příkladem jsou akumulátory založené na bázi lithia, u kterých hrozí při podbití či přebití zničení akumulátoru nebo dokonce exploze.

Zálohovací systém by měl také obsahovat systém detekce přerušení dodávky elektrické energie z primárního zdroje napájení. Což je nezbytný subsystém, který hlídá, zda nedošlo k výpadku napájení. Pokud k takovému stavu dojde, měl by v ideálním případě ihned, bez prodlení, převést zdroj napájení zálohovaného zařízení z primárního na sekundární (bateriový). Pokud je již tento systém součástí zálohovaného zařízení s dvojí možností napájení (střídavé síťové napětí a stejnosměrné zálohovací napětí), jako je tomu u zmiňovaného cesiového etalonu frekvence, není nutné tímto subsystémem zálohovací systém napájení vybavovat.

2.2 Typy akumulátorů pro systémy zálohovaného napájení

Pro systémy zálohovaného napájení, nebo obecněji pro systémy uchovávající elektrickou energii, se v dnešní době využívají akumulátory založené na různých technologických principech. Takovými systémy mohou být malé jednotky UPS běžně používané pro kancelářskou techniku, větší záložní zdroje napájení laboratorní techniky nebo serverových celků, nebo například k akumulaci elektrické energie z malých solárních panelů na rodinných domech, až po rychlonabíjecí stanice pro elektromobily [4] nebo velkokapacitní bateriové úložiště pro vyrovnávání špiček v rozvodné síti [5]. Všechny tyto systémy vyžadují akumulátory k uchování elektrické energie, ale každý má na

akumulátory odlišné požadavky. Je tedy vždy zapotřebí vybrat nejvhodnější typ akumulátoru pro daný systém.

Dále uvádím popis různých typů akumulátorů používaných pro systémy zálohovaného napájení, jejich vlastnosti, výhody a nevýhody použití v uvažovaném systému zálohovaného napájení laboratorní techniky. Na konci kapitoly (viz kap. 2.2.6) je uvedeno porovnání jejich parametrů a zvolení nejvhodnějších z nich.

2.2.1 Olověný akumulátor

Olověný (Pb) akumulátor, anglicky označovaný jako Lead acid battery, byl objeven francouzským fyzikem Gastonem Planté v roce 1859, a stal se první nabíjecí baterií pro komerční využití. Dnes jsou stále velmi oblíbené zejména pro svou spolehlivost a poměrně nízkou cenu vztaženou na jednotku kapacity.

Olověné články fungují na základě vratné chemické reakce probíhající v roztoku sloučenin vody a kyseliny sírové. Mřížková elektroda je vyrobena ze slitiny olova. Pokud k olovu přidáme například vápník, sníží se samovybíjení. Dalšími přídavnými látkami mohou být antimon, selen, kadmium nebo uhlík.



Obrázek 2.4. Vnitřní uspořádání VRLA olověného akumulátoru (Zdroj: [6])

Základní rozdělení olověných akumulátorů je podle jejich technologie:

- baterie se zaplavenými elektrodami (např. autobaterie) – elektrolyt je volně nalitá kapalina mezi elektrodami,
- VRLA z anglického Valve Regulated Lead Acid – ventilem řízené olověné akumulátory. Jde o označení zapouzdřených (bezúdržbových) akumulátorů s výrazným omezením vývinu plynů. Elektrolyt je napuštěn do separátoru, což je lepší, než zaplavení elektrod kapalinou. Jedná se o podobné řešení jako u systémů

na bázi niklu a lithia. Tato varianta umožňuje pracovat s baterií v jakékoliv poloze, aniž by došlo k úniku elektrolytu.

- AGM z anglického Absorbent Glass Mat – elektrolyt je nasáknut ve skelné vatě, která je mezi elektrodami.
- Gelové – elektrolyt je zahuštěný ve formě gelu.

Dále můžeme olovené akumulátory dělit podle jejich použití:

- záložní (standby) – např. záložní zdroje nepřerušovaného napájení (UPS), bezpečnostní systémy, ...
- startovací – autobaterie
- trakční – golfová vozítka, vysokozdvížené vozíky, ...

Jmenovité napětí jednoho článku je 2 V. Napětí jednoho článku, při kterém by mělo dojít k ukončení nabíjení je 2,4 V a naopak při kterém by mělo dojít k odpojení při vybíjení je 1,75 V. Po ukončení nabíjení baterie (12V), po dosažení napětí 14,4 V, klesne napětí rychle na 13,2 V a poté pomalu až na 12,8 V. V případě dobíjení udržovacím napětím je nutné napětí pečlivě nastavit. Nízké napětí snižuje výkonnost a způsobuje sulfataci na záporné elektrodě. Vysoké napětí zlepšuje výkonnost, ale dochází ke korozi mřížky na kladné elektrodě a ztrátě elektrolytu. Jak nízké, tak vysoké napětí významně zkracuje životnost akumulátoru. Sulfataci lze včasným provedením desulfatace ve většině případů ještě odstranit, ale koroze je nevratná.

Pro nabíjení oloveného akumulátoru se využívá metody CC/CV. Jedná se o metodu, kdy na začátku je akumulátor nabíjen konstantním proudem. Jakmile dosáhne napětí akumulátoru dané hodnoty, přepne se režim nabíjení na konstantní napětí, kterým je akumulátor pomaleji dobit do stavu plného nabití. Tyto akumulátory se nehodí k rychlému nabíjení a u většiny typů trvá úplné nabití 14-16 hodin. Akumulátory je vždy nutno skladovat plně nabité.

Akumulátory na bázi olova mají vysokou hmotnost a jejich životnost je při opakovaném hlubokém cyklování (vybíjení/nabíjení) nižší než u systémů na bázi niklu nebo lithia. Počet cyklů u tohoto typu akumulátorů je pouze 300 až 800. Každým cyklem dochází ke snížení kapacity, ale k tomuto jevu dochází v různé míře u všech typů baterií. Úplné vybití akumulátoru škodí, proto se doporučuje olovené akumulátory vybíjet maximálně do 40 % DoD (Depth of Discharge – hloubka vybití), neboli do 60 % SoC (State of Charge – stav nabití). Se vzrůstající hloubkou vybíjení klesá počet možných cyklů, tedy životnost. Podobně klesá životnost se vzrůstající provozní teplotou.

Mezi výhody olovených akumulátorů patří zejména schopnost dodávat vysoké rázové proudy. Dále pak pomalé samovybíjení, které je přibližně 3 % kapacity během jednoho

měsíce uskladnění při teplotě 25 °C, což je optimální pracovní teplota. Olověné akumulátory také dobře pracují při nízkých teplotách a to i pod bodem mrazu, kde většina akumulátorů na bázi lithia ztrácí obrovskou část dostupné kapacity. Mají průměrnou životnost, nepodléhají paměťovému efektu jako akumulátory na bázi niklu. Pořizovací náklady jsou nízké, ale cena za jednotku kapacity, kterou jsme schopni z akumulátoru bezpečně získat, je vyšší než u akumulátorů na bázi lithia.

Kvůli vysokému obsahu olova a kyselině sírové nejsou olověné akumulátory šetrné k životnímu prostředí, ale díky tomu, že 99 % olověných akumulátorů se recykluje, představují olověné akumulátory relativně malé riziko pro životní prostředí a pravděpodobně budou mít i nadále své místo na trhu. [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]

2.2.2 Nikl-kadmiový akumulátor

Nikl-kadmiový (NiCd) akumulátor, anglicky označovaný jako Nickel cadmium battery (NICAD), má kladnou elektrodu vyrobenou z niklu, zápornou elektrodu z kadmia a jako elektrolyt je použit draselný louh. Jsou to odolné akumulátory s vysokou životností a schopností pracovat i za velmi nízkých teplot (až do -40 °C). Jsou vyráběny ve dvou provedeních. Prvním z nich je hermeticky uzavřený článek vyráběný v rozměrech shodných s primárními články (nenabíjecí baterie), které se používají jako jejich nabíjecí náhrada. Tyto akumulátory se hojně využívají v elektrickém ručním nářadí pro jejich schopnost dodat velké proudy. Druhým provedením je akumulátor se zaplavenými elektrodami a kapalným elektrolytem, který je provedením velmi podobný olověným akumulátorům se zaplavenými elektrodami. Akumulátory tohoto provedení je nutné provozovat v dobře větraných prostorách, protože dochází k odpařování elektrolytu, který je tedy nutné doplňovat. V této práci budu dále u NiCd akumulátorů uvažovat pouze variantu se zaplavenými elektrodami.



Obrázek 2.5. Jednotlivé články a sestavené baterie NiCd (Zdroj: [16])

Jmenovité napětí jednoho článku je 1,2 V. Plně nabitý akumulátor má napětí 1,35 V a zcela vybitý má napětí 0,8 V. Pro nabíjení NiCd akumulátorů se běžně používá metoda CC/CV, podobně jako u olovených akumulátorů. Nabíjecí proud, udávaný jako násobek jmenovité kapacity akumulátoru v Ah, bývá přibližně 0,1 až 0,2 C, kde C je jmenovitá kapacita akumulátoru. Nabíjení konstantním proudem se provádí do okamžiku, než napětí článku vzroste na hodnotu 1,43 V, poté se přechází na nabíjení konstantním napětím o velikosti 1,43 V. Ke konci nabíjecího procesu se prudce zvýší proud odebíraný akumulátorem a snížení napětí akumulátoru. Tento jev je také provázen zvyšováním teploty článku. Těchto jevů se využívá pro detekci konce nabíjecího procesu. Akumulátory umožňují také rychlonabíjení v pulzním režimu proudem o velikosti 0,3 až 2 C podle použité technologie. Při tomto způsobu nabíjení je nutné hlídat teplotu článku, která nesmí přesáhnout +45 °C. Napětí článku pro ukončení nabíjení je 1,6 V.

Pracovní teplota by se měla optimálně pohybovat v rozsahu +5 až +25 °C, což je také vhodná teplota pro jejich uskladnění. Akumulátory typu NiCd by měly být ideálně uskladněny ve vybitém stavu, což je u ostatních typů akumulátorů nemožné. Pokud byl akumulátor uskladněn delší dobu, bude nutné ho oživit pomocí 2 až 3 nabíjecích cyklů.

Mezi výhody NiCd akumulátorů patří zejména odolnost proti přebití a podbití, což je u akumulátorů na bázi olova a zejména lithia velký problém. Dále pak možnost provozování i za nízkých teplot a odolnost vůči hlubokému vybití. Akumulátory mají vysokou životnost, jsou robustní a netrápí je sulfatace ani koroze jako je tomu u olovených akumulátorů. Jsou schopné dodávat velké proudy a umožňují také nabíjení vyššími proudy. Výhodou pro provoz, ale zároveň nevýhodou pro diagnostiku, je stálá hodnota vnitřního odporu, který se s časem používání téměř nemění.

Zásadními nevýhodami jsou nízká efektivita nabíjení (pouze 65 až 80 %), velké samovybíjení (10 až 15 % za měsíc) a paměťový efekt. Paměťový efekt se projevuje velkým snížením dostupné kapacity při dobití akumulátoru, který nebyl před nabíjením plně vybit. Dalšími nevýhodami je vyšší cena, velký pokles kapacity při častém dobíjení a obsah jedovatého kadmia, díky kterému je nutné zajistit zpětný odběr a bezpečnou recyklaci (podobně jako u Pb akumulátorů). U akumulátorů se zaplavenými elektrodami v tzv. otevřeném provedení dochází při provozu ke snižování kapacity a zvyšování vnitřního odporu článku v důsledku degradace elektrolytu, který se dostává do styku s okolním vzduchem. Dochází u nich také k odpařování elektrolytu. Je tedy nutné umístit je do dobře větraného objektu a pravidelně kontrolovat množství elektrolytu, případně ho i doplňovat. [15], [17], [18], [19], [20], [21]

2.2.3 Lithium-Iontový akumulátor

Lithium-iontový (Li-Ion) akumulátor, tak jak ho dnes známe, zavedla firma Sony Energytec v roce 1991. Jedná se o nabíjitelný akumulátor s vysokou hustotou energie vztahenou k objemu, který dnes patří mezi nejpoužívanější typ akumulátorů především ve spotřební elektronice. Dá se říci, že představuje základní princip, od kterého jsou více či méně odvozené další druhy akumulátorů založených na bázi lithia. Těmi jsou například Lithium Cobalt Oxide, Lithium Manganese Oxide, Lithium Nickel Manganese, Lithium Iron Phosphate nebo Lithium Titanate.



Obrázek 2.6. Baterie společnosti Varta složená z článků Li-Ion (40 V / 40 Ah) (Zdroj: [22])

Základním prvkem těchto akumulátorů je lithium, které je chemicky vysoce reaktivní a snadno vznětlivé. Tato vlastnost se potlačuje sloučeninami s různými prvky. Kladná elektroda je tvořena lithiokobaltovým oxidem, záporná elektroda je tvořena sloučeninou uhlíku a grafitu a elektrolyt je tvořen lithiovou solí v organickém rozpouštědle. Zkratka „Ion“ v názvu znamená, že ionty Li^+ při nabíjení putují od kladné elektrody k záporné, a při vybíjení naopak.

Jmenovité napětí Li-Ion článku je 3,6 V, v některých případech až 3,7 V. Napětí, při kterém by mělo dojít k ukončení nabíjení, je 4,1 až 4,2 V, a napětí, při kterém by mělo dojít k odpojení akumulátoru od zátěže při vybíjení, je 2,7 V. Vždy je nutné striktně dodržovat hodnoty uvedené výrobcem pro daný typ akumulátoru, protože u akumulátorů na bázi lithia hrozí i při malém překročení doporučených hodnot trvalé snížení kapacity. Překročení hodnot může vést až k nevratnému zničení akumulátoru, které může být dokonce způsobené i výbuchem akumulátoru.

Protože jsou Li-Ion akumulátory velice citlivé na dodržování doporučených hodnot napětí, je nutné, aby se o nabíjení a vybíjení těchto akumulátorů starala pomocná

elektronika. Pokud nepoužíváme pouze jeden článek, ale baterii složenou z jednotlivých článků, je nutné k této baterii připojit tzv. balancer, což je elektronické zařízení, které monitoruje napětí na jednotlivých článcích baterie a v závislosti na této informaci vyrovnává tok energie z/do jednotlivých článků. Nabíjení se provádí metodou CV/CC, nebo u nejnovějších akumulátorů již pouze metodou CV. Tedy pouze nabíjení konstantním napětím, které ale musí být měřeno přesně.

Akumulátory Li-Ion je nutné skladovat plně nabitě, protože pokles napětí pod minimální napětí vede ke zničení akumulátoru. Pokud je ke skladovanému akumulátoru připojena zmiňovaná pomocná elektronika, je nutné častěji kontrolovat napětí uskladněných akumulátorů, protože tato elektronika má určitou spotřebu, a mohlo by dojít k úplnému vybití akumulátoru a tím i jeho zničení.

Mezi výhody Li-Ion akumulátoru patří velmi vysoká hustota energie (200 Wh/kg), možnost výroby v různých tvarech s relativně vysokou kapacitou s malým objemem a hmotností. Nemají paměťový efekt a nepotřebují formátování (několik cyklů nabíjení-vybíjení před prvním použitím). Mají nízké samovybíjení (5 až 8 % za měsíc při teplotě 20 °C) a vysoké nominální napětí 3,6 až 3,7 V. Jsou schopné dodávat vysoké proudy a lze je i nabíjet relativně vysokými proudy. Životnost je 500 až 1200 cyklů a je velmi závislá na velikosti nabíjecího napětí, vybíjecího proudu a provozní teplotě. Klesající napětí (téměř lineárně) může sloužit k indikaci míry vybití akumulátoru. Jsou nezávadné pro životní prostředí, protože neobsahují jedovaté olovo nebo kadmium.

Nevýhodami je například stárnutí, kdy se akumulátoru snižuje maximální kapacita nehledě na to, jestli je nebo není používán. Rychlost stárnutí se zvyšuje s vyšší teplotou, vyšším nabíjecím napětím a vyšším vybíjecím proudem. Hrozí také nebezpečí výbuchu nebo vznícení při nesprávném používání (zkratování, nabíjení na vyšší kapacitu než je baterie schopna pojmout). Vadí jim úplné vybití (při poklesu napětí pod 2,5 V je velmi těžké akumulátor znovu „oživit“). Další nevýhodou je nutnost použití pomocné elektroniky, popř. i balanceru, pro hlídání jednotlivých článků baterie. Nelze je provozovat při extrémních teplotách.

Prodloužit životnost Li-Ion akumulátorů můžeme například tak, že je nebudeme nechávat dlouho uskladněné plně nabitě nebo téměř vybité. Je vhodné udržovat akumulátor nabitý tak, aby měl přibližně 20 až 80 % kapacity. S hloubkou vybíjení (DoD — Depth of Discharge) se životnost akumulátoru také snižuje. Baterii, která je vybavena elektronikou pro indikaci stavu nabití, je vhodné občas vybit na nízkou úroveň kapacity, čímž dojde k recalibraci indikátoru nabití, ale zkracuje se tím její životnost.

Akumulátory Li-Ion nejsou nejvhodnější volbou pro větší systémy UPS (stovky Wh) z důvodu vyšší ceny akumulátorů s velkými kapacitami. Jsou ale velmi vhodné jako zdroj energie pro různou spotřební elektroniku (mobilní telefony, digitální fotoaparáty, notebooky apod.) a také pro malé přenosné záložní zdroje energie – powerbanky, které jsou dnes velmi rozšířené. [9], [15], [21], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]

■ 2.2.4 Lithium-železo-fosfátový akumulátor

Lithium-železo-fosfátový (LiFePO₄) akumulátor, též označovaný jako „LFP“, je založen na principu Li-Ion, ale používá jako katodový materiál LiFePO₄. Anoda je z uhlíku a elektrolyt se nachází v separátorech a na deskách. Akumulátor také obsahuje bezpečnostní jednosměrný ventil, který zajišťuje upuštění nahromaděných plynů, které přesáhnou určitý tlak. Materiál LiFePO₄ byl objeven na texaské univerzitě v roce 1996 Johnem Goodenough, a stal se vhodným a žádaným katodovým materiálem pro dobíjecí akumulátory založené na bázi lithia. Je netoxický, jeho prvky jsou dostupné, má vynikající tepelnou stabilitu a bezpečnostní vlastnosti. Má nepatrně nižší hustotu energie (150 Wh/kg) než akumulátory Li-Ion, ale ostatními vlastnostmi je předčí.

Jmenovité napětí LiFePO₄ článku je 3,2 V, což je rozdílné oproti většině technologií založených na bázi lithia. Provozní napětí by se mělo pohybovat v rozmezí 3,0 V až 3,3 V. Minimální napětí při vybíjení by nemělo být nižší než 2,8 V a maximální napětí při běžném nabíjení by nemělo být vyšší než 3,6 až 3,7 V. Maximální hodnoty, které nesmějí být nikdy překročeny, jsou 2,5 V pro vybíjení a 4,0 V pro nabíjení. Maximální kontinuální vybíjecí proud může mít hodnotu až 3 C, a při pulzním vybíjení může mít proud hodnotu dokonce až 60 C. Metoda nabíjení je totožná jako u akumulátorů Li-Ion, zmiňovaná výše. Ale na rozdíl od akumulátorů Li-Ion je možné využít rychlonabíjení velkým nabíjecím proudem o hodnotě 1 až 5 C do okamžiku dosažení hodnoty napětí článku 3,7 V. Bohužel při rychlonabíjení dochází ke zkracování životnosti, ale tak tomu je i u všech ostatních typů akumulátorů umožňující rychlonabíjení.

LiFePO₄ akumulátory jsou navrženy pro cca 4000 cyklů při 70 až 80 % stavu vybití (DoD). Pokud jsou akumulátory vybíjeny pouze do nižšího stavu vybití (DoD), pak se jejich životnost ještě prodlouží. Pro porovnání Pb akumulátory lze vybit pouze do 40 % DoD, to znamená přibližně poloviční využitelnou kapacitu oproti LiFePO₄ akumulátorům. LiFePO₄ akumulátory nemají paměťový efekt, tedy nemusí být plně vybity před nabíjením. A dokonce ani nemusí být nabity na 100 % kapacity, jelikož jim nevádí jakýkoli stupeň nabití mezi 30 a 70 % kapacity (SoC), což je další výhodná vlastnost. Podobně jako akumulátory Li-Ion mají také velmi nízký vnitřní odpor.



Obrázek 2.7. Jednotlivé články typu LiFePO₄ s různou kapacitou (Zdroj: [30])

Tyto akumulátory lze nabíjet a vybíjet při mnohem vyšších teplotách. Vyšší teploty nesnižují kalendářní životnost chemického složení akumulátorů. Pracovní rozsah teplot pro LiFePO₄ je obrovský, a to od -45 °C do +85 °C. Tato technologie zaručuje velmi nízké samovybíjení, které je nižší než 2 % měsíčně. Mají extrémně stabilní chemické složení a jsou bezpečné. Jsou nehořlavé, protože neobsahují hořčík. Při nárazu nebo v případě přebití či zkratu nedojde k explozi ani vzplanutí. Mají také vysokou tepelnou stabilitu a to až do 500 °C. Jsou nezávadné pro životní prostředí, podobně jako Li-Ion, protože neobsahují žádné toxické nebo těžké kovy, jako je olovo a kadmium, nebo nebezpečné žíraviny jako H₂SO₄. Akumulátory LiFePO₄ navíc představují jednu z nejbezpečnějších technologií pro uchování energie.

Nevýhodou oproti olověným akumulátorům může být atypické napětí a nutnost použití doplňkové elektroniky a balanceru při spojení akumulátorů do baterie. Pro vyhodnocování stavu nabití akumulátoru je k dispozici pouze malý rozdíl minimální a maximální hodnoty napětí (méně než 1 V), které je v průběhu vybíjení téměř konstantní. Tedy není možné použít jednoduché techniky vyhodnocení aktuálního stavu nabití (SoC).

Pro využití v systémech UPS s vysokou kapacitou jsou velmi vhodné, protože jsou bezpečné (nehoří, neexplodují a elektrolyt se neodpařuje), mají prověřené vlastnosti a životnost (jsou již cca 10 let na trhu), jsou levné (cena je minimálně srovnatelná s cenou Pb akumulátorů). Výborný je také rozsah pracovních teplot, lze je nabíjet i vybíjet vysokými proudy (1 až 5 C). Vyznačují se vysokou účinností (>95 %) a dlouhou životností danou velkým počtem cyklů (>4000). [15], [28], [29], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37]

2.2.5 HE3DA akumulátor

HE3DA (High Energy 3D Accumulator) je zkratka označující českou revoluční baterii. Tato baterie je zatím ve fázi vývoje, ale má velmi nadějnou budoucnost. Na vývoji této baterie společnosti HE3DA se podílejí také například ČVUT, VUT, Elektrotechnický zkušební ústav nebo Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR.



Obrázek 2.8. Prototyp akumulátoru HE3DA (Zdroj: [38])

Jedná se vlastně o další typ lithiového článku, ale s technologií, která se odlišuje od všech ostatních. Všechny dnes běžně používané akumulátory založené na bázi lithia jsou vyráběné z tenkých elektrod. Tyto elektrody tvoří kovová fólie, na které je nalepena aktivní vrstva. Elektroda baterie HE3DA je silná několik milimetrů. Tato elektroda tvoří rám baterie, který zprostředkovává distribuci i sběr elektronů a rozvod tepla po celém objemu baterie. Do tohoto rámu jsou vlisovány články ve formě tabletek tvořené speciální nano směsí.

Baterie je schopná sama se chladit vlastním elektrolytem a i při zkratovém vybíjení se ohřeje pouze o 20 °C. Je také velmi odolná vůči mechanickému poškození. Jelikož baterie neobsahuje žádné pojivo, dosahuje její vnitřní odpor velmi nízkých hodnot. Baterie poskytuje velmi vysoký výkon. Například u baterie s kapacitou 1 kWh je maximální nabíjecí proud až 100 A. Obrovskou výhodou HE3DA baterií je to, že nepotřebují žádný power management systém, který je běžně nutný pro řízení nabíjení a vybíjení jednotlivých článků baterie.

Podle vynálezce této baterie, Jana Procházky, má mít největší uplatnění v automobilovém průmyslu jako hlavní zdroj energie pro elektromobily, skladovací baterie kontejnerového typu pro solární pole, ale také jako domácí baterie pro uskladnění energie získané různými způsoby z obnovitelných zdrojů. Bylo by tedy možné použít tento typ baterie i pro různé zálohovací systémy s větším odběrem a nebo s velmi

dlouhou dobou provozu na baterie. Společnost HE3DA již vyvinula a již vyrábí několik různých prototypů. Výrobní náklady na 1 kWh kapacity baterie by se měly pohybovat okolo 200 €, což je přibližně poloviční hodnota oproti běžným lithiovým technologiím. Bohužel v tuto chvíli není baterie HE3DA ještě v prodeji (spuštění výroby je plánováno na konec roku 2019), proto ji do užšího výběru nemohu zařadit. [37], [39], [40], [41]

■ 2.2.6 Srovnání uvažovaných typů akumulátorů

Vlastnosti, parametry, výhody a nevýhody 5-ti různých technologií akumulátorů byly uvedeny v předchozích kapitolách (Pb – 2.2.1, NiCd – 2.2.2, Li-Ion – 2.2.3, Li-FePO₄ – 2.2.4 a HE3DA – 2.2.5). Je potřeba jejich vlastnosti porovnat a vybrat z nich nejvhodnější typy akumulátorů pro bateriový záložní systém napájení laboratorních přístrojů. K tomuto účelu nejlépe poslouží tabulka (tab. 2.2) porovnávající parametry jednotlivých zkoumaných typů akumulátorů. Akumulátor typu HE3DA v tabulce neuvádím, protože zatím není v prodeji a nejsou o něm známy všechny uváděné parametry. Z čehož vyplývá, že nebude zahrnut do výběru nejvhodnějšího typu akumulátoru.

Pokud tedy porovnáme parametry a vlastnosti jednotlivých typů akumulátorů uvedené v tabulce 2.2 a předchozích kapitolách, můžeme říci, že **Niklo-kadmiové (NiCd) akumulátory** nejsou vhodné pro systém zálohovaného napájení laboratorní techniky, protože:

- mají paměťový efekt – složité nabíjení,
- mají velké samovybíjení, s čímž souvisí časté dobíjení, které rapidně snižuje kapacitu,
- mají nízkou efektivitu nabíjení/vybíjení,
- dochází k odpařování elektrolytu – nutnost dostatečného větrání, pravidelné kontroly množství elektrolytu a případné jeho doplňování,
- mají vysokou cenu za 1 kWh,
- mají malé nominální napětí článku – např. pro baterii o napětí 36 V bychom potřebovali sériově spojit 30 akumulátorových článků.

Mají ale relativně vysoký počet cyklů, velký rozsah pracovních teplot, umožňují vysoké vybíjecí proudy, jejich vnitřní odpor se téměř nemění s počtem provedených cyklů (s časem používání) a nepotřebují pomocnou elektroniku ani balancer. Z těchto důvodů jsou spíše vhodné jako trakční a startovací baterie stacionárních objektů a záložní zdroje napájení s požadavkem na vysokou kapacitu akumulátorů a velké odběry, které budou umístěny v dobře větraných objektech a bude prováděna pravidelná údržba. Pro malovýkonové záložní zdroje napájení jsou nevhodné, tedy i pro můj návrh systému zálohování.

Dále můžeme říci o **olověných (Pb) akumulátorech**, že:

- mají nejnížší specifickou (Wh/kg) i objemovou (Wh/l) hustotu energie,
- varianta VRLA má velmi nízké samovybíjení, ale varianta se zaplavenými elektrodami má samovybíjení velké,
- mají vysokou efektivitu nabíjení/vybíjení,
- mají nízký vnitřní odpor, tedy jsou schopné dodávat i větší proudy do zátěže,
- mají velký rozsah pracovních teplot,
- nepotřebují pravidelnou údržbu (v případě varianty se zaplavenými elektrodami v bezúdržbovém provedení),
- mají velký rozsah pracovních napětí, a pokles napětí v závislosti na stavu nabití (SoC) je téměř lineární – snadný odhad aktuálního stavu nabití,
- netrpí paměťovým efektem,
- nepotřebují pomocnou elektroniku a balancer,
- mají malý počet cyklů (zvláště při nešetrném zacházení – sulfatace, koroze),
- doporučená hloubka vybití (DoD) je pouze 40 %,
- neumožňují rychlonabíjení, ale nabíjecí metoda je jednoduchá (CC/CV),
- mají nejnížší pořizovací cenu za 1 kWh.

Olovené akumulátory jsou tedy obecně vhodné jako startovací nebo trakční akumulátory a pro menší systémy zálohovaného napájení. Jelikož jsou levné, mají nízké samovybíjení, jednoduché nabíjení a zjišťování stavu nabití. Rozhodně bych je volil jako vhodný typ akumulátoru pro navrhovaný systém zálohovaného napájení laboratorní techniky. Na co je ale potřeba dát velký pozor, je výběr vhodného typu akumulátoru pro toto použití. Mohlo by se zdát, že nejlepší volbou budou klasické olovené akumulátory používané pro osobní automobily, které mají velké kapacity a jsou levnější než typ VRLA, ale jedná se v převážné většině o startovací akumulátory, které mají elektrody ve formě tenkých destiček, které umožňují odebírat z akumulátoru velké startovací proudy, ale neumožňují trvalé vybíjení do větších hloubek vybití (DoD). Pokud bychom použili tento typ akumulátorů pro dlouhodobý odběr proudu (několik hodin), a akumulátor vybili například až do 80 – 100 % DoD, velice razantně by se snížil počet možných provozních cyklů.

Proto je zapotřebí pro tyto systémy vybírat akumulátory trakčního typu, které mají elektrody ve formě silných desek umožňujících mnohem větší hloubky vybití, aniž by docházelo k výraznější degradaci a tím spojenému snižování počtu možných provozních hodin. Jsou sice dražší a neumožňují tak velké proudové odběry, ale u systémů zálohovaného napájení takových rozměrů, jako je mnou řešený, není vyžadován extrémní odběr proudu, ale spíše dlouhá životnost a možnost velké hloubky vybití. Je tedy nutno vždy vybírat akumulátory trakčního typu, ať již ve formě VRLA (AGM nebo gelové), nebo méně dostupné variantě se zaplavenými elektrodami. Ty ale bývají velmi drahé, protože se většinou jedná o kombinovaný typ, který je možné zároveň

provozovat jako startovací i jako trakční. Tyto akumulátory se používají například pro nákladní automobily s rozsáhlým doplňkovým elektronickým příslušenstvím, nebo vozidla záchranných složek.

Nakonec můžeme porovnat vlastnosti **LiFePO4 akumulátorů** se základními **Li-Ion akumulátory**:

- LiFePO4 mají nižší nominální napětí i rozsah pracovních napětí,
 - LiFePO4 mají nižší specifickou (Wh/kg) i objemovou (Wh/l) hustotu energie,
 - jejich pořizovací cena za 1 kWh je přibližně srovnatelná,
- + LiFePO4 mají vhodné nominální napětí – ideální náhrada olověných akumulátorů (lze jednoduše sestavit baterie s podobným napětím, například $12\text{ V} = 4$ články),
 - + LiFePO4 mají nižší samovybíjení,
 - + LiFePO4 mají vyšší počet cyklů,
 - + LiFePO4 mají vyšší efektivitu nabíjení/vybíjení,
 - + LiFePO4 mají extrémně nízký vnitřní odpor, jsou tedy schopné dodávat extrémní proudy do zátěže (pulzní proudy až hodnoty 60 C),
 - + LiFePO4 mají větší možnou hloubku vybití,
 - + LiFePO4 mají velký rozsah pracovních teplot,
 - + u akumulátorů s většími kapacitami vycházejí cenově lépe LiFePO4.

Je zřejmé, že z těchto dvou typů lithiových akumulátorů je pro systém zálohovaného napájení laboratorní techniky vhodnější typ LiFePO4. A pokud je porovnáme s olověnými (Pb) akumulátory, mají téměř všechny parametry lepší, pouze jsou citlivější na správné nabíjení (především na přebití a podbití), vyžadují pomocnou elektroniku a balancer (BMS) a jejich cena za 1 kWh je vyšší. Ale u otázky ceny je zapotřebí podívat se spíše na náklady za životnost akumulátorů vztahované na jednotku dostupné kapacity. Pořizovací náklady jsou jednoznačně stále nižší u Pb akumulátorů a to i díky tomu, že nevyžadují další pomocnou elektroniku, ale jejich životnost je kratší a především neumožňují velkou hloubku vybití, takže za dostupnou kapacitu se dá považovat pouze 40 % nominální kapacity akumulátorů. Jinak je tomu u LiFePO4 akumulátorů, u kterých jsou pořizovací náklady vyšší a je nutné k nim připočítat náklady na pomocnou elektroniku, ale mají mnohem delší životnost a za dostupnou kapacitu můžeme považovat až 80 % nominální kapacity, což je 2 krát více než u Pb akumulátorů. Výsledné náklady přepočtené v závislosti na životnosti a dostupné kapacitě vycházejí lépe ve prospěch LiFePO4 akumulátorů, a to až 4 krát.

	Pb	NiCd	Li-Ion	LiFePO4
Nominální napětí	2 V	1,2 V	3,6 V	3,2 V
Specifická hustota energie	40 Wh/kg	70 Wh/kg	200 Wh/kg	150 Wh/kg
Objemová hustota energie	70 Wh/l	120 Wh/l	530 Wh/l	220 Wh/l
Specifická hustota výkonu	180 W/kg	150 W/kg	300 W/kg	220 W/kg
Samovybíjení / měsíc	3 – 20 %	10 – 15 %	5 – 8 %	2 %
Počet cyklů	300 – 1000	1000	500 – 1200	2000 – 7000
Efektivita	50 – 95 %	65 – 80 %	80 – 90 %	>95 %
Stejnoseměrný vnitřní odpor	50 – 100 mΩ	100 – 150 mΩ	100 – 300 mΩ	10 – 20 mΩ
Metoda nabíjení	CC/CV	CC/CV, pulzní	CV/CC, CV	CV/CC, CV
Vybíjecí proud	5 C	30 C	1 – 20 C	3 – 60 C
Nabíjecí proud	0,5 C	0,3 – 2 C	1 C	1 – 5 C
Napětí pro ukončení vybíjení	1,75 V	0,8 V	2,7 V	2,8 V
Napětí pro ukončení nabíjení	2,4 V	1,35 V	4,1 – 4,2 V	3,6 – 3,7 V
Doporučená hloubka vybití (DoD)	40 %	až 100 %	75 %	80 až 100 %
Teplotní rozsah	-35 až 50 °C	-40 až 50 °C	0 až 45 °C	-45 až 85 °C
Paměťový efekt	ne	ano	ne	ne
Potřeba pravidelné údržby	ne (VRLA), ano (zaplav. elektrody)	ano	ne	ne
Pořizovací náklady	80 – 220 \$/kWh	400 – 600 \$/kWh	200 – 400 \$/kWh	200 – 400 \$/kWh

Tabulka 2.2. Porovnání parametrů jednotlivých zkoumaných typů akumulátorů (Zdroj: viz použité zdroje na konci kapitoly 2.2.6)

Ze všech shrnutých informací o jednotlivých typech akumulátorů mohu doporučit pro systém zálohovaného napájení laboratorní techniky **olověné (Pb) akumulátory** a akumulátory založené na bázi lithia typu **LiFePO₄**. Vybral jsem dva různé typy akumulátorů, protože navrhovaný systém zálohovaného napájení bude laboratorního typu. Bude tedy sloužit jako záložní zdroj napájení a zároveň ho bude možné využít pro další práce například jako „zdroj“ cenných informací o stavu a používání různých typů akumulátorů pracujících v jednom systému. Dále také bude možné v budoucnu zjistit přibližnou míru opotřebení různých typů akumulátorů v závislosti na čase používání.

V této kapitole byly použity zdroje: [9], [10], [11], [12], [15], [20], [26], [27], [28], [33], [42], [43].

2.3 Návrh systému pro zálohování napájení

Jedním z úkolů této práce je navrhnout systém pro zálohování napájení časových a frekvenčních etalonů a dalších přístrojů v Laboratoři přesného času a frekvence FEL ČVUT. V předchozích kapitolách byl vysvětlen důvod, proč systém navrhuji, uvedeny základní principy záložních systémů napájení a také vybrány vhodné typy akumulátorů pro tyto systémy. Můžu se tedy pustit přímo do teoretického návrhu vhodného systému.

Základním přístrojem, který má být nezávislý na primárním zdroji napájení je již zmíněný cesiový etalon frekvence 5071A od společnosti *Microsemi* [2]. Ten disponuje vnitřním záložním systémem napájení, který ale nemá dostatečnou kapacitu (dobu zálohování). Tato doba, uvedená v datovém listu, činí pouze 45 minut a je uváděna pro nově zakoupený výrobek, bude se tedy ještě snižovat s časem používání. Je proto vhodné využít externí napájení stejnosměrným napětím v případě výpadku primárního zdroje napájení, kterým je také vybaven. Přístroj bude standardně napájen z primárního zdroje, a pokud rozpozná přerušeni dodávky energie z primárního zdroje napájení, dojde automaticky k přepnutí napájení přístroje na externí zdroj stejnosměrného napětí. Stačí tedy navrhnout záložní externí bateriový systém, který je v tomto případě výhodnější než použití komerčně vyráběné jednotky UPS, u které by docházelo ke ztrátám při převodu napětí. Jedná se o převod z vysoké hodnoty napětí na nízkou pro nabíjení vnitřních akumulátorů jednotky UPS, dále z nízké hodnoty napětí na vysokou pro vytvoření napětí shodného s napětím primárního zdroje a nakonec v zálohovaném zařízení znovu převod z vysoké hodnoty napětí na nízkou pro napájení elektronických obvodů tvořících zálohované zařízení.

Vyvstává zde ale otázka, jakými způsoby napájení budou disponovat další přístroje, které bude nutné připojit k systému zálohovaného napájení. Pokud budu vycházet z předpokladu, že většina laboratorních přístrojů vyžadujících zálohované napájení

disponuje možností připojit externí zdroj stejnosměrného napětí, nic se prozatím v návrhu nemění, pouze je potřeba navrhnout baterii s vhodným napětím a kapacitou pro dostatečný čas zálohování. Problém může nastat v případě, že nějaký z přístrojů nebude sám umět rozpoznat přerušování dodávky energie z primárního zdroje napájení a automaticky přepnout na externí zdroj stejnosměrného napětí. Proto bude dobré tento systém do návrhu také zahrnout. Větší problém ale nastává, pokud bude zapotřebí připojit k systému zálohovaného napájení přístroj, který je možné napájet pouze z primárního zdroje napětí. Potom bude nutné systém vybavit také měničem, který ze stejnosměrného napětí vytvoří napětí střídavé s parametry shodnými s primárním zdrojem napájení. Přes tento měnič poté bude možné k systému zálohovaného napájení připojit již libovolný přístroj, který je standardně napájen z primárního zdroje. Schematické zapojení kompletního systému pro zálohování napájení je uvedeno na obr. 2.13.

První co je nutné vhodně navrhnout, je bateriový systém, od kterého se odvíjejí všechny ostatní navrhované prvky. Jak již bylo zmíněno v kap. 2.2.6, vybrány byly 2 různé typy akumulátorů. Zástupce klasických a nejpoužívanějších akumulátorů v těchto systémech – olověné (Pb) akumulátory, a jako zástupce moderních a perspektivních akumulátorů založených na bázi lithia typ LiFePO₄ (LFP). Bude tedy nutné navrhnout 2 nezávislé bateriové systémy, ze kterých potom bude možné vždy vybrat, který bude aktivní zálohou, a který bude odpojen a bude možné na něm provádět libovolné testy bez přerušování zálohování napájení.

Pro návrh výsledného napětí baterie, ať již Pb nebo LiFePO₄, je důležité vzít v úvahu, jaké akumulátory jsou dobře dostupné, a jaké mají nominální napětí. Dále pak rozsah napětí, které lze připojit k zálohovaným přístrojům, dostupnost nabíječek pro různá napětí baterií a stejně tak i pomocné elektroniky pro LiFePO₄ akumulátory a v neposlední řadě také dostupnost měničů (DC/AC) pro zvolené vstupní napětí.

Nejjednodušší nástin vhodného výsledného napětí baterie můžeme získat ze skutečnosti, že převod napětí z vyšší hodnoty na nižší má vždy vyšší účinnost než z nižší hodnoty na vyšší. Bylo by tedy vhodné navrhnout baterii s co nejvyšším napětím, které by se nacházelo v napětovém rozsahu externího stejnosměrného napájení cesiového etalonu (22 až 42 V). Pokud vezmeme v úvahu nejdostupnější hodnotu napětí u Pb akumulátorů (12 V), pak bychom mohli sériovým spojením 3 takovýchto baterií vytvořit baterii o napětí 36 V. Podobnou baterii bychom vytvořili i sériovým spojením 12-ti jednotlivých článků LiFePO₄ akumulátorů, které mají nominální napětí 3,2 V. Výsledná baterie by tedy měla napětí 38,4 V. Ale toto napětí není úplně nejvhodnější z jiných pohledů na věc. Například nové laboratorní přístroje velmi často podporují spíše nižší napětové rozsahy, v budoucnu by mohl nastat problém s příliš vysokým napětím. Také pro napětí 36 V je mnohem horší dostupnost ostatní elektroniky (nabíječe, BMS, měnič). Bylo by tedy vhodnější zvolit výsledné napětí baterie o hodnotě 24 V,

kteří je nejrozšířenější. K akumulátorům obou dvou typů s napětím 24 V je pomocná elektronika velmi dostupná, a tedy i finančně výhodnější. A i náklady na akumulátory samotné se sníží o 1/3.

Volím tedy výsledné napětí jednotlivých bateriových systémů o hodnotě 24 V. U Pb akumulátorů (baterií) s nejdostupnějším napětím 12 V to znamená pouze 2 Pb baterie spojené do série. U LiFePO₄ akumulátorů, které se prodávají nejčastěji po jednotlivých článcích (3,2 V), se jedná o 8 článků spojených do série, výsledné napětí baterie tedy bude 25,6 V.

Dále je zapotřebí zvolit vhodné kapacity akumulátorů v závislosti na požadované délce provozu zálohovaných zařízení napájených z bateriového záložního systému napájení. Jelikož nebyl zadán požadavek na minimální dobu zálohování, a ani seznam připojených zálohovaných přístrojů, můžeme provést pouze odhad spotřeby a zvolit délku provozu ze záložního systému. Uvažujeme-li, že budou k záložnímu systému napájení připojeny 4 zařízení s průměrným příkonem 50 W (vycházím z informací o cesiovém etalonu frekvence 5071A), pak je okamžitý příkon připojených zařízení 200 W. Dále budu uvažovat dobu zálohovaného provozu těchto 4 zařízení například 6 hodin. V tuto chvíli již můžeme spočítat potřebnou kapacitu bateriových systémů jednotlivých typů. Vycházejme z informace, že doporučená maximální hloubka vybití u LiFePO₄ akumulátorů je 80 % DoD. Pak požadovanou kapacitu LiFePO₄ baterie určíme podle vztahu:

$$C_{LiFePO_4} = \frac{P \cdot t}{U_{bat}} \cdot \frac{1}{DoD} = \frac{200 \text{ W} \cdot 6 \text{ h}}{25,6 \text{ V}} \cdot \frac{1}{0,8} = 58,6 \text{ Ah},$$

kde C_{LiFePO_4} je požadovaná kapacita LiFePO₄ baterie v [Ah], P je okamžitý příkon ve [W], t je požadovaná doba zálohování v [h], U_{bat} je nominální napětí baterie ve [V] a DoD je maximální doporučená hloubka vybití v [%]. Zjištěnou požadovanou kapacitu **LiFePO₄ baterie** (C_{LiFePO_4}) zaokrouhlíme směrem nahoru k nejbližší vyšší běžně prodávané kapacitě těchto akumulátorů. Vhodným akumulátorem může být například *WB-LYP60AHA*¹ od výrobce *GWL/Power* s kapacitou 60 Ah a nominálním napětím 3,2 V (viz obr. 2.9.a). Jelikož jsme tímto akumulátorem schopni splnit požadovanou kapacitu, nemusíme spojovat vytvořené baterie paralelně, ale postačí spojit sériově 8 těchto článků.

Podobným způsobem navrhne i vhodnou kapacitu **Pb baterie**. Vycházejme z informace, že doporučená maximální hloubka vybití u Pb akumulátorů je 40 % DoD. Pak požadovanou kapacitu Pb baterie určíme podle stejného vztahu:

$$C_{Pb} = \frac{P \cdot t}{U_{bat}} \cdot \frac{1}{DoD} = \frac{200 \text{ W} \cdot 6 \text{ h}}{24 \text{ V}} \cdot \frac{1}{0,4} = 125 \text{ Ah}.$$

¹ Akumulátor LiFeYPO₄ WB-LYP60AHA (3,2 V / 60 Ah): <https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/WB-LYP60AHA-LiFeYPO4-3-2V-60Ah.html>

Zjištěnou požadovanou kapacitu Pb baterie (C_{Pb}) bychom měli zaokrouhlit také směrem nahoru, podobně jako u LiFePO4 baterie, ale nejbližší běžně prodávaná kapacita těchto akumulátorů je 120 Ah. Jsou zde tedy 2 varianty. Buď se spokojíme s kapacitou 120 Ah, a tím se zvětší hloubka vybití na 42 % DoD, abychom měli stejnou dostupnou kapacitu jako u LiFePO4 baterie. Nebo budeme nuceni spojit několik sestavených baterií s nižší kapacitou paralelně, ale to je velmi nevhodné z důvodu protékání vyrovnávacích proudů, které by se musely dále řešit například vhodným propojením pomocí diod. Jelikož hodnota 40 % DoD není striktně dána, a většinou se pohybuje v rozsahu 40 až 50 %, pak nejlepším řešením bude výběr akumulátorů s kapacitou 120 Ah pro sestavení výsledné baterie s touto kapacitou. Vhodným akumulátorem může být například OTL120-12¹ od výrobce *GWL/Power* s kapacitou 120 Ah a nominálním napětím 12 V (viz obr. 2.9.b). Jelikož jsme tímto akumulátorem schopni splnit požadovanou kapacitu, nemusíme spojovat vytvořené baterie paralelně, ale postačí spojit sériově 2 tyto baterie.



Obrázek 2.9. Vybrané vhodné akumulátory LiFePO4 (a) a baterie Pb (b)
(Zdroje: a) [44], b) [45])

Máme již zvolené vhodné akumulátory LiFePO4 a baterie Pb, které je potřeba propojit tak, aby bylo možné používat vždy jeden nebo druhý bateriový systém. To můžeme zajistit například spojením pomocí diod, které způsobí to, že bateriové systémy nebudou spojeny paralelně (nebudou mezi bateriovými systémy protékat vyrovnávací proudy) a zároveň při volbě aktivního bateriového systému pomocí spínačů nedojde ke stavu, kdy by nebylo dostupné zálohovací napětí. Toto zapojení je znázorněno na obr. 2.13. Spínače S1 a S3 slouží pro výběr aktivního bateriového systému a spínače S2 a S4 slouží v případě potřeby k odpojení nabíječek od jednotlivých bateriových systémů. Každý bateriový systém je vybaven vlastní pojistkou (Poj1, resp. Poj2). Jejich hodnota by se měla odvíjet od nejvyšší hodnoty přípustné pro použité

¹ Akumulátor Pb OTL120-12 (12 V / 120 Ah): <https://www.i4wifi.cz/Napajeci-zdroje-1/Baterie-pro-zalozni-zdroje/Pb-zalozni-akumulator-VRLA-GEL-12V-120Ah-OTL120-12.html>

přístroje (pravděpodobně se bude jednat o modul SBM, který je schopen pracovat až s proudem 60 A). Proudová hodnota pojistek může být tedy volena 60 A.

Dále bude vhodné navrhnout vhodné nabíječe pro oba bateriové systémy. Nabíječe by měly být schopné pracovat v režimu nabíjení i v režimu udržovacím, který bude šetrný k akumulátorům. Nabíječe samozřejmě musí být dimenzovány na napětí baterie, kterou budou nabíjet. A v neposlední řadě by měly být také dostatečně výkonné, aby byly schopné nabít baterie se zvolenými kapacitami. Pro Pb baterii je potřeba zvolit **nabíječ** schopný nabíjet **Pb baterie typu VRLA** (nejlépe AGM i gelové) s nominálním napětím 24 V a minimálně kapacitou 120 Ah. Takovým nabíječem může být například *DC3713*¹ od výrobce *DECA* (viz obr. 2.10.a), který je schopný nabíjet olověné baterie typu AGM, gelové i se zaplavenými elektrodami trakčního typu s napětím 6, 12 nebo 24 V a kapacitě 30 až 270 Ah. Nabíjecí proud je možné zvolit 7, 15 nebo 25 A a disponuje také udržovacím režimem, takže je možné ho nechat trvale připojenou k baterii.



a)



b)

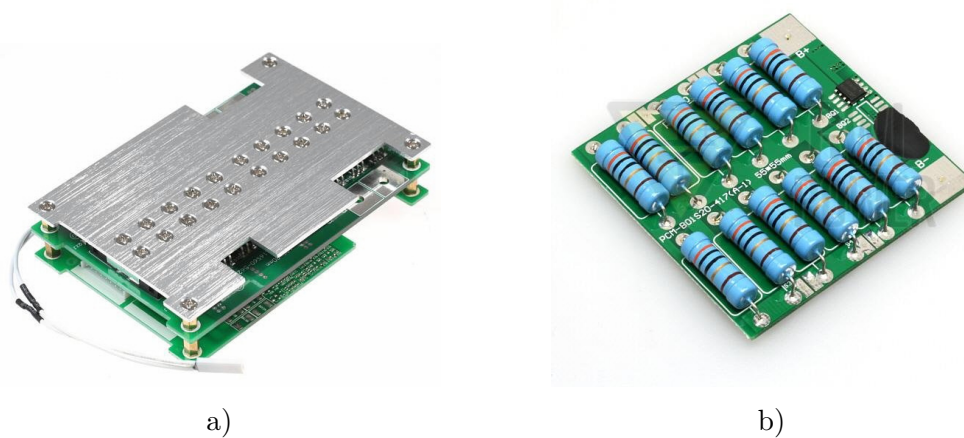
Obrázek 2.10. Vybrané vhodné nabíječe baterií Pb (a) a LiFePO4 (b)
(Zdroje: a) [46], b) [47])

Podobně pro LiFePO4 baterii je potřeba zvolit **nabíječ** přímo navržený **pro LiFePO4 baterie** s nominálním napětím 25,6 V a minimálně kapacitou 60 Ah. Takovým nabíječem může být například *Charger for LFP/LTO cells*² od výrobce *GWL/POWER* (viz obr. 2.10.b), který je schopný nabíjet LiFePO4 a LTO baterie s napětím 24 V (25,6 V). Nabíjecí proud je 20 A při normálním nabíjení a 5 A při pomalém nabíjení. Nabíječ je možné přímo propojit i s BMS systémem, a způsob jakým baterii nabíjí respektuje principy šetrného nabíjení LiFePO4 baterií.

¹ Nabíječ Pb baterií DC3713 (6, 12, 24 V / 25 A): <https://www.himalaj.cz/product/nabijecky-a-testery/397/professionalni-nabijecka-akumulatoru-deca/59115>

² Nabíječ LiFePO4 baterií (24 V / 20 A): <https://www.ev-power.eu/Chargers-6V-to-36V/Charger-24V-20A-for-LFP-LTO-cells-8-cells-BMS-input.html>

Dále je nutné vybrat vhodný systém **SBM (Simple Battery Management)** pro LiFePO₄ bateriový systém. Ten se bude starat o monitorování napětí jednotlivých článků baterie a hlídat, aby žádné nepřesáhlo maximální nebo minimální hodnotu. Pokud by napětí jakéhokoli článku překročilo limitní hodnoty, dojde díky systému SBM k přerušení toku proudu a tím k ochraně nejslabšího článku baterie. SBM systém musí být konstruován na daný počet článků technologie LiFePO₄, a měl správně nastaveny limitní hodnoty napětí. Dále musí umožňovat průtok proudu dostatečné velikosti. Těmto kritériím odpovídá například SBM systém *Simple Battery Management Board 8 cells*¹ od výrobce *GWL/POWER* (viz obr. 2.11.a). Tento SBM systém umožňuje průchozí proud až 60 A a má velmi malou spotřebu ($\leq 20 \mu\text{A}$). Vyrovnávací proud je pouze $72 \pm 10 \text{ mA}$, což je ale obvyklá hodnota u SBM systémů. Pro lepší regulaci proudu jednotlivými akumulátory LiFePO₄ baterie, jak při vybíjení tak i při nabíjení, se používají tzv. „**balancing**“ moduly, které se montují samostatně na jednotlivé akumulátory (články) nezávisle na ostatních zařízeních. Například je možné využít vyrovnávací modul proudu *Cell Balancing Module*² od výrobce *GWL/POWER* (viz obr. 2.11.b), který má vyrovnávací proud až 1,7 A. Použitím těchto modulů dojde k lepší regulaci proudu jednotlivými akumulátory, a tím k prodloužení jejich životnosti.



Obrázek 2.11. Vybrané vhodné SBM (a) a balancing (b) moduly pro LiFePO₄ akumulátory (Zdroje: a) [48], b) [49])

Neměli bychom také zapomenout na **systém detekce výpadku napájení** primárního zdroje. Pokud budou k systému zálohovaného napájení připojena pouze zařízení, která jsou sama schopna rozpoznat výpadek primárního zdroje napájení a přepnout na sekundární zdroj napájení, pak není nutno tuto část do systému vkládat. Předpokládejme ale obecný případ, kdy zapotřebí bude, pak je nutné ho navrhnout a do systému

¹ SBM systém pro LiFePO₄ baterii s 8-mi články (24 V / 60 A): <https://www.ev-power.eu/Battery-Management/Simple-Battery-Management-Board-8-cells-24V-60A.html>

² Cell Balancing Module pro LiFePO₄ (3.60V- 1.7A): <https://www.ev-power.eu/Battery-Management/Cell-Balancing-Module-3-60V-1-7A.html>

osadit. Takovým zařízením může být například *Detektor napětí 110-230V*¹ od výrobce *HW group s.r.o.* (viz obr. 2.12.a). Jedná se o jednoduché zařízení, které pouze monitoruje napětí primárního zdroje napájení, a pokud detekuje výpadek, sepne bezpotenciálový kontakt, pomocí kterého je možné dále ovládat například relé. Maximální zatížení tohoto kontaktu je 50 V / 130 mA. Můžeme tedy přes tento kontakt zapojit cívku relé k napětí z bateriových systémů (24 V) odebrané v místě mezi diodami D1 a D2. Toto relé bude pomocí spínače S5 přivádět stejnosměrné napětí systému zálohovaného napájení k zálohovaným zařízením a pomocí přepínače S6 (druhý kontakt použitého relé) je voleno střídavé napájení pro zařízení, která nemají možnost stejnosměrného napájení (AC napětí z primárního zdroje napájení, nebo AC napětí z měniče – ze systému zálohovaného napájení).



Obrázek 2.12. Vybraný vhodný detektor výpadku napájení (a) a měnič (b)
(Zdroje: a) [50], b) [51])

Poslední částí navrhovaného systému pro zálohování napájení je **měníč**, pomocí kterého bude možné připojit k zálohovanému napájení i zařízení, které má pouze možnost napájení střídavým napětím 230 V. Měníč je napájen stejnosměrným napětím z bateriového systému (24 V) a na jeho výstupu je střídavé napětí se stejnými parametry jako má napětí primárního zdroje napájení. Jelikož bude sloužit k napájení laboratorních, tedy citlivých, přístrojů, je důležité vybrat měnič, který má tvar výstupního napětí sinusového průběhu. Levnější měniče mají tvar výstupního napětí ve formě obdélníkem modifikovaného sinusového průběhu, nebo se jedná pouze o obdélníkový průběh, což je pro citlivá zařízení nepřijatelné. Jako vhodný měnič může být vybrán například *P1000U-242*² od výrobce *CarSpa* (viz obr. 2.12.b), jehož výstupní napětí je čistého sinusového průběhu, trvalé možné zatížení 1000 W a špičkové až 2000 W. Měl by tedy být výkonově dostačující pro různé laboratorní přístroje.

¹ Detektor výpadku napájení (110-230V): http://www.obchod.hw.cz/detektor-napeti-110-230v_d43273.html

² Měníč P1000U-242 (24 V /230 V – 1000 W): <https://www.deramax.cz/menic-napeti-p1000u-242-24v-230v-1000w-cista-sinusovka-carspa>

Položka	Kusů	CZK / kus	Celkem CZK
Pb baterie 12 V / 120 Ah	2	4 620	9 240
LiFePO4 akumulátory 3,2 V / 60 Ah	8	1 626	13 008
Nabíječ Pb baterie 24 V / 25 A	1	5 690	5 690
Nabíječ LiFePO4 baterie 24 V / 20 A	1	2 833	2 833
SBM pro LiFePO4 baterie 24 V / 60 A	1	2 055	2 055
Balancing moduly pro LiFePO4 baterie (3,6 V / 1,7 A)	8	85	680
Měnič napětí 24 V / 230 V – 1000 W	1	3 880	3 880
Detektor výpadku napájení 230 V AC	1	1 365	1 365
Celkem			38 751

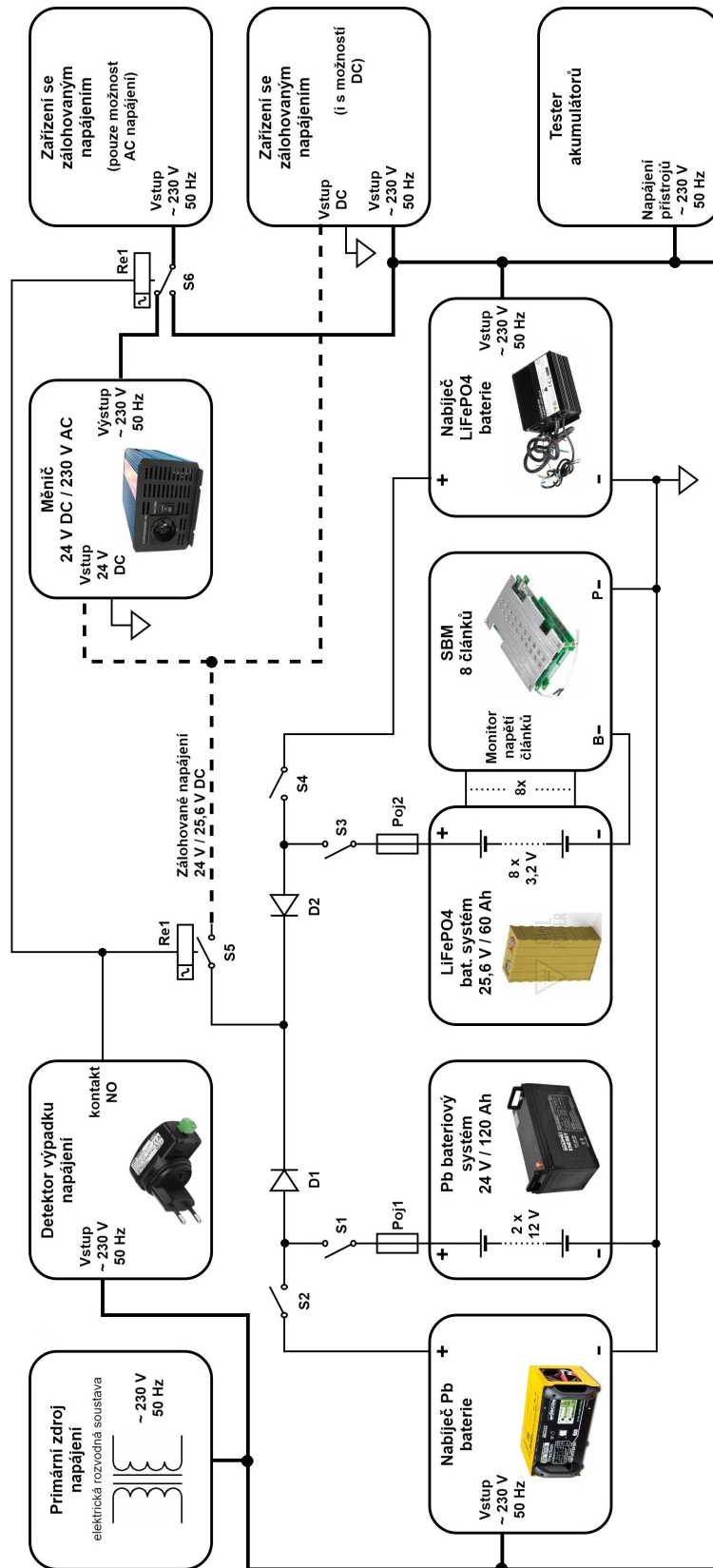
Tabulka 2.3. Cenová kalkulace nákladů na pořízení systému pro zálohování napájení
(Zdroje: [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51])

Položka	Celkem CZK
Pb bateriový systém	14 930
LiFePO4 bateriový systém	18 576
Nezávislá část – nutná pro oba druhy systémů	5 245
Celkem	38 751

Tabulka 2.4. Porovnání nákladů na pořízení jednotlivých částí systému pro zálohování
napájení (Zdroje: [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51])

Tím je navržen celý systém pro zálohování napájení. Jeho schematické zapojení je uvedeno na obr. 2.13. Nakonec by bylo vhodné provést přibližnou cenovou kalkulaci nákladů na pořízení tohoto systému. Tato cenová kalkulace nákladů je uvedena v tab. 2.3. Jsou v ní započítány všechny zvolené položky systému pro zálohování napájení. Ceny uvedené v tabulce jsou získané z internetových stránek, které byly vždy uvedeny u zvoleného prvku systému, a jsou platné k datu 14.5.2018.

Podle této cenové kalkulace můžeme určit náklady na část systému, která je tvořena Pb akumulátory, LiFePO₄ akumulátory a na nezávislou, která je nutná u obou dvou systémů. Tato informace může sloužit pro porovnání pořizovacích nákladů Pb bateriového systému a LiFePO₄ bateriového systému, nebo pro možnost snížení pořizovacích nákladů celého systému zálohovaného napájení výběrem pouze jednoho typu akumulátorů. Toto cenové srovnání je uvedeno v tab. 2.4. Můžeme tedy říci, že pořizovací náklady LiFePO₄ bateriového systému se stejnou dostupnou kapacitou jsou pouze o 25 % vyšší než u Pb bateriového systému. Pokud ale vezmeme v úvahu životnost obou typů akumulátorů udanou v počtu cyklů, vycházejí rozhodně výhodněji akumulátory typu LiFePO₄, které mají až 10 krát vyšší počet cyklů než akumulátory Pb.



Obrázek 2.13. Schematické zapojení kompletního systému pro zálohování napájení
(Zdroje použitých obrázků: [44], [45])

Kapitola 3

Metody zjišťování stavu akumulátorů

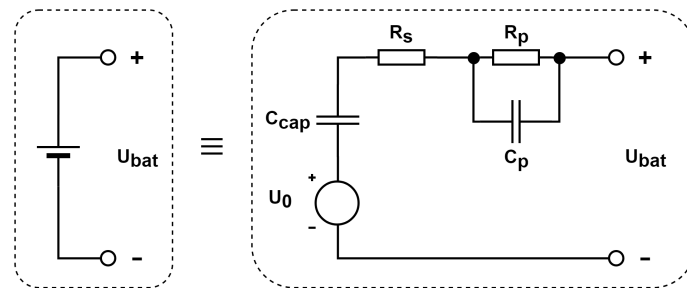
Abychom se mohli zabývat různými metodami zjišťování stavu akumulátorů a dále je také implementovat v testeru akumulátorů, musíme nejdříve definovat jejich důležité parametry.

Existuje velké množství různých parametrů akumulátorů. Některé uvádí výrobce přímo v jeho datovém listu, jiné jsou známy díky různým provedeným testům na podobných akumulátorech. Většina těchto známých parametrů je navíc závislá na různých veličinách, a nebo jsou na sobě vzájemně závislé. Mezi důležité parametry akumulátorů, pro jejich správné provozování a zjišťování jejich stavu, patří:

- svorkové napětí a pracovní rozsah napětí,
- kapacita,
- nabíjecí parametry (optimální a maximální nabíjecí proud, hodnota napětí pro ukončení nabíjení, hodnota napětí v udržovacím režimu, popř. různé nabíjecí křivky),
- vybíjecí parametry (maximální vybíjecí proud, minimální napětí článku pro daný vybíjecí proud, optimální a maximální DoD),
- vnitřní odpor,
- samovybíjení,
- závislost dostupné kapacity na provozní teplotě,
- životnost (udaná jako počet roků – časová degradace použitých materiálů, a jako počet cyklů).

3.1 Parametry akumulátorů

Popis parametrů akumulátorů je nejvhodnější začít náhradním elektrickým schématem akumulátoru (vnitřní model). Náhradní schéma uvedené na obr. 3.1 je zjednodušené schéma se soustředěnými parametry. Tato forma modelu je nejčastěji užívaná a pro tuto práci zcela dostačující. Skládá se z ideálního zdroje stejnosměrného napětí U_0 , který reprezentuje výstupní napětí naprázdno, kondenzátoru C_{cap} , který reprezentuje celkovou kapacitu akumulátoru, rezistoru R_s , který reprezentuje elektrický odpor celé vodivé cesty v akumulátoru a paralelní kombinace rezistoru R_p a kondenzátoru C_p , která reprezentuje difuzi a přenos náboje mezi elektrolytem a elektrodami akumulátoru. Výstupní napětí označené U_{bat} je svorkovým napětím akumulátoru (článku). [52]



Obrázek 3.1. Náhradní elektrické schéma akumulátoru – vnitřní model

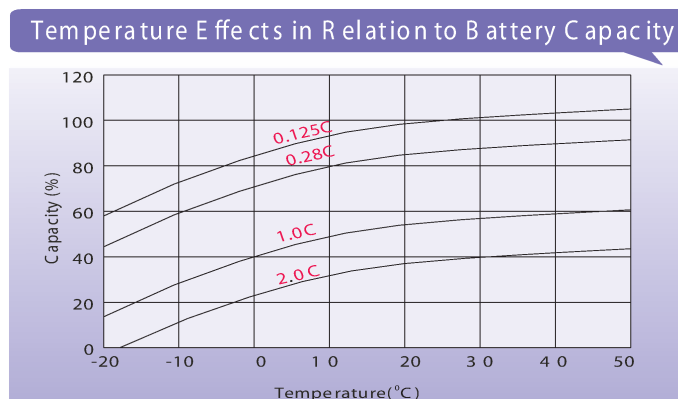
Nezákladnějším parametrem každého akumulátoru je jeho **svorkové napětí**, které také může být označované jako nominální. Svorkové napětí udané u akumulátoru, který je tvořen pouze jedním článkem, je též *nominálním napětím článku*. U baterie tvořené pospojovanými jednotlivými články (např. běžné Pb baterie), je *nominální napětí článku* možné zjistit vydělením svorkového napětí počtem článků sériově spojených v baterii. Dále se uvádí také **pracovní rozsah napětí**. Obecně se jedná o rozsah napětí zdola omezený doporučeným napětím pro ukončení vybíjení a shora omezený doporučeným napětím pro ukončení nabíjení.

Druhým základním parametrem každého akumulátoru je jeho **jmenovitá kapacita**. Je vždy uvedena výrobcem, a jedná se o nominální kapacitu nového akumulátoru definovanou vybíjecím testem. Tento test se provádí při dané okolní teplotě vybíjením konstantním proudem po určitou dobu (většinou 5, 10 nebo 20 hodin) až do konečného vybíjecího napětí článku. Více o tomto testu viz 3.2.4. Termínem podobným je **dostupná kapacita**, která se od jmenovité kapacity může lišit. Dostupná kapacita může být nižší, ale i vyšší, než jmenovitá a její velikost závisí na vybíjecím proudu, napětí článku pro ukončení vybíjení, okolní teplotě a v neposlední řadě také stářím akumulátoru, a to jak fyzickým (počet let od výroby), tak i počtem vykonaných cyklů. Dostupná kapacita rapidně klesá s počtem cyklů s velkou hloubkou vybití (DoD) a vzrůstá se zvyšující se pracovní teplotou (viz obr. 3.2). Ta má ale neblahý vliv na životnost akumulátoru. [19]

S kapacitou akumulátoru úzce souvisí pojem *State of Charge* (SoC) – stav nabití. Jedná se o procentuální vyjádření aktuálně dostupné kapacity v akumulátoru. Pokud je akumulátor plně nabit, je dostupná kapacita nejvyšší a $\text{SoC} = 100\%$, naopak pokud je akumulátor plně vybitý, pak je $\text{SoC} = 0\%$. Pojmem podobným je *Depth of Discharge* (DoD) – hloubka vybití, který je inverzí SoC a jeho jednotkou jsou také procenta. Oba tyto pojmy jsou vzájemně záměnné. SoC se většinou používá pro vyjádření aktuální dostupné kapacity, na rozdíl od DoD, kterým se vyjadřuje například maximální a doporučená hloubka vybíjení daného typu akumulátoru.

Vztah mezi kapacitou akumulátoru udávanou v ampérhodinách (Ah) a kapacitou kondenzátoru C_{cap} v náhradním schématu je evidentní. Jelikož kapacita C se dá vyjádřit jako $C = Q/U$ a zároveň také platí $Q = I \cdot t$, můžeme psát, že $C \cdot U = I \cdot t$.

Tedy kapacita udaná ve Faradech je to samé jako kapacita udaná v ampérsekundách podělená napětím ($C = (I \cdot t)/U$; [F; (A·s)/V]). Pokud pro ilustraci vezmeme uvažovanou Pb baterii 12 V / 120Ah, pak bude mít kondenzátor C_{cap} , náhradního elektrického schématu akumulátoru, hodnotu 36 000 F.

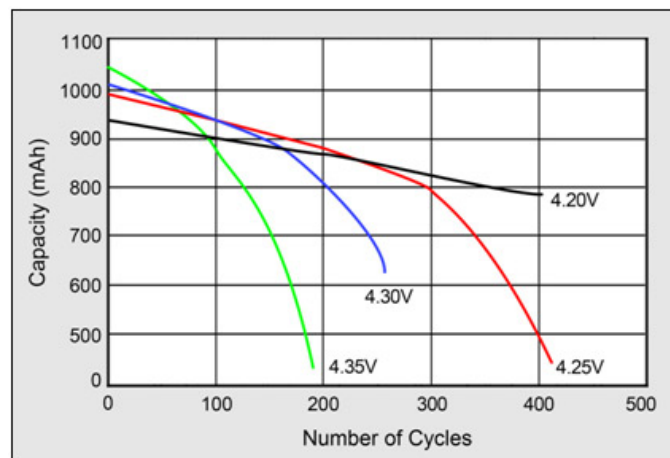


Obrázek 3.2. Závislost kapacity Pb baterie na pracovní teplotě (Zdroj: [14])

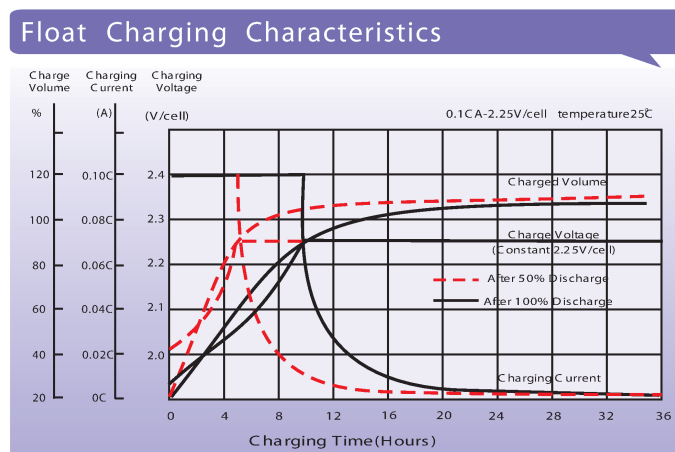
Velice důležitými parametry akumulátoru, u kterých vždy uvádí výrobce doporučené hodnoty, jsou **nabíjecí parametry**. Ty je bezpodmínečně nutné dodržovat, neboť překročení těchto hodnot má vždy za následek zkrácení životnosti akumulátoru a snížení maximální možné kapacity. Jedním z těchto parametrů je **optimální a maximální nabíjecí proud**, který bývá uveden přímo v jednotkách *Ampér*, nebo jako násobek jmenovité kapacity akumulátoru (C). Pokud překročíme hodnoty nabíjecího proudu, nebudeme schopni dosáhnout plné kapacity a zároveň dochází k nadměrnému ohřívání akumulátoru, které vede ke zkrácení jeho životnosti. Dalším parametrem je **napětí pro ukončení nabíjení**, které bývá označované jako „cyklovací“. Pokud budeme nabíjet akumulátor na vyšší, než doporučené napětí, dosáhneme vyšší dostupné kapacity, ale pouze na začátku životního cyklu akumulátoru, který se rapidně snižuje a snižuje se také maximální kapacita. Tento jev je dobře patrný z grafu na obr. 3.3. Akumulátor může být trvale připojen na nabíječku a dobíjen pouze tzv. **udržovacím napětím**, které bývá označované jako „standby“, „trickle“ nebo „float“. V tomto režimu je na výstupu nabíječky konstantní napětí, které udržuje akumulátor stále plně nabitý, což ale zkracuje životnost akumulátoru. Před nabíjením akumulátorů je dobré se vždy seznámit s jejich **nabíjecími křivkami**. Ty udávají průběhy napětí a nabíjecího proudu během celého procesu nabíjení. Je z nich také patrné, kdy má dojít k přepnutí režimu nabíjení z konstantního proudu (CC) na režim konstantního napětí (CV). Pro ukázkou jsou na obr. 3.4 uvedeny nabíjecí charakteristiky Pb baterie *Leaftron LTX12-5.4*.

Dalšími parametry akumulátorů, které jsou vždy výrobcem udány, jsou **vybíjecí parametry**. Patří mezi ně například **maximální vybíjecí proud**, který je ale akumulátor většinou schopný dodávat po dobu pouze několika sekund. A velmi důležité vybíjecí charakteristiky, které dávají do souvislosti vybíjecí proud, minimální napětí

článku pro ukončení vybíjení a čas, po který je možné takto akumulátor vybíjet. Tyto charakteristiky mohou být uvedeny ve formě grafu, jako například u Pb baterie *Leaftron LTX12-5.4* (viz obr. 3.5), nebo ve formě tabulky. Místo proudu pro vybíjení konstantním proudem mohou být k dispozici také hodnoty pro vybíjení konstantním výkonem. Pro vybíjení akumulátoru je také dobré znát optimální a maximální hloubku vybití (DoD), která ale nebývá vždy výrobcí uváděna. Přitom je známo z dlouhodobého pozorování a měření na různých typech akumulátorů, že hloubka vybití přímo ovlivňuje životnost akumulátoru. Tato závislost je například uvedena v datovém listu Pb baterie *Panasonic LC-R127R2PG*, která je zobrazena na obr. 3.6.

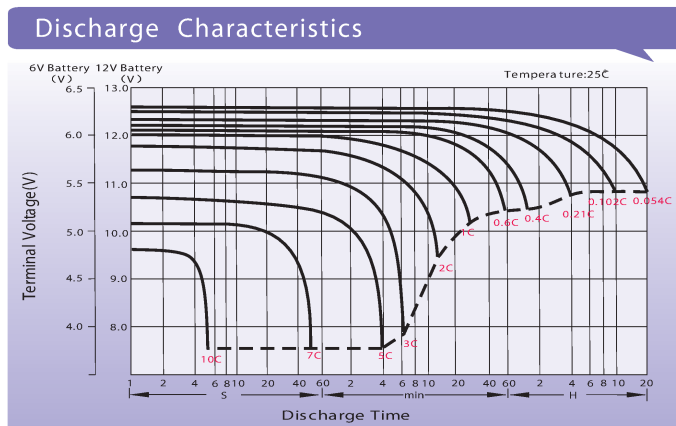


Obrázek 3.3. Závislost kapacity a životnosti Li-Ion akumulátoru na hodnotě napětí pro ukončení nabíjení (Zdroj: [42])

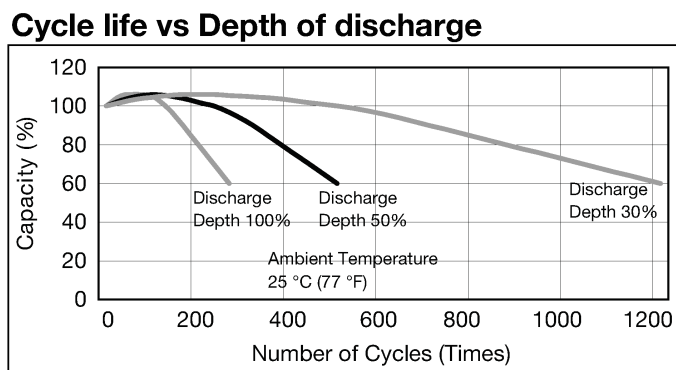


Obrázek 3.4. Nabíjecí charakteristiky Pb baterie Leaftron LTX12-5.4 (Zdroj: [14])

Velmi důležitým parametrem pro návrh vhodného akumulátoru z hlediska velikosti proudu, který je schopen dodávat, je jeho **vnitřní odpor**. Čím nižší je jeho velikost, tím vyšší proudy je schopen akumulátor dodávat a dojde k nižšímu poklesu svorkového



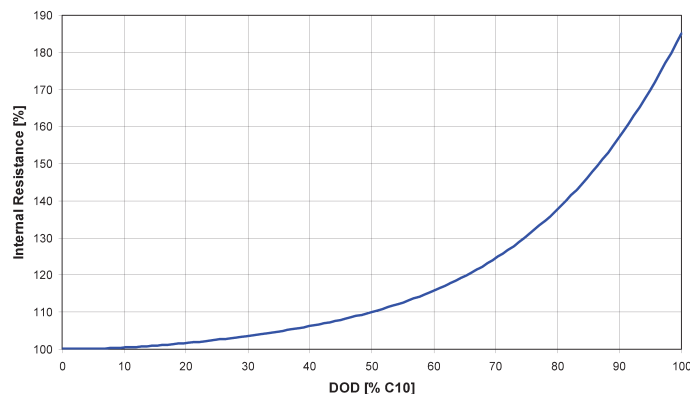
Obrázek 3.5. Vybíjecí charakteristiky Pb baterie Leaftron LTX12-5.4 (Zdroj: [14])



Obrázek 3.6. Závislost životnosti Pb baterie na hloubce vybití DoD (Zdroj: [12])

napětí při velkém zatížení. Vnitřní odpor akumulátorů je ovlivněn mnoha veličinami a podněty. Je závislý na hloubce vybití (DoD), tedy na dostupné kapacitě. Tuto závislost ukazuje například obr. 3.7. Bohužel je ale velmi proměnlivá a výrobci ji u akumulátorů neuvádějí. Pokud bychom znali tuto závislost u daného akumulátoru, byli bychom schopni jednoduše a rychle říci jakou má akumulátor aktuálně dostupnou kapacitu (SoC). Vnitřní odpor je ale také velmi závislý na pracovní teplotě akumulátoru. Jeho hodnota vzrůstá s klesající teplotou. A dále je také závislý na stavu akumulátoru. Obzvláště u olověných akumulátorů je známo, že během jejich životního cyklu jejich vnitřní odpor mírně roste, ale u konce životnosti začne narůstat rychleji. Je to dáno tím, že během životního cyklu dochází k sulfataci na elektrodových mřížkách a k jejich korozi. Tím se zmenšuje plocha dostupná pro přenos náboje a zvětšuje se tedy odpor vodivé cesty. Tohoto jevu se dá výborně využít pro odhad stavu olověných akumulátorů. U akumulátorů založených na bázi lithia tohoto jevu bohužel nelze využít, protože jejich vnitřní odpor se v průběhu životního cyklu téměř nemění. [19], [53], [54]

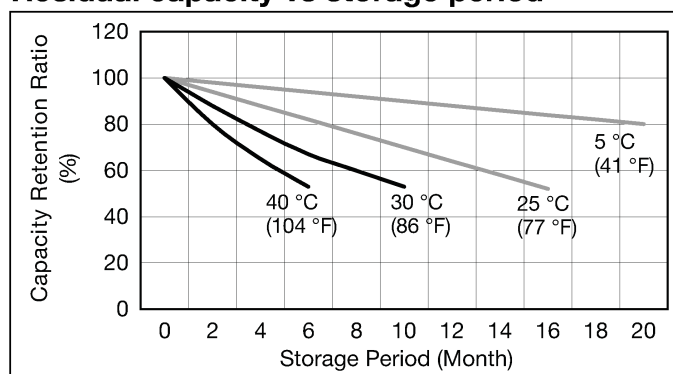
Dalším parametrem, který bývá výrobcem uváděn, je vnitřní **samovybití** akumulátoru. Je to nežádoucí jev, díky kterému nepoužívaný akumulátor ztrácí pomalu svou dostupnou kapacitu. Udává se většinou v procentech celkové kapacity, kterou



Obrázek 3.7. Závislost vnitřního odporu Pb baterie na hloubce vybití DoD (Zdroj: [53])

akumulátor ztratí za určitý počet měsíců. Vnitřní samovybíjení je také závislé na okolní (skladovací) teplotě. Tyto závislosti jsou zobrazeny v grafu na obr. 3.8. Velikost vnitřního samovybíjení se také zvětšuje se stářím akumulátoru. Navíc je velmi složité měřit jeho aktuální hodnotu, a stává se tedy velkým problémem například u měřicí metody „Coulomb counting“ (více viz kap. 3.2.5), nebo u pravidelného dobíjení, kde se intervaly dobíjení se stářím akumulátoru zkracují. [19], [42]

Residual capacity vs storage period



Obrázek 3.8. Závislost kapacity Pb baterie na délce uskladnění a okolní teplotě – samovybíjení (Zdroj: [12])

Dále u akumulátorů existuje **závislost dostupné kapacity na provozní teplotě**. Ta není přímo parametrem akumulátoru, ale je zásadní pro provoz akumulátorů a bývá udaná výrobcem. Příklad této závislosti pro Pb baterie je uveden na obr. 3.2. Ta říká, že dostupná kapacita u olověných akumulátorů klesá s klesající teplotou a vzrůstajícím vybíjecím proudem. Tato závislost je obecně známá u startovacích baterií, kde v zimě není baterie schopna dodat dostatečný proud a nastartovat motor automobilu. Při vyšších teplotách je sice dostupná kapacita vyšší, ale na úkor životnosti akumulátoru, protože vysoké teploty ji zkracují. Je nutné s touto závislostí počítat již při návrhu prostoru, kde budou akumulátory provozovány. Pokud by byly akumulátory umístěny například v místnosti, kde se nacházejí elektronická

zařízení produkující velké množství tepla, bude nutné zajistit větrání, nebo chlazení místnosti klimatizační jednotkou. Jen tak může být zajištěna dlouhá životnost akumulátorů. Pokud by byly akumulátory provozovány v chladném prostředí, musíme počítat se sníženou dostupnou kapacitou a u některých typů akumulátorů založených na bázi lithia také se zkrácením jejich životnosti. Abychom tomuto zabránili, museli bychom prostor vytápět, což je ale podobně jako chlazení energeticky náročné. [42], [55]

Posledním uvedeným parametrem akumulátorů je jejich **životnost**. Ta bývá uváděna ve dvou formách. Za prvé jako průměrný počet let, než dojde k výraznému poklesu jejich kapacity způsobené časovou degradací použitých materiálů, tedy jejich fyzickým zestárnutím a zhoršením vlastností. Tato doba bývá u standardních Pb baterií typu VRLA v rozmezí 3 až 5 let. Jsou ale dostupné i varianty pro náročné aplikace, u kterých je tato doba 5 až 9 let, nebo dokonce více než 10 let pro speciální aplikace („provozy jaderných elektráren, objekty a budovy důležité pro obranu státu“ [55]). Tato doba je samozřejmě, jako jiné veličiny, závislá na provozní a skladovací teplotě, počtu hlubokých vybití a obecně na zacházení s akumulátorem.

A za druhé se životnost akumulátorů udává jako počet nabíjecích / vybíjecích cyklů. Cyklus je definován jako vybití akumulátoru na doporučenou hodnotu DoD, a následné plné nabití akumulátoru. Většinou se udává, že konec životnosti akumulátoru nastává v okamžiku, kdy jeho maximální dostupná kapacita poklesne na 80 % jmenovité kapacity [56]. Jiné zdroje ale uvádějí, že konec životnosti nastává až při 70 % [57], nebo dokonce až při 60 % [58]. Ať je již životnost akumulátorů definována jakkoliv, je vždy důležité při návrhu systému vzít v úvahu jeho specifika a podle toho rozhodnout, kdy budeme považovat akumulátory za nevyhovující. Životnost akumulátorů definovaná počtem cyklů se většinou používá u akumulátorů provozovaných v cyklovacím režimu, tedy požadujeme od něj co nejvíce provedených cyklů, na rozdíl od akumulátorů, které jsou po většinu času své životnosti plně nabitě a „čekají“ na okamžik, kdy bude potřeba odebrat z nich energii – akumulátory v zálohovacích systémech s ojedinělými výpadky. [55]

Jak již bylo v předchozích odstavcích zmíněno, životnost akumulátoru závisí na mnoha faktorech. Mezi ty nejhlavnější patří hloubka vybíjení (DoD), velikost vybíjecího proudu, provozní teplota, velikost napětí pro ukončení nabíjení, způsob udržování akumulátoru v nabitěm stavu, nebo způsob jeho skladování.

S životností akumulátoru úzce souvisí pojem *State of Health* (SoH), volně překládaný jako stav akumulátoru. Jedná se o procentuální vyjádření aktuálního stavu akumulátoru vzhledem k jeho životnímu cyklu. Můžeme říci, že nový akumulátor má SoH = 100 %, a naopak akumulátor, který již dosáhl konce životnosti má SoH = 0 %. State of Health závisí především na vnitřním odporu akumulátoru (lépe na vnitřní impedanci), maximální dostupné kapacitě, velikosti samovybíjení a počtu provedených cyklů. Vyhodnocení této hodnoty je velmi složité a provádí se pomocí různých metod porovnávání parametrů s vazbou na komplikované modely akumulátorů. Použitím běžných metod

zjišťování parametrů akumulátorů, lze hovořit pouze o orientačním údaji o stavu akumulátoru. [59]

3.2 Metody testování parametrů akumulátorů

Metod pro zjišťování, nebo testování, různých parametrů akumulátorů existuje velké množství, ale princip většiny z nich není zveřejněn, protože se jedná o „know-how“ firem, které je vynalezly. Metody, které jsou publikované, jsou většinou metody základní a vycházejí z obecných znalostí o akumulátorech. Proto metody, které zde uvádím, jsou pouze ty, jejichž princip, nebo alespoň základní myšlenky, byly publikovány.

Metody testování parametrů akumulátorů se dají rozdělit například podle délky trvání testu na dlouhé a rychlé. Princip **dlouhých testů** nebývá složitý, ani náročný na měřicí přístroje, a tyto testy bývají velmi přesné, ale trvají vždy několik hodin až dní, což je někdy nepřijatelné. Proto existují **rychlé testy**, které trvají pouze několik sekund, nebo dokonce zlomky sekund, ale většinou se jedná o metody náročné na měřicí techniku a ani vyhodnocení nebývá jednoduché.

Jiné dělení může být na metody založené na analogovém měření nebo digitálním vyhodnocení. Metody využívající *digitálního vyhodnocení* jsou většinou založeny na základě monitorování náboje dodaného do akumulátoru a odebraného z akumulátoru. Většina metod je založena na *analogovém měření*, a to v časové nebo kmitočtové oblasti. Existují také metody *hybridní*, které jako základ využívají analogového měření a pro další vyhodnocení využívají digitální modely akumulátorů a dějů v nich probíhajících.

Mezi metody testování parametrů akumulátorů, založené na **analogovém měření**, patří [60], [61], [62], [63], [64], [65]:

- **Open Circuit Voltage (OCV)** – metoda odhadu SoC na základě měření svorkového napětí akumulátoru naprázdno,
- **Měření vnitřního odporu / impedance** – měření DC (vnitřní odpor) nebo AC (vnitřní impedance), možnost odhadu SoC i SoH a odhalení určitých vad akumulátoru,
- **Full cycle** – přesná metoda zjištění maximální dostupné kapacity a efektivity nabíjení,
- **Rapid tests** – v *časové oblasti* můžeme zjistit vnitřní odpor a tok iontů mezi elektrodami, ve *frekvenční oblasti* můžeme zjistit kapacitu,
- **BMS (Battery Management System)**, nebo *Battery sensor* – monitoruje napětí, proud a teplotu akumulátoru, umožňuje monitorování náboje a odhad SoC,
- **CCA measure** – umožňuje odhad tzv. CCA (Cold Cranking Amps = startovací proud za studena),

- **Electrochemical Dynamic Response (EDR)** – je varianta *Rapid testu* v časové oblasti, která zjišťuje tok iontů mezi elektrodami (dynamiku reakcí akumulátoru na zatížení a zotavení),
- **Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)** – je varianta *Rapid testu* ve frekvenční oblasti, která umožňuje odhad kapacity, CCA a SoC.

Mezi metody testování parametrů akumulátorů, využívající **digitálního vyhodnocení**, patří [60], [61], [62]:

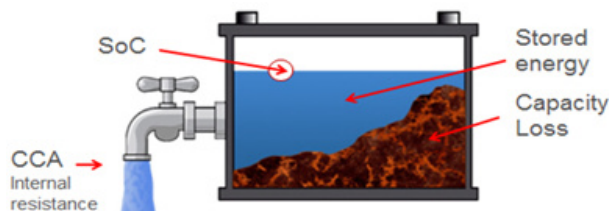
- **Coulomb counting** – metoda monitorování náboje dodaného do akumulátoru a odebraného z akumulátoru, která umožňuje odhad SoC,
- **Read And Charge (RAC)** – metoda, která zjišťuje SoC vlastním filtrovacím algoritmem, po nabití akumulátoru dojde k sečtení dodaného náboje a korekci aktuálního SoC (RAC technologie je vyvíjena společností *Cadex*),
- **State of Life Indicator (SOLI)** – metoda, která odhaduje SoH na základě počítání dodaných nábojů akumulátorem během celé jeho životnosti. V průběhu se SoH snižuje podle počtu dodaných nábojů, které jsou vztaženy k parametrům a závislostem udanými výrobcem (napětí, kapacita, počet cyklů). SOLI technologie je vyvíjena společností *Cadex*.

Samozřejmě existuje řada dalších metod testování různých parametrů akumulátorů, které jsou ale většinou mnohem složitější. Bývají založeny na komplexních modelech akumulátorů a vývoji jejich parametrů v čase. Tyto metody jsou vyvíjeny různými společnostmi a vědeckými pracovníky na univerzitách z celého světa. Patří mezi ně například:

- Battery Parser [62],
- Quick-sort Model Specific (QSMS) [63],
- Neural network [60],
- Fuzzy logic [60],
- Support vector machine [60],
- Kalman filter [60],
- Extend Kalman filter [60],
- Sliding mode observer [60],
- Durability external characteristic [60],
- Sample entropy [60],
- Adaptive control system [60].

Dále se budu podrobněji zabývat pouze některými metodami vyjmenovanými u analogového měření a digitálního vyhodnocení, protože problematika ostatních vyjmenovaných metod je příliš obsáhlá, a byla by spíše předmětem jiné závěrečné práce.

Než se ale začnu věnovat rozboru vybraných metod, bylo by vhodné nejdříve vysvětlit rozdíly mezi pojmy kapacita, SoC a CCA, které byly používány u stručného popisu metod a budou používány dále. Pro vysvětlení se velmi hodí obr. 3.9, na kterém jsou tyto pojmy srozumitelně ukázány.



Obrázek 3.9. Grafická ilustrace pojmu kapacita, SoC a CCA (Zdroj: [66])

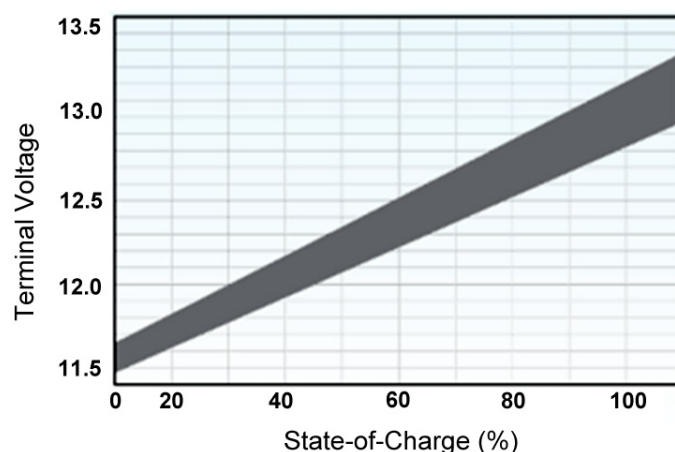
Dostupná kapacita, na obrázku znázorněna jako objem vody v nádrži („Stored energy“), představuje energii uloženou v akumulátoru. Je to schopnost akumulátoru uchovávat a následně dávat k dispozici elektrickou energii. Její hodnota bývá udávána v jednotkách ampérhodin (Ah) nebo alternativně jako „Reserve Capacity“ (RC) v minutách. Ztráta kapacity akumulátoru, na obrázku znázorněná jako nános usazenin („Capacity loss“), je rozdíl mezi jmenovitou hodnotou kapacity a maximální dostupnou kapacitou akumulátoru. U olověných akumulátorů může představovat sulfataci a korozi elektrodových mřížek, které snižují plochu dostupnou pro výměnu náboje mezi elektrodou a elektrolytem.

Dále se využívá pojmu *Cold Cranking Amps* (CCA), což je ve volném překladu startovací proud akumulátoru za chladných podmínek. Na obrázku je znázorněn jako proud tekutiny vytékající ventilem z nádrže. Je to hodnota velmi důležitá u startovacích akumulátorů, protože udává startovací proud, který je akumulátor schopen dodat při teplotě -18 °C po dobu 30 sekund bez toho, aby svorkové napětí pokleslo pod 7,2 V. CCA přímo závisí na vnitřním odporu akumulátoru (na obrázku reprezentovaný ventilem). Čím větší bude vnitřní odpor akumulátoru, tím menší bude proud, který bude akumulátor schopen dodat. CCA určitým způsobem závisí i na dostupné kapacitě akumulátoru, protože hodnota vnitřního odporu se zvětšuje se snižující se dostupnou kapacitou, ale nedává nám žádnou informaci o dostupné kapacitě.

Posledním pojmem je v této práci často zmiňovaný pojem *State of Charge* (SoC), který je na obrázku znázorněn jako hladina kapaliny v nádrži. SoC úzce souvisí s dostupnou kapacitou akumulátoru a je velmi často používán pro uvedení přibližného stavu nabití akumulátoru v procentech. Jak je i na obrázku znázorněno, udává ale spíše procentuální hodnotu stavu nabití vzhledem ke jmenovité kapacitě, než k dostupné kapacitě, která by byla pro praktické použití výhodnější. Hodnota SoC se může blížit odhadu dostupné kapacity akumulátoru při použití určitých metod zpřesňování odhadu hodnoty SoC. [66], [67]

3.2.1 Odhad SoC pomocí svorkového napětí

Jedná se o nejzákladnější a pravděpodobně i nejjednodušší metodu pro odhad stavu nabití akumulátoru (SoC). Tato metoda je založena na měření svorkového napětí akumulátoru naprázdno. Následný odhad SoC je proveden na základě známých závislostí výstupního svorkového napětí akumulátoru na stavu nabití akumulátoru. V horším případě, pokud nemáme k dispozici tuto závislost, můžeme vycházet z interpolace vybíjecí charakteristiky (například i akumulátorů na bázi lithia).

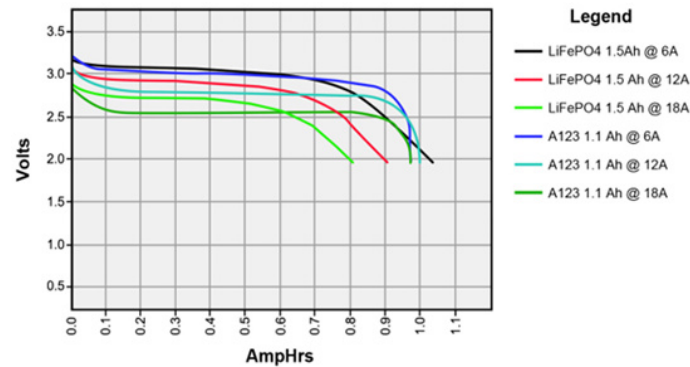


Obrázek 3.10. Závislost svorkového napětí naprázdno na stavu nabití Pb akumulátoru o nominálním napětí 12 V (Zdroj: [68])

U olověných akumulátorů závislost svorkového napětí naprázdno na stavu nabití akumulátoru známe, a je téměř lineární (viz obr. 3.10). Díky této závislosti jsme schopni dosáhnout velmi dobrých výsledků odhadu SoC (viz provedený test uvedený v kap. 5.7). U akumulátorů na bázi lithia bohužel takto obecná závislost většinou není k dispozici, a museli bychom vycházet z interpolace vybíjecích charakteristik, které jsou obzvláště u typu LiFePO4 (viz obr. 3.11) velmi ploché a rozdíl svorkového napětí naprázdno plně nabitého a plně vybitého akumulátoru je minimální. U typu LiFePO4 je to pouze 0,5 až 0,8 V, což je pro rozumný odhad SoC téměř nepoužitelné. Aby bylo měření alespoň pro přibližný odhad přijatelné, bylo by zapotřebí velmi přesného měření a zajistit minimální rušení a stejné teplotní podmínky při každém měření. Z těchto důvodů je tato metoda pro akumulátory na bázi lithia nevhodná a téměř nepoužitelná.

Jak již bylo v předchozím odstavci zmíněno, tato metoda je velmi vhodná pro odhad SoC u olověných akumulátorů. Můžeme si vyjádřit ze závislosti uvedené na obr. 3.10 rovnici přímky

$$SoC = \frac{100}{1,4}U_0 - \frac{1150}{1,4},$$



Obrázek 3.11. Vybíjecí charakteristiky různých LiFePO4 akumulátorů (Zdroj: [68])

kde SoC je odhad stavu nabití v procentech a U_0 je svorkové napětí akumulátoru naprázdno ve Voltech. Pomocí této rovnice pak můžeme jednoduchým výpočtem ze změřeného svorkového napětí naprázdno určit přibližnou hodnotu SoC.

Důležité je měřit svorkové napětí naprázdno vždy pouze v okamžiku, kdy jsou všechny děje uvnitř akumulátoru ustálené. Jinými slovy, než provedeme měření svorkového napětí naprázdno, musí být akumulátor určitou dobu v klidu odpojen od jakékoliv zátěže či nabíječe, a zároveň musí být jeho teplota stabilní. Tato doba není konstantní u různých typů akumulátorů, ale doporučená doba se pohybuje od 1 do 4 hodin. Někdy je dokonce uváděno až 24 hodin, ale to je vhodné například před prvotními (akceptačními) testy. Vlastním měřením, jsem ale zjistil, že pro orientační odhad SoC stačí, když tato doba bude pouze 15 až 20 minut.

Tuto metodu můžeme použít také pro velmi hrubý odhad stavu akumulátoru. Jelikož u každého typu akumulátoru známe nominální hodnotu napětí a pracovní rozsah napětí, můžeme po změření svorkového napětí naprázdno hrubě odhadnout, zda je akumulátor více či méně nabitý nebo téměř vybitý. Pokud bude svorkové napětí naprázdno větší než nominální hodnota napětí, znamená to, že by akumulátor mohl být v pořádku. Pokud je napětí naprázdno pod hodnotou nominálního napětí, znamená to, že akumulátor má nízkou kapacitu, nebo je nějakým způsobem poškozen / degradován. Tento odhad stavu akumulátoru můžeme ještě zpřesnit, pokud provedeme měření svorkového napětí pod zátěží. Tímto měřením je v některých případech možné jednoduše odhalit vadný akumulátor, který má hodnotu svorkového napětí naprázdno v horní části rozsahu pracovního napětí. [68]

3.2.2 Měření vnitřního odporu

Jedná se o velmi důležitou metodu pro následný hrubý odhad SoH a případně i CCA. Vnitřní odpor nemá žádnou vypovídající hodnotu o kapacitě akumulátoru nebo SoC. Protože ale víme, že vnitřní odpor akumulátoru vzrůstá ke konci jeho

životnosti, je metoda měření vnitřního odporu vhodná pro detekci konce životnosti akumulátoru. Jelikož se během většiny času životního cyklu akumulátoru jeho vnitřní odpor téměř nemění (zejména u akumulátorů založených na bázi lithia), není příliš vhodný pro odhad SoH.

Metodu měření vnitřního odporu akumulátoru můžeme rozdělit na stejnosměrné měření a střídavé měření (impedance). Při měření střídavým proudem, připojíme na baterie zdroj střídavého napětí o frekvenci přibližně 100 Hz (u akumulátorů s nižšími kapacitami používáme vyšší frekvence, u akumulátorů s vyššími kapacitami používáme nižší frekvence). Z odezvy můžeme určit vnitřní impedanci akumulátoru, která se skládá z paralelní kombinace rezistoru (R_p) a kondenzátoru (C_p) sériově spojené s rezistorem R_s (viz náhradní elektrické schéma akumulátoru uvedené na obr. 3.1). Tato metoda je náročnější na měřicí techniku a je používána zejména u startovacích baterií pro zjištění hodnoty CCA.

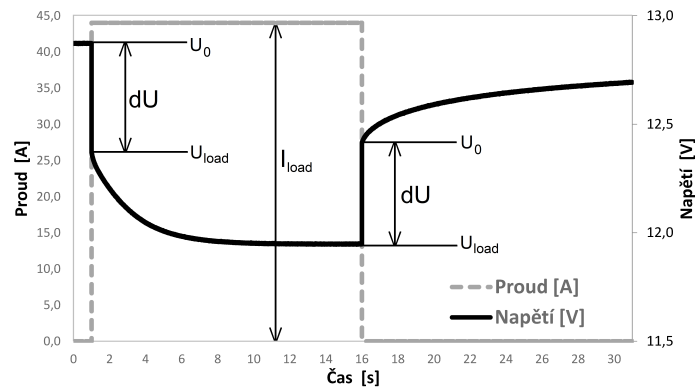
U varianty stejnosměrného měření vnitřního odporu, zatěžíme výstup akumulátoru stejnosměrným proudem dané velikosti. Měření se provádí krátkým zátěžovým testem. Před začátkem testu změříme svorkové napětí naprázdno. Poté provedeme zatížení stejnosměrným proudem, například o velikosti 1 C, a změření svorkového napětí ihned po začátku zatěžování a změření hodnoty zatěžovacího proudu. V tomto okamžiku již můžeme zátěž od akumulátoru odpojit, a provést výpočet vnitřního odporu podle vztahu

$$R_i = \frac{U_0 - U_{load}}{I_{load}} = \frac{dU}{I_{load}} \quad [\Omega],$$

kde R_i je vnitřní odpor akumulátoru (sériové spojení R_s a R_p), U_0 je svorkové napětí akumulátoru naprázdno, U_{load} je svorkové napětí zatíženého akumulátoru změřené ihned po začátku zatěžování, I_{load} je zatěžovací proud a dU je rozdíl mezi svorkovým napětím naprázdno a při zatížení. Využíváme tedy úbytku napětí, který vznikne na rezistoru, kterým protéká elektrický proud. Stejný efekt nastává také při odpojování zátěže. Můžeme tedy provést měření i v tomto stavu. Získané hodnoty vnitřního odporu, pomocí obou metod, by měly být stejné. Vlivem nepřesností měření ale mohou být rozdílné, potom je možné tyto dvě hodnoty zprůměrovat a získat přesnější výsledek. Princip tohoto měření vnitřního odporu je znázorněn na obr. 3.12.

Vnitřní odpor akumulátoru je závislý zejména na teplotě článku a jeho aktuální kapacitě. To znamená, že měření bychom měli provádět vždy za stejných podmínek, tedy při stejné teplotě (alespoň okolí) a stejném stavu nabití akumulátoru.

Pomocí měření stejnosměrného vnitřního odporu akumulátoru jsme tedy schopni zjistit přibližnou kondici akumulátoru. Pokud změříme hodnotu vnitřního odporu daného akumulátoru na začátku jeho používání, pak můžeme aktuálně změřený vnitřní

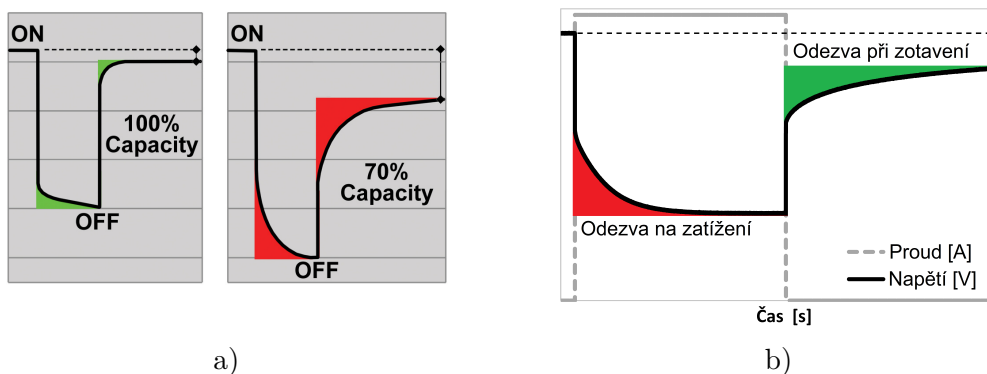


Obrázek 3.12. Princip měření vnitřního odporu akumulátorů stejnou metodou

odpor s tímto „prvotním“ porovnat. Pravidelným porovnáváním můžeme odhadnout, jak rychle degraduje daný akumulátor v porovnání s ostatními nasazenými akumulátory stejného typu. Tento údaj vypovídá pouze o vnitřní mechanické degradaci akumulátoru a to pouze orientačně. [54], [69], [70]

3.2.3 Elektrochemická dynamická odezva

Elektrochemická dynamická odezva, v originálu „Electrochemical Dynamic Response“ (EDR), je metoda vyvíjená společností *Cadex*. Metoda je vyvíjena pro rychlé testování široké škály akumulátorů založené na bázi lithia. Nyní je tato technologie vyvíjena pro akumulátory s vysokou kapacitou. Jde tedy o metodu, u které je k dispozici pouze stručný princip, na kterém je založena.



Obrázek 3.13. Princip vyhodnocení odezvy u EDR metody (Zdroj: a) [63])

Principem je měření iontového toku mezi kladnými a zápornými elektrodami pomocí zatěžovacích impulzů a vyhodnocování doby odezvy při zatížení a zotavení. Jedná se tedy o metodu testování v časové oblasti. Naměřené hodnoty odezvy na zatížení i zotavení jsou porovnávány s uloženými parametry daného typu akumulátoru, změřenými na začátku používání akumulátoru. Na Obr. 3.13 a) je uvedena napěťová odezva plně nabitého akumulátoru a akumulátoru s SoC=70 % na zatížení a zotavení ze zatížení.

Z těchto průběhů je zřejmé, že akumulátor, který je plně nabitý a v dobré kondici, má odezvu rychlejší (tzv. tvrdý zdroj), než akumulátor slabší s SoC=70 %, který vykazuje „měkkost“ a pomalejší odezvy. [63], [65]

Jelikož více informací k této metodě není dostupných, pokusím se vyjít z principu a aplikovat tuto metodu. Na obr. 3.13 b) je znázorněno vyhodnocení odezvy na zatížení a zotavení. Jedná se tedy o „plochu“ pod křivkou napětí pro odezvu na zatížení, a o „plochu“ nad křivkou napětí u odezvy při zotavení. Tyto získané hodnoty jsou bezrozměrné, a jejich hodnota by se měla zvětšovat s klesající dostupnou kapacitou akumulátoru, resp. s klesajícím SoC. Jelikož jsem se rozhodl tuto metodu implementovat do realizovaného testeru akumulátorů, bylo možné provést testovací měření. Jeho výsledek pro Pb akumulátor je uveden v kap. 5.11.

■ 3.2.4 Měření kapacity vybíjecí metodou

Měření kapacity akumulátoru vybíjecí metodou je relativně snadné a přesné, ale měření je dlouhé. Touto metodou je možné zjistit dostupnou kapacitu libovolného akumulátoru. Velkou nevýhodou této metody je, že po jejím dokončení je akumulátor plně vybitý. Známe tedy dostupnou kapacitu, která byla v akumulátoru uložena před testem. Po dokončení testu je nutné akumulátor ihned plně dobít, aby nedocházelo k vnitřnímu poškození akumulátoru.

Na začátku testování je akumulátor zatížen konstantním proudem, konstantním výkonem nebo konstantním odporem. Během testování je pravidelně měřeno svorkové napětí, odebíraný proud z akumulátoru v závislosti na čase. K ukončení testu dojde, jakmile svorkové napětí akumulátoru klesne pod definovanou hodnotu (různé u každé technologie). Při ukončení testu dojde k odpojení zátěže a vyhodnocení naměřených hodnot, konkrétně délky testu a odebraného náboje (kapacity) z akumulátoru během testu. Při zatěžování konstantním odporem (proud se v čase snižuje), nebo konstantním výkonem (proud se v čase zvyšuje – nejlepší vypovídací schopnost o akumulátoru), se výsledná kapacita akumulátoru určí jako integrál proudu v čase. Při zatěžování konstantním proudem se výsledná kapacita určí nejnepřesněji, a to vynásobením zatěžovacího proudu časem testu.

Test by měl být zahájen vždy u plně nabitého akumulátoru. Vybíjecí test je sice velice zdoluhavý, ale je také nejpřesnější. Proto je často používán jako kalibrační pro jiné metody odhadu parametrů. A jelikož maximální dostupná kapacita akumulátoru je jedním z nejdůležitějších parametrů pro odhad SoH, a to zvláště u akumulátorů založených na bázi lithia, je tento test stále velmi aktuální a používaný. Ale není vhodné ho provádět příliš často, protože při testu dojde k vybití akumulátoru až na hodnotu DoD=100 %. Dochází při něm tedy k poškozování testovaných akumulátorů.

Existuje také tzv. „plná“ varianta vybíjecího testu (*Full cycle*), kde se začíná s plně vybitým akumulátorem, u kterého při testu dojde k plnému nabití, poté k plnému vybití a nakonec opět k plnému nabití. Tato varianta vybíjecího testu je přibližně 3 krát delší než standardní vybíjecí test, ale na druhou stranu je přesnější a navíc můžeme získat i informaci o efektivitě nabíjení. Ta se určí jako podíl náboje odebraného z akumulátoru a dodaného do akumulátoru při nabíjení. [52], [62], [67]

3.2.5 Metoda monitorování náboje

Metoda monitorování náboje, jinak Coulomb counting, nebo také Ampere-hour counting, je moderní metoda odhadu SoC. Jedná se o nepřetržité monitorování toku proudu z a do akumulátoru. Tato metoda se hojně používá v mobilních telefonech, notebookech, ve zdravotnické technice a jiných přenosných zařízeních. Pro nabíjení i vybíjení se používá jednotka Ampérsekunda (As). Tato metoda pouze odhaduje SoC.

Jde z principu o velmi jednoduchou metodu. Tok proudu z akumulátoru (vybíjení) snižuje hodnotu SoC a tok proudu do akumulátoru (nabíjení) zvyšuje hodnotu SoC. Pokud známe dostupnou kapacitu akumulátoru před začátkem monitorování, teoreticky vždy známe aktuální hodnotu SoC. Ta se určí přičtením náboje dodaného do akumulátoru k počáteční dostupné kapacitě, resp. odečtením odebraného náboje z akumulátoru. Nastávají zde ale určité problémy, které komplikují určení aktuální hodnoty SoC. Pokud by všechny děje probíhali se 100% účinností, jednalo by se o extrémně jednoduchou a přesnou metodu. Ale jelikož účinnost žádného z dějů není 100%, budeme vždy schopni získat z akumulátoru méně energie, než jsme do něj dodali, a s tím musí elektronika, nebo software, pro tuto testovací metodu počítat. Pokud známe účinnost vybíjení konkrétního akumulátoru (změřili jsme si ji dříve plným vybíjecím testem), můžeme ji do výpočtu aktuální hodnoty SoC zahrnout. Výpočet aktuální hodnoty $SoC(t)$ můžeme provést podle vztahu

$$SoC(t) = SoC(t - 1) + \frac{I(t) \cdot \xi}{C_N} \Delta t \quad [\%],$$

kde $SoC(t - 1)$ je hodnota SoC v předchozím čase, $I(t)$ je proud akumulátorem, ξ je koeficient účinnosti, C_N je jmenovitá (nominální) kapacita akumulátoru (nebo lépe maximální dostupná kapacita, pokud je známa) a Δt je perioda vzorkování. Proud dodávaný do akumulátoru uvažujeme jako kladný, a proud odebíraný z akumulátoru uvažujeme jako záporný. Hodnota koeficientu účinnosti ξ je závislá na polaritě proudu. Pokud je proud kladný (nabíjení), je koeficient účinnosti $\xi = 1$. Pokud je proud záporný (vybíjení), je hodnota koeficientu účinnosti $\xi = 1 + (1 - \eta)$, kde η je účinnost nabíjení.

Další chybu do měření vnáší samovybíjení, které je navíc teplotně závislé. Jelikož samovybíjení je téměř nemožné průběžně měřit, je možné využít pouze hodnotu defi-

novanou výrobcem, nebo hodnotu zjistit dlouhodobým měřením. Pro potlačení těchto jevů je vhodné pravidelně monitorovací jednotku kalibrovat (plné vybití ze stavu plného nabití) a implementovat učící se režim, který odhaduje určité parametry podle předchozích zaznamenaných měření. To by mělo znamenat, že čím déle budeme akumulátor s tímto systémem provozovat, tím přesnější měření bude. Ale opak je pravdou, protože akumulátory stárnou a opotřebovávají se dalšími vlivy, které nelze všechny postihnout. [52], [68], [71]

Kapitola 4

Návrh testeru akumulátorů

Dalším úkolem této práce bylo navrhnout a realizovat tester akumulátorů. Podle zadání by se mělo jednat o tester Pb a LiFePO₄ akumulátorů, ale po dohodě s vedoucím práce bude tester realizován pouze pro Pb akumulátory. Důvod tohoto omezení je nedostupnost LiFePO₄ akumulátorů pro testování v době přípravy tohoto systému testování akumulátorů. Určitá část softwaru testeru je předpřipravena pro LiFePO₄ i Li-Ion akumulátory, pro snadnější implementaci v jiné závěrečné práci. Výsledný systém pro testování je plně funkční pro Pb akumulátory různých typů.

Velkou otázkou před návrhem samotným bylo, jakou formu by tester měl mít. Zvažovány byly dvě varianty. Jedním z možných řešení bylo realizovat tester jako kompaktní zařízení založené na některé z mikroprocesorových vývojových desek s podpůrným hardwarem pro měření na akumulátorech. Druhým řešením bylo vytvořit laboratorně orientovaný testovací systém složený z laboratorních měřicích přístrojů, které budou ovládány vytvořenou aplikací běžící na počítači (PC), nebo notebooku (NB). Po dohodě s vedoucím práce jsme se přiklonili k druhé variantě laboratorně orientovaného testeru. Zvolili jsme toto řešení, protože i navrhovaný systém pro zálohování napájení má být laboratorního typu. Bude tedy možné oba tyto systémy využít dále v různých závěrečných pracích jako základ pro rozšíření, nebo zdroj informací a naměřených dat.

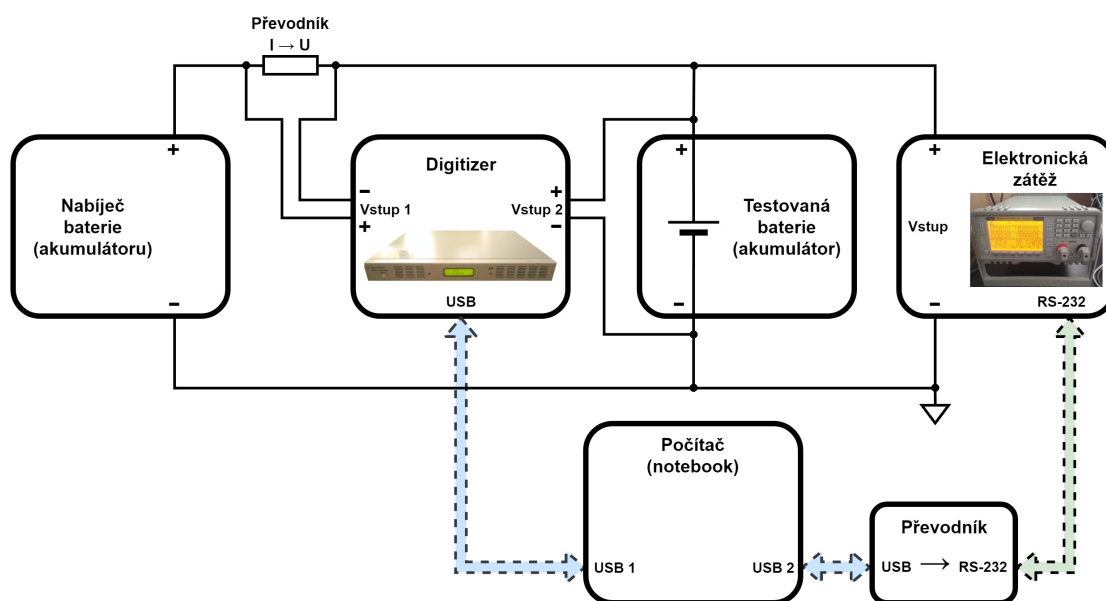
4.1 Hardwarová část testeru akumulátorů

Jelikož byla zvolena varianta laboratorního typu testeru akumulátorů, bude se výsledný tester skládat z různých laboratorních měřicích přístrojů propojených s počítačem. Na něm bude spuštěna aplikace, která bude tyto přístroje ovládat, vyčítat z nich naměřené hodnoty a zpracovávat je. Aplikace bude mít grafické uživatelské rozhraní (GUI) a bude nabízet uživateli různé funkce testování akumulátorů a zacházení s naměřenými daty a výsledky.

Návrh testeru je vhodné začít určením toho, co by měl ve výsledku umět. Bude se jednat o tester Pb akumulátorů s možností budoucího rozšíření i na LiFePO₄ akumulátory, který bude schopný provádět různé testy těchto akumulátorů. Zvolil jsem 3 druhy testů. Prvním z nich je „*rychlý test*“, který bude schopen během několika sekund říci, jaký je přibližný stav nabití akumulátoru a jaký je jeho přibližný stav. Druhým testem

bude „*vybíjecí test*“, který bude schopen přesně zjistit dostupnou kapacitu akumulátoru. Třetím druhem testu bude „*coulomb counting*“, což je test, který umožňuje dlouhodobé monitorování připojeného akumulátoru a také zjištění účinnosti nabíjení. Aplikace bude umožňovat ještě čtvrtý test, a to tzv. „*akceptační test*“. Ten bude složen z předchozích 3 druhů testů a bude sloužit pro prvotní otestování nového akumulátoru. S výsledky tohoto testu bude možné porovnávat naměřené hodnoty pomocí jiných testů provedených během celé životnosti akumulátoru.

Aby bylo možné vytvořit tester definovaný v předchozím odstavci, musí se bezpodmínečně skládat z testovaného akumulátoru, počítače a aplikace pro řízení připojených měřicích přístrojů. Dále pak elektronické zátěže, která umožní nastavitelné zatěžování akumulátoru, které je nutné pro téměř všechny testy. Pro přesné měření různých napětí bude vhodné použít digitizer s několika vstupními kanály. Dále je vhodné, aby byl v systému přítomen také nabíječ akumulátorů pro možnost zjištění účinnosti nabíjení. A posledním prvkem testovacího systému je zařízení pro měření proudu tekoucím akumulátorem. Schematické znázornění celého testeru akumulátorů je zobrazeno na obr. 4.1.



Obrázek 4.1. Schematické znázornění testeru akumulátorů

Dále bude následovat podrobnější popis jednotlivých prvků testeru akumulátorů. Nejvhodnější bude začít od prvků testeru s nejsnazším návrhem. Tím je například testovaný akumulátor, nebo baterie. Může to být Pb akumulátor libovolného typu s kapacitou od jednotek Ah až po desítky Ah. Jeho napětí je omezeno pouze zvoleným měřicím rozsahem digitizeru. Primárně je ale tester konstruován pro Pb baterie s nominálním napětím 12 V, což je nominální napětí u těchto akumulátorů používané nejčastěji. S testovaným akumulátorem úzce souvisí použitý nabíječ, který musí být

vhodný pro daný typ testovaného akumulátoru. Jiné omezení na něj v rámci testeru akumulátorů kladené není.

Důležitým prvkem testeru je elektronická zátěž. Ta je nutná pro všechny zvolené testy. Jelikož se má jednat o tester akumulátorů s kapacitami 1 až 100 Ah, bude zapotřebí, aby zátěž umožňovala nastavení zatěžovacího proudu až desítek Ampér a měla také dostatečný výkon pro zatěžování Pb akumulátorů s napětím 12 V takto velkými proudy. Zvolená elektronická zátěž musí také disponovat komunikačním rozhraním pro připojení k PC. Jelikož nebyla na pracovišti dostupná žádná elektronická zátěž, bylo nutné zvolit vhodnou elektronickou zátěž a zakoupit ji pro účely této diplomové práce. Po dokončení této práce bude zakoupená zátěž k dispozici ostatním pracovníkům a studentům na katedře měření FEL ČVUT. Jelikož takto výkonných elektronických zátěží za přijatelnou cenu, které jsou dostupné v ČR, není moc, volba byla celkem jednoduchá. Zvolil jsem elektronickou zátěž *EX-EL600W* výrobce *Axiomet*, která má zatěžovací proud až 60 A, možný zatěžovací výkon až 600 W a disponuje komunikačním rozhraním RS-232 s podporou SCPI. Fotografie této zátěže je uvedena na obr. 4.2.



Obrázek 4.2. Elektronická zátěž Axiomet AX-EL600W

Tato zátěž je plně programovatelná, a to jak manuálně ovládacími prvky umístěnými přímo na ní, tak i přes komunikační rozhraní. Může fungovat ve 4 základních režimech (CC – konstantní proud, CV – konstantní napětí, CR – konstantní odpor a CP – konstantní výkon). Je osazena 24-bit A/D převodníky pro měření napětí a proudu, a 16-bit D/A převodníky pro přesné nastavení zatěžovacího proudu. Rozlišení a přesnost měření napětí a proudu je uvedena v tab. 4.1. Protože přesnost měření napětí a proudu touto zátěží je vysoká, bude použita v některých testech pro měření napětí, nebo alespoň proudu. Bohužel pro „rychlý test“ zátěž neposkytuje dostatečně rychlé měření, proto musí být použit také digitizer. Protože použitý NB nedisponoval rozhraním RS-232, byl pro připojení této zátěže k NB použit převodník RS-232 → USB.

Měření napětí		
Rozlišení	nízký rozsah (0 ~ 30 V) vysoký rozsah (0 ~ 150 V)	1 mV 10 mV
Přesnost	nízký rozsah (0 ~ 30 V) vysoký rozsah (0 ~ 150 V)	$\pm(0,05\%+0,02\%FS)$ $\pm(0,05\%+0,025\%FS)$
Měření proudu		
Rozlišení	nízký rozsah (0 ~ 6 A) vysoký rozsah (0 ~ 60 A)	1 mA 1 mA
Přesnost	nízký rozsah (0 ~ 6 A) vysoký rozsah (0 ~ 60 A)	$\pm(0,1\%+0,1\%FS)$ $\pm(0,1\%+0,15\%FS)$

Tabulka 4.1. Rozlišení a přesnost měření napětí a proudu el. zátěží *Axiomet AX-EL600W* (Zdroj: [72])

Druhým nejdůležitějším prvkem testeru, pro přesné měření napětí, je digitizer. Ten je použit především z důvodu potřeby rychlého měření svorkového napětí během „rychlého testu“ a měření napětí na převodníku $I \rightarrow U$. Pro tato měření jsem měl k dispozici 4 kanálový digitizer *L4534A* výrobce *Agilent*, který má maximální rozsah měřeného napětí ± 250 V, A/D převodníky s rozlišením 16-bitů, a simultánní vzorkovací rychlost až 20 MSa/s. Jeho fotografie je na obr. 4.3. Přesnost měření pro různé napěťové rozsahy je uvedena v tab. 4.2. Tento digitizer je vybaven LXI, je ho tedy možné připojit pomocí gigabitového ethernetu, pro mě ale byla výhodnější možnost připojení pomocí USB. Je tedy s NB propojen pomocí sběrnice USB a komunikace probíhá pomocí SCPI.



Obrázek 4.3. Digitizer Agilent L4534A

Rozsah	23 °C ± 5 °C	
	±% of reading	±% of range
250 mV	0,10	0,30
500 mV	0,10	0,20
1 V, 2 V	0,10	0,12
4 V, 64 V	0,10	0,30
8 V, 128 V	0,10	0,20
16 V, 32 V, 256 V	0,10	0,12

Tabulka 4.2. Přesnost měření napětí digitizerem *Agilent L4534A* (Zdroj: [73])

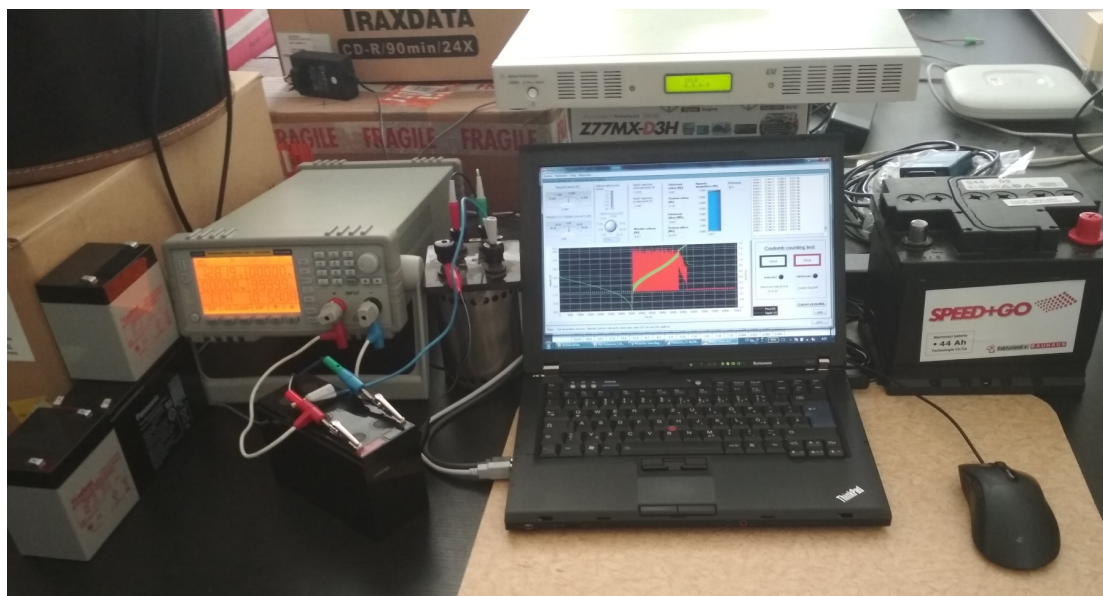
Dále bylo nutné navrhnout převodník $I \rightarrow U$. Ten je možné realizovat například pomocí odporového bočnicku, na kterém ale může vznikat při vyšších proudech velký úbytek napětí, a tedy i nevhodná výkonová ztráta. Tento problém můžeme vyřešit odporovým bočníkem s nižší hodnotou odporu, pak se ale snižuje přesnost měření. Zvolený odporový bočník by měl být vždy dostatečně přesný (přesnost minimálně 1 %). Alternativní možností může být například senzor proudu s hallovou sondou, nebo použití proudové sondy (tzv. „proudové kleště“), nebo jakýkoliv jiný převodník proudu na napětí. Já jsem pro jednoduchost a dostupnost zvolil proudový bočník realizovaný přesným rezistorem o hodnotě $0,1 \Omega$, kterým může protékat proud až 3 A. Jelikož testy, při kterých byl tento bočník do obvodu zapojen, byly prováděny pouze na menších akumulátorech, a tedy s nabíječem, jehož proud nedosahoval této hodnoty, mohl být použit. Pro měření nabíjení pomocí nabíječe s větším proudem by bylo nutné tento bočník nahradit jiným, dostatečně dimenzovaným, převodníkem $I \rightarrow U$.

Posledním prvkem testeru akumulátorů je počítač, ke kterému je připojena elektronická zátěž a digitizer. Tento počítač je v tomto testeru použit ve formě notebooku (NB), který jsem dostal k dispozici a je vhodný pro svou snadnou přenositelnost a možnost akumulátorového provozu. Na tomto počítači bude spuštěna aplikace, která bude realizovat rozhraní mezi uživatelem a hardwarem testeru. Díky této aplikaci bude moci uživatel zvolit jaký test požaduje provést na zvoleném akumulátoru, jehož parametry zadá před spuštěním testu. Zároveň umožní uživateli uložit naměřené hodnoty během testu a výsledné hodnoty do souboru, popř. uložit zobrazené průběhy ve formě grafu jako obrázek na disk počítače. Dále umožní uživateli zobrazovat výsledky starších uložených testů a možnost porovnat aktuálně naměřené hodnoty s hodnotami dříve provedeného testu („akceptační test“). Tato aplikace je napsána v jazyce „C“ a vytvořena v prostředí NI LabWindows/CVI (více viz kap. 4.2). Fotografie celého měřicího pracoviště testeru akumulátorů složeného z uvedených prvků je uvedena na obr. 4.4.

4.2 Softwarová část testeru akumulátorů

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, součástí navrženého testeru akumulátorů je také aplikace pro operační systém Windows, která zajišťuje obsluhu elektronické zátěže a digitizeru během prováděných testů a zároveň zajišťuje rozhraní mezi uživatelem a testerem.

Tato aplikace umožňuje uživateli zvolit druh testu, jaký požaduje provést na zvoleném akumulátoru, jehož parametry zadá před spuštěním testu. Vybrat si může ze 4 různých druhů testů. Zároveň umožní uživateli uložit po dokončení testu hodnoty naměřené během provádění testu a jeho výsledky do souboru na disk počítače. Umožní také uložit po dokončeném testu zobrazené průběhy ve formě grafu jako obrázek na disk počítače. Dále je možné zobrazit parametry akumulátoru naměřené pomocí



Obrázek 4.4. Fotografie testeru akumulátorů

„akceptačního testu“ a možnost porovnat aktuálně naměřené hodnoty libovolným testem s hodnotami dříve provedeného „akceptačního testu“ na stejném akumulátoru. Tato funkce bude jednoduše porovnávat vývoj parametrů akumulátoru v čase jeho používání.

Celá aplikace je napsána v jazyce „C“ a vytvořena v prostředí NI LabWindows/CVI, které umožňuje propojení grafického uživatelského prostředí (GUI) s kódy napsanými v jazyce „C“ a ovládání různých programovatelných měřicích přístrojů. Jelikož oba použité měřicí přístroje podporují SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation), je možné využít knihovny VISA (Virtual Instrument Software Architecture), která usnadňuje komunikaci s těmito zařízeními.

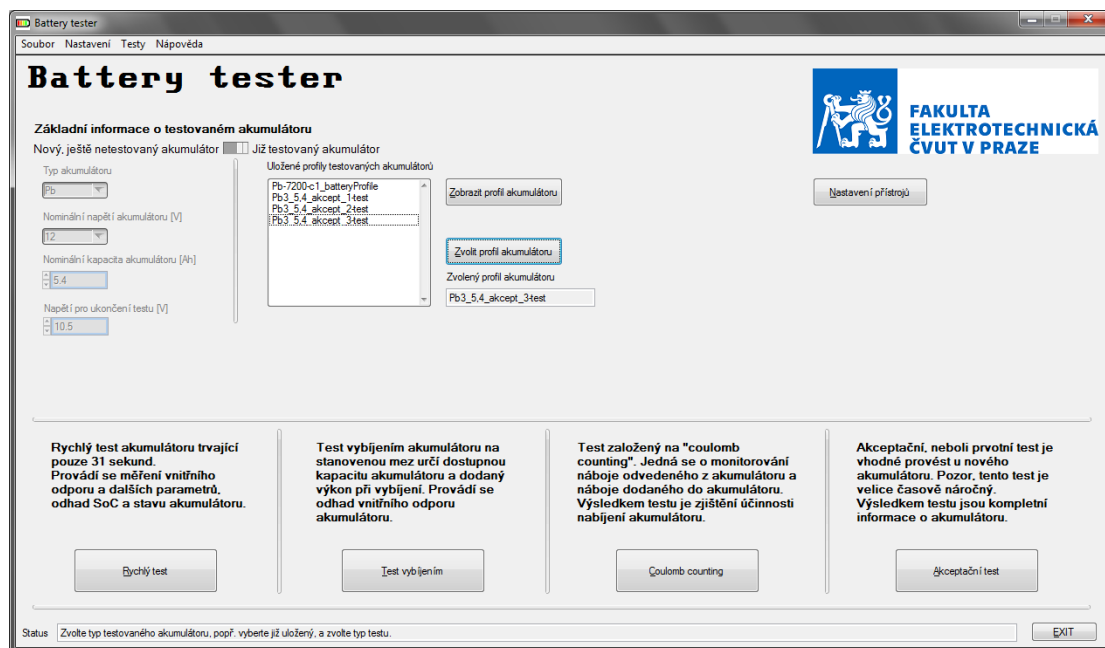
Aplikace ve formě spustitelného souboru v operačním systému Windows a projekt v prostředí NI LabWindows/CVI se všemi zdrojovými kódy je k dispozici na Katedře měření FEL ČVUT. Kompletní obrazová dokumentace této aplikace je k dispozici v elektronické příloze této práce (CD).

■ 4.2.1 Hlavní okno aplikace

Po spuštění aplikace na počítači se objeví úvodní obrazovka (viz obr. 4.5), která je i hlavní obrazovkou pro další práci s aplikací. V záhlaví hlavní obrazovky se nachází řádek s položkami menu, který je viditelný ve všech stavech aplikace. Struktura menu je:

Soubor	- Otevřít profil akumulátoru
	- Exportovat výsledky testu

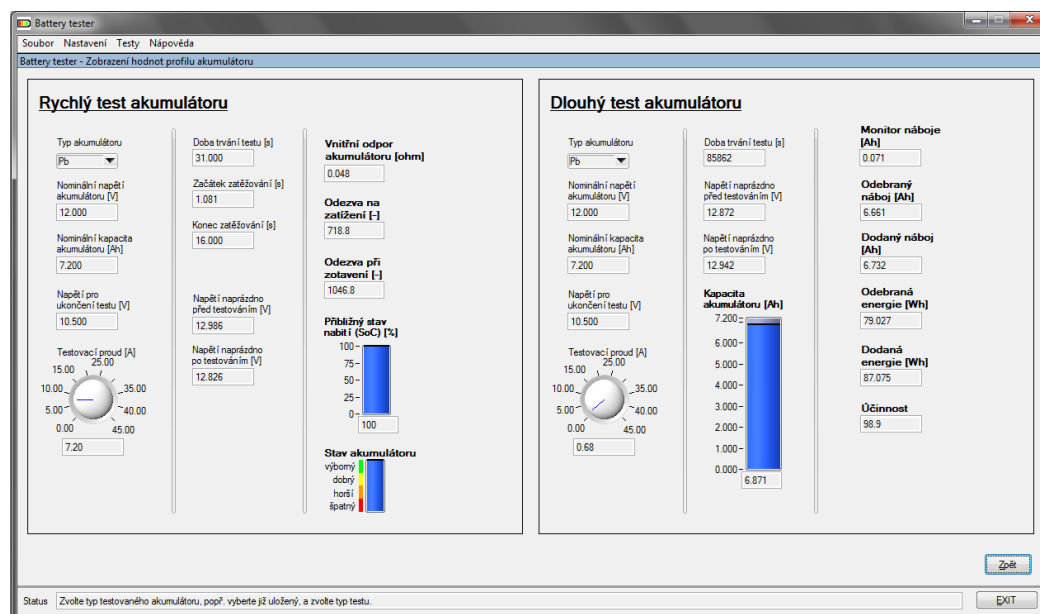
	- Uložit graf jako obrázek
	- Uložit profil jako
	- Porovnat naměřené hodnoty s profilem
	- Konec
Nastavení	- Nastavení přístrojů
Testy	- Rychlý test
	- Test vybíjením
	- Coulomb counting
	- Akceptační test
Nápověda	- Nápověda
	- O aplikaci



Obrázek 4.5. Hlavní obrazovka aplikace testeru

Položky menu jsou vždy zpřístupněny pouze v okamžiku, kdy je možné je použít. Například není možné přejít k testu, pokud je nějaký test spuštěn. Pomocí volby *Otevřít profil akumulátoru* je možné zvolit soubor na disku počítače s uloženým profilem akumulátoru získaným pomocí „akceptačního testu“. Načtené hodnoty profilu akumulátoru se poté zobrazí v novém panelu, který se zobrazí v okně aplikace místo hlavní obrazovky (viz obr. 4.6). Zpět na hlavní obrazovku aplikace je možné se vrátit pomocí tlačítka „Zpět“.

Položka menu *Exportovat výsledky testu* se zpřístupní vždy při dokončení testu, a umožňuje uložit hodnoty naměřené během provádění testu a výsledky testu do oddělených souborů na disk počítače. Požadované názvy souborů uživatel zadá pomocí dialogového okna volby souborů. Položka menu *Uložit graf jako obrázek* se zpřístupní, stejně jako předchozí položka, vždy při dokončení testu, a umožňuje uložit zobrazené průběhy ve formě grafu jako obrázek na disk počítače. Požadovaný název souboru

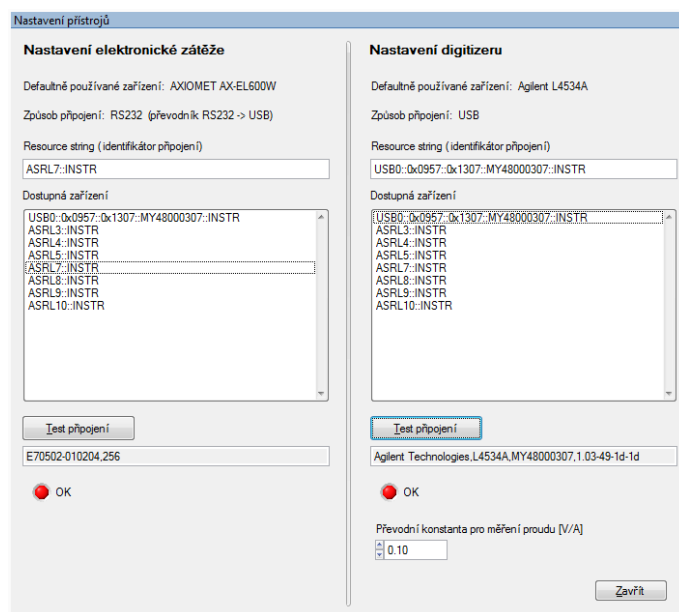


Obrázek 4.6. Zobrazení načteného profilu akumulátoru v aplikaci testeru

uživatel zadá pomocí dialogového okna volby souboru. Položka menu *Uložit profil jako* se zpřístupní pouze po kompletním dokončení „akceptačního testu“. Profil testovaného akumulátoru je ukládán automaticky pro možnost budoucího použití, ale tato volba umožňuje uživateli uložit si kopii naměřených parametrů akumulátoru do souboru s vlastním zvoleným umístěním pro vlastní potřeby. Položka menu *Porovnat naměřené hodnoty s profilem* se zpřístupní pouze po dokončeném libovolném testu, pokud byl před zahájením testu zvolen profil již testovaného akumulátoru. Aktuálně naměřené hodnoty se zobrazí v novém panelu spolu s hodnotami získanými z načteného profilu akumulátoru pro pohodlné porovnání vývoje parametrů akumulátoru v čase. Zobrazení hodnot je podobné jako je na obr. 4.6. Položka menu *Konec* umožňuje ukončit aplikaci v jakémkoli okamžiku, kromě právě probíhajícího testu.

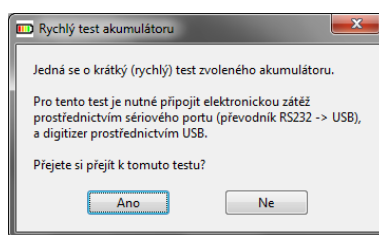
Položka menu *Nastavení přístrojů* otevře nový panel s možnostmi nastavení měřicích přístrojů uvnitř hlavní obrazovky. Ke stejnému nastavení je možné se dostat také pomocí tlačítka *Nastavení přístrojů* umístěného na hlavní obrazovce. V tomto panelu (viz obr. 4.7) je možné zvolit adresu obou dvou měřicích přístrojů (elektronická zátěž a digitizer), otestovat funkčnost komunikace se zařízeními a zadat převodní konstantu pro měření proudu (při použití odporového bočnicku se rovná hodnotě odporu bočnicku).

Položky menu *Rychlý test*, *Test vybíjením*, *Coulomb counting* a *Akceptační test* mají stejnou funkci jako stejnojmenná tlačítka umístěná na hlavní obrazovce. Touto funkcí je možné přejít k danému testu akumulátoru. Při zvolení položky menu *Nápověda* se otevře nový panel uvnitř hlavní obrazovky se stručnou nápovědou k obsluze aplikace. A při zvolení položky menu *O aplikaci* se otevře nový panel uvnitř hlavní obrazovky s informacemi o této aplikaci a autorovi.



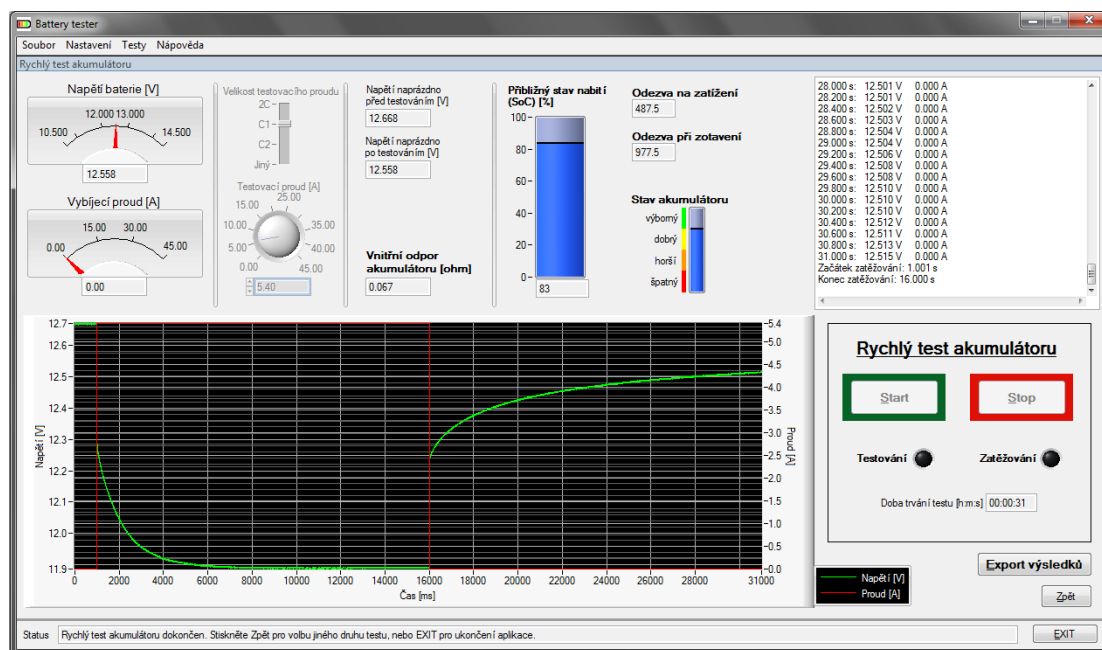
Obrázek 4.7. Panel nastavení přístrojů aplikace testeru

Na hlavní obrazovce se nachází volba testovaného akumulátoru. Je možné zvolit *Nový ještě netestovaný akumulátor*, u kterého je potřeba zadat typ akumulátoru (Pb), nominální napětí a nominální kapacitu akumulátoru a napětí pro ukončení testu, nebo ponechat přednastavené hodnoty. Druhou možností je zvolit *Již testovaný akumulátor*, u kterého jsme již v minulosti provedli „akceptační test“, a jeho název je tedy k dispozici ve výpise *Uložené profily testovaných akumulátorů*. Zvolení požadovaného profilu můžeme provést dvojklikem na zvolený profil, nebo označit zvolený profil a stisknout tlačítko *Zvolit profil akumulátoru*. Hodnoty načteného (zvoleného) profilu akumulátoru si můžeme zobrazit pomocí tlačítka *Zobrazit profil akumulátoru*.



Obrázek 4.8. Okno pro přechod k „rychlému testu“ s popisem testu a požadovanými připojenými měřícími přístroji

Dále se na hlavní obrazovce nachází již zmiňované tlačítko pro nastavení přístrojů a 4 tlačítka pro volbu testu. U každé volby testu je k dispozici stručný popis, čím se daný test zabývá. Po zvolení testu se objeví okno s podrobnějším popisem testu a požadovanými připojenými měřícími přístroji (ukázka pro „rychlý test“ viz obr. 4.8). Po potvrzení této hlášky dojde k přechodu ke zvolenému testu. Přechod k testu v sobě skrývá mnoho počátečních nastavení pro zvolený test, inicializaci potřebných proměn-



Obrázek 4.9. Panel „rychlého testu“ po dokončení testu se zobrazenými výsledky

ných, navázání komunikace s požadovanými měřicími přístroji a nastavení parametrů měření. Pokud vše proběhne v pořádku, zobrazí se nový panel, uvnitř hlavní obrazovky, s prvky pro zvolený test. Po zobrazení panelu testu se spustí měření svorkového napětí naprázdno před spuštěním testu. Více informací k jednotlivým testům bude uvedeno v následujících kapitolách.

Aplikaci je možné kdykoliv ukončit pomocí tlačítka *EXIT*, nebo klasicky pomocí tlačítka se znakem křížku v pravém horním rohu okna aplikace. Pokud je to možné, nedoporučuji tímto způsobem zavírat aplikaci při probíhající testu. Dojde ke ztrátě naměřených dat, pokud by došlo k chybnému ukončení komunikace s měřicími přístroji, mohlo by dojít k poškození testovaného akumulátoru. Před ukončením aplikace je vhodné vždy nejprve zastavit probíhající test, a poté aplikaci ukončit.

Jak již bylo v práci dříve zmíněno, po dohodě s vedoucím práce, byly z návrhu testeru akumulátorů vyjmuty akumulátory typu LiFePO_4 z důvodu jejich nedostupnosti pro testování v době realizace testeru. Vytvářená aplikace je připravena pro následnou implementaci i těchto akumulátorů, ale plně funkční je pouze pro Pb akumulátory. Proto dále všechny uvedené informace platí pouze pro Pb akumulátory.

4.2.2 Rychlý test

Po zvolení „rychlého testu“ na hlavní obrazovce, nebo v menu aplikace, dojde k přechodu k testu. Po dokončení přechodu k „rychlému testu“ je již navázána komunikace s elektronickou zátěží i digitizerem a oba dva přístroje mají nastavené vhodné

parametry pro měření zadaného akumulátoru během „rychlého testu“. Dojde také ke spuštění měření svorkového napětí akumulátoru naprázdno před spuštěním testu. To je zobrazováno na ukazateli *Napětí baterie*. Dále je také před spuštěním testu vypočítávána přibližná hodnota SoC, která je také zobrazována. Více o výpočtu této hodnoty viz dále. Před spuštěním „rychlého testu“ je nutné zvolit velikost zatěžovacího (testovacího) proudu. To je možné zvolit jako přednastavený násobek jmenovité kapacity akumulátoru, nebo zadat libovolnou jinou hodnotu. Poté je již možné spustit test tlačítkem *Start*. Délka testu je 31 sekund. Po spuštění testu, je pomocí digitizeru měřeno svorkové napětí naprázdno po dobu 1 sekundy. Po 1 sekundě je spuštěno zatěžování zvoleným proudem. Po 15-ti sekundách od začátku zatěžování je zatěžování ukončeno. Následujících 15 sekund je měřeno zotavení akumulátoru ze zatížení. Po 31 sekundách je test automaticky ukončen. Během testování je zobrazeno okno s tzv. „progress barem“ a odpočítáváním času do konce testu. Test je možné v průběhu kdykoli ukončit stisknutím tlačítka *Stop*, ale výsledky testu nemusejí být validní. Zda je daný výsledek měření validní závisí na tom, v které části testování došlo k přerušení uživatelem. Po dokončení testu dojde k jeho vyhodnocení a zobrazení naměřených a dopočtených hodnot. Ukázka panelu „rychlého testu“ po dokončení testu se zobrazenými výsledky je uvedena na obr. 4.9.

Po ukončení testu dojde k opětovnému spuštění měření svorkového napětí naprázdno a je možné uložit naměřené hodnoty, výsledky testu a graf průběhů napětí a proudu jako obrázek. Zobrazenými výsledky testu jsou:

- svorkové napětí naprázdno před testem [V],
- svorkové napětí naprázdno po dokončeném testu [V],
- vnitřní odpor akumulátoru [Ω],
- přibližný stav nabití (SoC) [%],
- odezva na zatížení [-],
- odezva při zotavení [-],
- stav akumulátoru,
- naměřené hodnoty svorkového napětí a proudu po 200 ms.

Měření svorkového napětí akumulátoru je prováděno pomocí digitizeru. V případě měření naprázdno (před a po testu) je vzorkovací perioda měření 1 s. Při měření během testu je vzorkovací perioda 1 ms. Nastavený měřicí napěťový rozsah je nejbližší vyšší vůči zvolenému nominálnímu napětí akumulátoru. **Měření proudu** akumulátorem je prováděno pomocí elektronické zátěže. Jelikož elektronická zátěž neposkytuje naměřené hodnoty napětí a proudu se vzorkovací periodou 1 ms, jsou hodnoty proudu vyčítány pouze s periodou 100 ms. Po dokončení testu je detekován přesný začátek a konec zatěžování a z naměřených hodnot proudu je určen proud ve všech naměřených vzorcích.

Výpočet **vnitřního odporu** akumulátoru probíhá po dokončení testu pomocí vztahu

$$R_i = \frac{U_0 - U_{load}}{I_{load}} \quad [\Omega],$$

kde R_i je určovaný vnitřní odpor akumulátoru, U_0 je svorkové napětí akumulátoru naprázdno dané průměrem všech naměřených hodnot svorkového napětí naprázdno (od začátku testu do začátku zatěžování), U_{load} je svorkové napětí zatíženého akumulátoru změřené ihned po začátku zatěžování (první vzorek napětí s výrazným poklesem) a I_{load} je zatěžovací proud. Určení vnitřního odporu se tedy přesně řídí definicí uvedenou v kap. 3.2.2.

Určování **přibližného stavu nabití (SoC)** v procentech se řídí rovnicí přímky uvedenou v kap. 3.2.1. Díky téměř lineární závislosti svorkového napětí akumulátoru naprázdno na hodnotě SoC je možné použít jednoduché určení pomocí dosažení naměřené hodnoty svorkového napětí naprázdno před testem do rovnice přímky. Výsledkem je přímo hodnota SoC v %, která je pouze omezena shora hodnotou 100 % a zdola hodnotou 0 %. Důkaz možnosti určování hodnoty SoC u Pb akumulátorů tímto způsobem je proveden testem uvedeným v kap. 5.7.

Určení **odezvy na zatížení a při zotavení** se řídí popisem uvedeným u metody testování EDR (viz kap. 3.2.3), kde je řečeno, že se jedná o plochu pod, resp. nad, křivkou napětí. *Odezva na zatížení* je bezrozměrné číslo určující plochu pod křivkou napětí v oblasti zatěžování, tedy v čase testu od 1 s do 16 s. Výpočet je prováděn pomocí vztahu

$$O_1 = \sum_{i=n}^m U_k - U_i \quad [-],$$

kde O_1 je bezrozměrná hodnota odezvy na zatížení, n je čas v [ms], kdy došlo k začátku zatěžování, m je čas v [ms], kdy došlo k ukončení zatěžování, U_k je koncová hodnota svorkového napětí při zatěžování, popř. je to nejnižší hodnota svorkového napětí, kterého bylo během zatěžování dosaženo a U_i je změřená hodnota svorkového napětí v čase i . Podobně je určena i hodnota *odezvy při zotavení*. Jedná se také o bezrozměrné číslo určující plochu nad křivkou napětí v oblasti zotavení, tedy v čase testu od 16 s do 31 s. Výpočet je prováděn pomocí vztahu

$$O_2 = \sum_{j=m+1}^h U_t - U_j \quad [-],$$

kde O_2 je bezrozměrná hodnota odezvy při zotavení, m je čas v [ms], kdy došlo k ukončení zatěžování, h je čas v [ms], kdy došlo k ukončení testu (31 000 ms), U_t je koncová hodnota svorkového napětí při zotavení, tedy nejvyšší hodnota svorkového napětí, kterého bylo dosaženo v oblasti zotavení ze zatížení a U_j je změřená hodnota svorkového napětí v čase j .

Hodnota udávající **stav akumulátoru** je v rozsahu 1 až 8. Při hodnotách 1 až 2 je slovní hodnocení stavu *špatný*, při hodnotách 3 až 4 je slovní hodnocení stavu *horší*, při hodnotách 5 až 6 je slovní hodnocení stavu *dobrý* a při hodnotách 7 až 8 je slovní hodnocení stavu *výborný*. Pokud test nebyl dokončen, automaticky je hodnota stavu akumulátoru nastavena na 1. Pokud test byl dokončen, dojde k určení hodnoty stavu akumulátoru ze zjištěných hodnot vnitřního odporu a odhadu SoC.

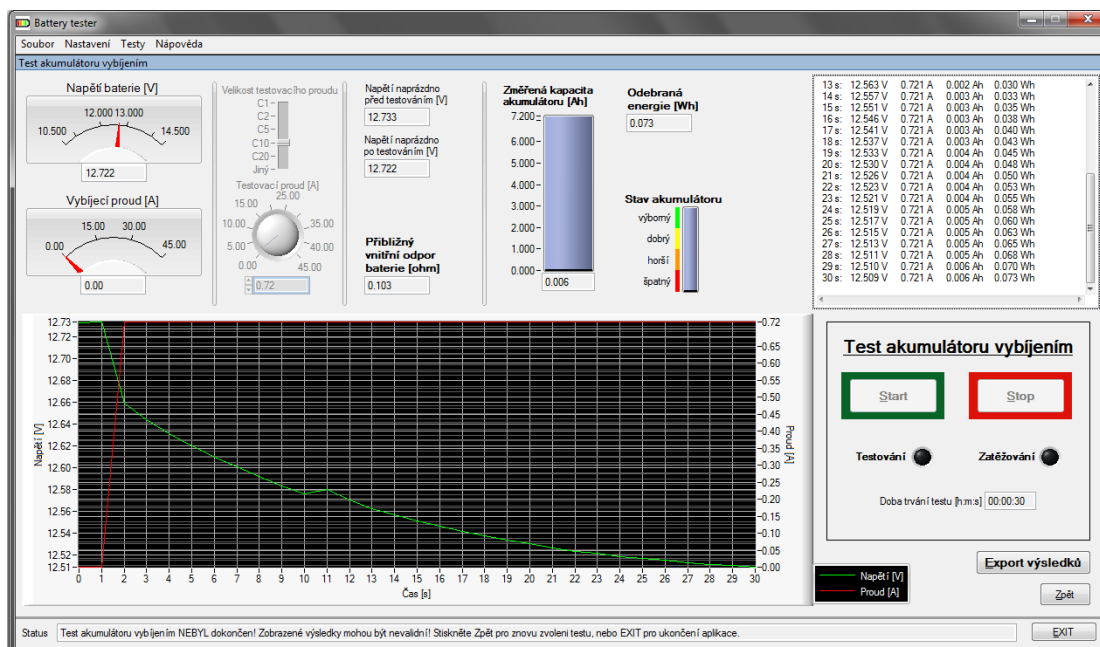
■ 4.2.3 Test vybíjením

Po zvolení „testu vybíjením“ na hlavní obrazovce, nebo v menu aplikace, dojde k přechodu k testu. Po dokončení přechodu k „testu vybíjením“ je již navázána komunikace s elektronickou zátěží a je provedeno nastavení defaultního zatěžovacího proudu (o hodnotě 1 C). Dojde také ke spuštění měření svorkového napětí akumulátoru naprázdno před spuštěním testu. To je zobrazováno na ukazateli *Napětí baterie*. Před spuštěním „testu vybíjením“ je nutné zvolit velikost zatěžovacího (testovacího) proudu. To je možné zvolit jako přednastavený násobek jmenovité kapacity akumulátoru, nebo zadat libovolnou jinou hodnotu. Poté je již možné spustit test tlačítkem *Start*. Test bude automaticky ukončen, jakmile svorkové napětí akumulátoru poklesne pod zadané *napětí pro ukončení testu*. Tím byl akumulátor plně vybit a získali jsme hodnotu jeho dostupné kapacity, kterou měl před započítáním testu. Aby se změřená kapacita rovnala maximální dostupné kapacitě, je vhodné aby před spuštěním testu byl akumulátor plně nabit (spuštění testu provést nejlépe až po 24 hodinách po odpojení nabíječe od plně nabitého akumulátoru).

Po spuštění testu, je pomocí elektronické zátěže měřeno svorkové napětí naprázdno po dobu 1 sekundy. Po 1 sekundě je spuštěno zatěžování zvoleným proudem. Po spuštění zatěžování je vypočtena přibližná hodnota vnitřního odporu akumulátoru. Tato hodnota je zpřesněna v čase 10 s od spuštění testu. Přibližná hodnota vnitřního odporu je také měřena během probíhajícího testu, a to vždy po odebrání náboje o velikosti 1/10 jmenovité kapacity akumulátoru. Po dokončení testu tedy získáme závislost vnitřního odporu akumulátoru na dostupné kapacitě. Tato závislost by měla být v ideálním případě tvořena 10-ti hodnotami. Pokud bude změřená kapacita akumulátoru menší než jmenovitá, bude mít změřená závislost hodnot méně.

Během testování je možné pozorovat svorkové napětí akumulátoru, aktuálně změřenou kapacitu akumulátoru (odebraný náboj), odebranou energii a graficky znázorněný vývoj napětí a proudu v čase. Test je možné v průběhu kdykoli ukončit stisknutím tlačítka *Stop*, ale výsledky testu nemusejí být validní. Zda je daný výsledek měření validní závisí na tom, v které části testování došlo k přerušení uživatelem. Po dokončení testu dojde k jeho vyhodnocení a zobrazení naměřených a dopočtených hodnot. Ukázka panelu „testu vybíjením“ po dokončení testu se zobrazenými výsledky je uve-

dena na obr. 4.10. Po ukončení testu dojde k opětovnému spuštění měření svorkového napětí naprázdno a je možné uložit naměřené hodnoty, výsledky testu a graf průběhu napětí a proudu jako obrázek.



Obrázek 4.10. Panel „testu vybitím“ po dokončení testu se zobrazenými výsledky

Měření svorkového napětí akumulátoru je prováděno pomocí elektronické zátěže, není proto nutné při tomto testu mít připojený digitizer. Jelikož může test probíhat proudem o vysoké hodnotě, docházelo by ke značným úbytkům na propojovacím vedení a dopouštěli bychom se velké chyby měření. Je proto vhodné využít oddělený vstup pro měření napětí pomocí elektronické zátěže označený „Remote sense terminal“, který je umístěný na zadní straně přístroje. V případě měření svorkového napětí naprázdno (před a po testu) je vzorkovací perioda měření 1 s. Při měření během testu je vzorkovací perioda také 1 s. Tato vzorkovací perioda je dostatečná, jelikož dynamika změny svorkového napětí akumulátoru je při zatěžování velmi pomalá. **Měření proudu** akumulátorem je taktéž prováděno pomocí elektronické zátěže.

Výpočet **vnitřního odporu** akumulátoru je prováděn ihned po začátku zatěžování a poté ještě několikrát během testu. Jakmile nastane okamžik pro měření vnitřního odporu během testu, dojde k ukončení zatěžování a odměření hodnoty svorkového napětí naprázdno. Poté je ihned opět zapnuto zatěžování zadanou hodnotou proudu, dojde tedy pouze ke krátkému přerušování testu trvající přibližně 100 ms. Výpočet probíhá podle známého vztahu uvedeného v předchozí kapitole (4.2.2).

Určování **změřené kapacity akumulátoru** v [Ah] probíhá s každým naměřeným vzorkem (svorkové napětí a proud). Na začátku testu je změřená kapacita akumulátoru

rovna 0 Ah. S každým novým naměřeným vzorkem dochází k přičtení odebraného náboje v předchozí 1 s k dosud změřené kapacitě akumulátoru podle následujícího vztahu

$$C_m(t) = C_m(t-1) + \frac{I(t) \text{ [As]}}{3600} \text{ [Ah]},$$

kde $C_m(t)$ je změřená kapacita akumulátoru v čase t , $C_m(t-1)$ je změřená kapacita akumulátoru do předchozího vzorku a $I(t)$ je změřený zatěžovací proud v čase t , který je převeden z [As] na [Ah] pomocí převodní konstanty 1/3600.

Odebraná energie je určována ve stejný okamžik jako změřená kapacita akumulátoru. Princip měření i výpočtu je také totožný, pouze se nepočítá se zatěžovacím proudem, ale s aktuálním výkonem. Výpočet probíhá podle následujícího vztahu

$$E_o(t) = E_o(t-1) + \frac{P(t) \text{ [Ws]}}{3600} = E_o(t-1) + \frac{U(t) \cdot I(t) \text{ [Ws]}}{3600} \text{ [Wh]},$$

kde $E_o(t)$ je celková odebraná energie do času t , $E_o(t-1)$ je celková odebraná energie do času $t-1$, tedy do předchozího vzorku, $P(t)$ je aktuální odebíraný výkon, $U(t)$ je aktuální svorkové napětí a $I(t)$ je aktuální změřený zatěžovací proud. Aktuální energie (výkon za předchozí sekundu) je v jednotkách [Ws], proto je nutné ji převést na [Wh] pomocí převodní konstanty 1/3600.

Rozsah hodnot udávajících **stav akumulátoru** je stejný jako u „rychlého testu“ (viz kap. 4.2.2). Pokud test nebyl dokončen, automaticky je hodnota stavu akumulátoru nastavena na 1. Pokud test byl dokončen, dojde k určení hodnoty stavu akumulátoru z poměru změřené kapacity akumulátoru ku jmenovité kapacitě akumulátoru a vnitřního odporu akumulátoru.

■ 4.2.4 Coulomb counting test

Po zvolení „coulomb counting“ testu na hlavní obrazovce, nebo v menu aplikace, je uživatel vyzván k zadání aktuální kapacity akumulátoru. Pokud bude testování zahájeno na plně nabitém akumulátoru jeho vybitím, je zapotřebí zadat jmenovitou kapacitu akumulátoru. Naopak, pokud bude testování zahájeno na plně vybitém akumulátoru jeho nabíjením, je zapotřebí zadat aktuální kapacitu 0 Ah. Pokud bychom test zahajovali na akumulátoru, u kterého nebudeme znát jeho aktuální kapacitu, můžeme ji odhadnout pomocí zobrazené hodnoty odhadu SoC před spuštěním „rychlého testu“.

Po dokončení přechodu k „coulomb counting“ testu je již navázána komunikace s elektronickou zátěží i digitizerem a oba dva přístroje mají nastavené vhodné parametry pro měření zadaného akumulátoru během „coulomb counting“ testu. Dojde také ke spuštění měření svorkového napětí akumulátoru naprázdno před spuštěním testu.

To je zobrazováno na ukazateli *Napětí baterie*. Před spuštěním „coulomb counting“ testu je vhodné zvolit velikost zatěžovacího (testovacího) proudu. To je možné zvolit jako přednastavený násobek jmenovité kapacity akumulátoru, nebo zadat libovolnou jinou hodnotu. Velikost zatěžovacího proudu můžeme libovolně měnit i během spuštěného testu. V tuto chvíli již můžeme spustit test tlačítkem *Start*. Test je možné v průběhu kdykoli ukončit stisknutím tlačítka *Stop*, ale výsledky testu nemusejí být validní. Zda je daný výsledek měření validní závisí na tom, v které části testování došlo k přerušení uživatelem. K automatickému ukončení tohoto testu nikdy nedojde, protože je navržen na nepřetržitý monitoring stavu připojeného akumulátoru. Během testu je pouze hlídáno, zda svorkové napětí nekleslo pod zadanou hodnotu napětí pro ukončení testu. Pokud se tak stane, dojde k vypnutí zatěžování, ale test pokračuje dále. V tu chvíli je vhodné připojit přes převodník $I \rightarrow U$ k akumulátoru nabíječ a zahájit nabíjení. Po dokončeném nabíjení (akumulátor je plně nabit) je vhodné test ukončit.

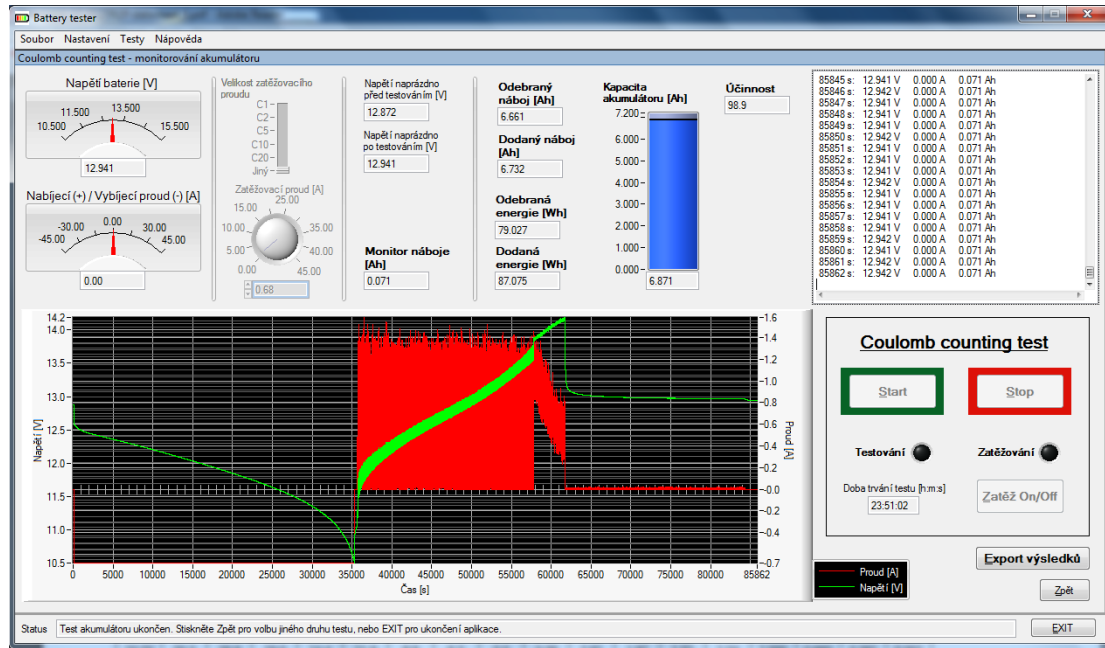
Po ukončení testu dojde k jeho vyhodnocení a zobrazení naměřených a dopočtených hodnot. Ukázka panelu „coulomb counting“ testu po dokončení testu se zobrazenými výsledky je uvedena na obr. 4.11. Po ukončení testu také dojde k opětovnému spuštění měření svorkového napětí naprázdno a je možné uložit naměřené hodnoty, výsledky testu a graf průběhů napětí a proudu jako obrázek. Zobrazenými výsledky testu jsou:

- svorkové napětí naprázdno před testem [V],
- svorkové napětí naprázdno po dokončeném testu [V],
- monitor náboje [Ah],
- odebraný náboj [Ah],
- dodaný náboj [Ah],
- odebraná energie [Wh],
- dodaná energie [Wh],
- aktuální kapacita akumulátoru [Ah],
- efektivita (účinnost) nabíjení [%].

Měření svorkového napětí akumulátoru je prováděno pomocí digitizeru. V případě měření naprázdno (před a po testu) je vzorkovací perioda měření 1 s. Při měření během testu je vzorkovací perioda také 1 s, stejně jako u „testu vybíjením“. Nastavený měřicí napěťový rozsah je nejbližší vyšší vůči zvolenému nominálnímu napětí akumulátoru.

Měření proudu akumulátorem je prováděno pomocí elektronické zátěže (vybíjení) a při nabíjení měřením napětí na převodníku $I \rightarrow U$ pomocí dalšího kanálu digitizeru. Výsledný proud je daný součtem obou naměřených proudů. Nabíjecí proud je bráný jako kladný a vybíjecí proud je bráný jako záporný.

Určování **odebraného náboje** v [Ah] a **dodaného náboje** v [Ah] probíhá s každým naměřeným vzorkem (svorkové napětí a proud). Na začátku testu jsou obě hodnoty rovné 0 Ah. S každým novým naměřeným vzorkem dochází k přičtení odebraného,



Obrázek 4.11. Panel „coulomb counting“ testu po dokončení testu se zobrazenými výsledky

resp. dodaného, náboje v předchozí 1 s k dosud změřeným hodnotám podle následujícího vztahu

$$Q_{o/d}(t) = Q_{o/d}(t-1) + \frac{I(t) [As]}{3600} [Ah],$$

kde $Q_{o/d}(t)$ je změřený odebraný, resp. dodaný, náboj do času t , $Q_{o/d}(t-1)$ je odebraný, resp. dodaný, náboj do předchozího vzorku a $I(t)$ je změřený proud akumulátorem v čase t , který je převeden z [As] na [Ah] pomocí převodní konstanty $1/3600$. Pokud je hodnota proudu $I(t)$ záporná, je $Q_{o/d}$ odebraným nábojem (Q_o), pokud je kladná, je $Q_{o/d}$ dodaným nábojem (Q_d). **Monitor náboje** je pouze rozdíl dodaného a odebraného náboje.

Odebraná energie je určována ve stejný okamžik jako odebraný, resp. dodaný, náboj. Princip měření i výpočtu je také totožný, pouze se nepočítá se zatěžovacím proudem, ale s aktuálním výkonem. Výpočet probíhá podle následujícího vztahu

$$E_{o/d}(t) = E_{o/d}(t-1) + \frac{P(t) [Ws]}{3600} = E_{o/d}(t-1) + \frac{U(t) \cdot I(t) [Ws]}{3600} [Wh],$$

kde $E_{o/d}(t)$ je změřená odebraná, resp. dodaná, energie do času t , $E_{o/d}(t-1)$ je odebraná, resp. dodaná, energie do předchozího vzorku, $P(t)$ je aktuální odebíraný výkon, $U(t)$ je aktuální svorkové napětí a $I(t)$ je změřený proud akumulátorem v čase t . Aktuální energie (výkon za předchozí sekundu) je v jednotkách [Ws], proto je nutné ho převést na [Wh] pomocí převodní konstanty $1/3600$. Pokud je hodnota proudu $I(t)$ záporná, je $E_{o/d}$ odebranou energií (E_o), pokud je kladná, je $E_{o/d}$ dodanou energií (E_d).

Aktuální kapacita akumulátoru je určována jako součet zadané počáteční kapacity akumulátoru a hodnoty monitoru náboje. **Efektivita** (účinnost) nabíjení je určována, pouze pokud je test kompletní. Kompletním se test stává, pokud je testovaný akumulátor plně vybit a poté plně nabit, nebo naopak. Výpočet je prováděn pomocí následujícího vztahu

$$\eta = 100 \cdot \frac{Q_o}{Q_d} \quad [\%],$$

kde η je účinnost nabíjení v [%], Q_o je odebraný náboj v [Ah] a Q_d je dodaný náboj v [Ah].

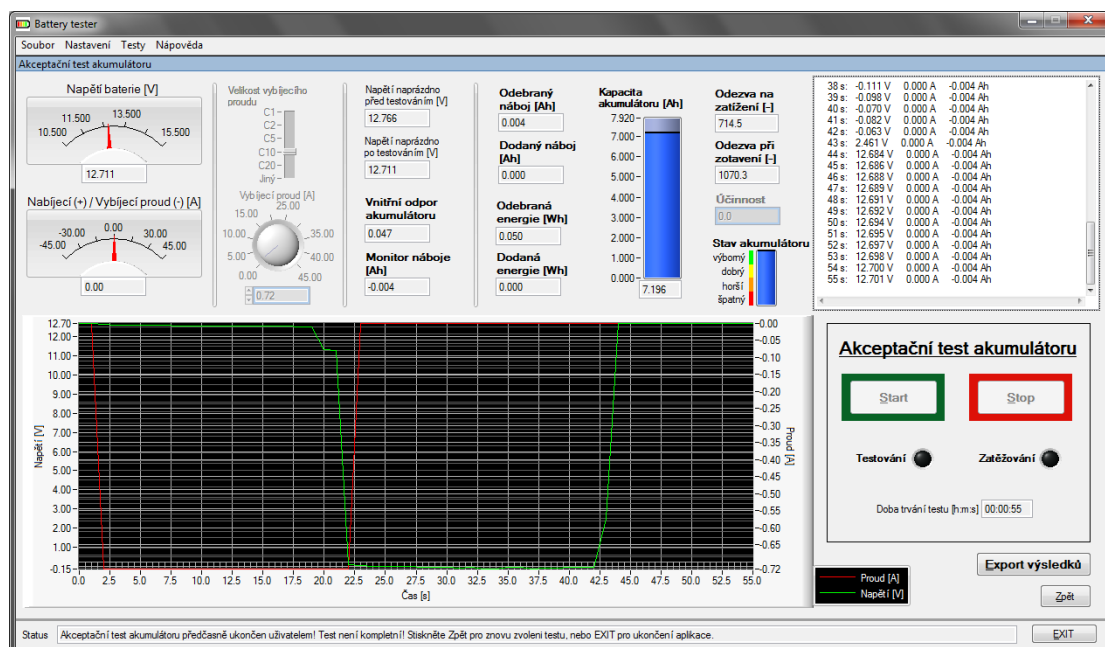
4.2.5 Akceptační test

Akceptační test je vhodný provádět u každého nového akumulátoru, který budeme chtít v budoucnu testovat libovolným jiným testem (jedním ze 3 předchozích). Tento akumulátor nemusí být zcela nový, ale je nutné, aby byl plně nabitý. Plného nabití je vhodné dosáhnout tzv. ekvalizací (vyrovnáním). Tento proces je zapotřebí zahájit po dokončení nabíjení akumulátoru. Jedná se o udržování svorkového napětí akumulátoru na hodnotě 2,4 V / článek (u Pb akumulátorů) po dobu 24 hodin. Následně se napětí sníží na hodnotu 2,3 V / článek (u Pb akumulátorů) po dobu 3 až 7 dní. Poté je nabíječ odpojen a akumulátor nechán v odpojeném stavu 24 hodin. Teprve v tuto chvíli je vhodné zahájit akceptační test. Pro získání správných naměřených hodnot, je nutné pečlivě zadat nominální kapacitu akumulátoru, napětí pro ukončení testu a zatěžovací proud pro měření maximální dostupné kapacity. Velice důležité je také zajistit, aby během celého testu byla okolní teplota konstantní a její hodnota byla kolem 25 °C. [74]

Při zvolení „akceptačního testu“ na hlavní obrazovce, nebo v menu aplikace, je uživatel vyzván k zadání požadovaného názvu, pod kterým bude uložen profil testovaného akumulátoru. Po dokončení přechodu k „akceptačnímu testu“ je již navázána komunikace s elektronickou zátěží i digitizerem a oba dva přístroje mají nastavené vhodné parametry pro měření zadaného akumulátoru během „akceptačního testu“. Dojde také ke spuštění měření svorkového napětí akumulátoru naprázdno před spuštěním testu, které je zobrazováno na ukazateli *Napětí baterie*. Před spuštěním „akceptačního testu“ je nutné zvolit velikost zatěžovacího (testovacího) proudu ve vybíjecí části testu. To je možné zvolit jako přednastavený násobek jmenovité kapacity akumulátoru, nebo zadat libovolnou jinou hodnotu. Velikost zatěžovacího proudu v části rychlého testu je pevně stanovena na hodnotu 1 C. V tuto chvíli již můžeme spustit test tlačítkem *Start*. Test je možné v průběhu kdykoli ukončit stisknutím tlačítka *Stop*, ale výsledky testu nemusejí být validní. Zda je daný výsledek měření validní závisí na tom, v které části testování došlo k přerušení uživatelem. K automatickému ukončení tohoto testu může dojít pouze v části rychlého testu, pokud dojde k poklesu svorkového napětí pod zadanou hodnotu napětí pro ukončení testu.

Test je složen ze všech 3 předchozích testů a po jeho spuštění začíná rychlým testem se zatěžovacím proudem o hodnotě 1 C. Po dokončení tohoto testu je zobrazeno okno s informací o právě dokončeném testu a o následném spuštění vybíjecího testu kapacity po uplynutí 15-ti minut. Po uplynutí této doby dojde automaticky k zavření tohoto informačního okna a spuštění vybíjecího testu uživatelem zadaným proudem. Tento test je dokončen, jakmile svorkové napětí poklesne pod zadanou hodnotu napětí pro ukončení testu. Opět dojde k zobrazení okna s informací o dokončeném vybíjecím testu a požadavkem na připojení nabíječe přes převodník $I \rightarrow U$ k akumulátoru a zahájení nabíjení. Tento úkon musí uživatel potvrdit stisknutím tlačítka „OK“. Tím se spustí poslední část testu – nabíjení. Po dokončení této části „akceptačního testu“ je nutné test ručně ukončit stisknutím tlačítka „Stop“. Tím je „akceptační test“ dokončen a jeho výsledky jsou uloženy ve formě profilu testovaného akumulátoru s uživatelem zadaným názvem.

Měření i vyhodnocování parametrů testovaného akumulátoru v jednotlivých částech tohoto testu probíhá přesně podle popsanych pravidel u předchozích testů. První částí testu je „rychlý test“, který se řídí informacemi uvedenými v kap. 4.2.2. Druhou částí testu je „vybíjecí test“ kapacity, který se řídí informacemi uvedenými v kap. 4.2.3. Poslední, třetí, část tohoto testu (nabíjení) se řídí informacemi uvedenými v kap. 4.2.4 pro „coulomb counting“ test.



Obrázek 4.12. Ukázka panelu „akceptačního testu“

Ukázka panelu „akceptačního testu“ je uvedena na obr. 4.12. Jelikož se jedná o extrémně dlouhý test, nebyl jsem ho schopen otestovat plným testem. Proto i na ukázce

panelu je vidět pouze manuální otestování funkčnosti. První část testu (rychlý test) je otestována plně, druhá část testu (test kapacity vybíjením) byl ukončen vynuceným poklesem svorkového napětí pod zadanou hodnotu napětí pro ukončení testu, poslední, třetí, část testu byla odzkoušena krátkým připojením nabíječe k akumulátoru. Následně byl test ukončen a byly vyhodnoceny jeho výsledky.

Kapitola 5

Provedené testy akumulátorů

Pomocí realizovaného testeru akumulátorů jsem provedl několik různých testů Pb akumulátorů různých typů a kapacit. Jedná se o testy, které byly provedeny pro odzkoušení správnosti návrhu a realizace testeru, a také testy, které měly dokázat tvrzení o akumulátorech a metodách testování jejich parametrů uvedené v předchozích kapitolách (zejména kap. 3). Následuje popis vybraných provedených testů. Všechny grafy k těmto testům jsou uvedeny v příloze B.

5.1 Zjištění kapacity baterie vybitím

Tento test je důkazem správné funkčnosti „vybíjecího testu“. Zároveň díky němu také dostáváme informaci o maximální dostupné kapacitě testované baterie, protože byla před testem plně nabita. Test byl proveden přibližně 15 hodin po dokončení nabíjení baterie. Průběh svorkového napětí a vybíjecího proudu je uveden na obr. B.1. Testovaným akumulátorem byla Pb baterie 12 V / 5,4 Ah (Leaftron LTX12-5.4 [14]). Test byl prováděn zatěžovacím proudem daným pro 5-ti hodinové zatěžování (C5), tedy 0,96 A. Svorkové napětí baterie pro ukončení vybíjení bylo 10,5 V. Při těchto parametrech testu měla mít baterie, podle katalogového listu [14], maximální dostupnou kapacitu 4,8 Ah. Změřená maximální dostupná kapacita při tomto testu byla 3,396 Ah, což je přibližně 71 % výrobcem udávané hodnoty pro novou baterii. Pokud tedy budeme uvažovat konec životnosti akumulátoru při 80 % jmenovité kapacity, pak by tato baterie pravděpodobně již dosáhla konce životnosti. Jelikož je ale jmenovitá kapacita této baterie definována při vybíjení proudem o hodnotě C8, bylo by zapotřebí provést tento test znovu s nižší hodnotou proudu, tedy méně náročný. Pokud by tato baterie neměla ani při tomto testu maximální dostupnou kapacitu, mohli bychom o ní říci, že dosáhla konce své životnosti. To neznamená, že by ji nebylo možné používat, zvláště pro malé odběry, pouze má omezenou maximální dostupnou kapacitu.

5.2 Zjištění efektivity nabíjení

Tento test je důkazem správné funkčnosti „coulomb counting“ testu. Zároveň díky němu také dostáváme informaci o efektivitě nabíjení testované baterie, protože baterie byla před testem plně nabita. Testovaným akumulátorem byla Pb baterie 12 V / 7,2 Ah

(Panasonic LC-R127R2PG1 [12]). Během testu došlo k plnému vybití baterie, následovala krátká pauza (5 minut) a poté po připojení nabíječe, došlo k plnému nabití. Průběh svorkového napětí a vybíjecího / nabíjecího proudu je uveden na obr. B.2. Vybíjecí část testu byla prováděna zatěžovacím proudem daným pro 10-ti hodinové zatěžování (C10), tedy 0,68 A. Svorkové napětí baterie pro ukončení vybíjení bylo 10,5 V. Při těchto parametrech testu měla mít baterie, podle katalogového listu [12], maximální dostupnou kapacitu 6,8 Ah. Vybíjením změřená maximální dostupná kapacita byla 6,661 Ah, což je přibližně 98 % výrobcem udávané hodnoty pro novou baterii. Nabíjením byl do baterie dodán náboj (kapacita) o velikosti 6,712 Ah. Vypočtená efektivita nabíjení je tedy 98,9 %.

5.3 Dobití Pb baterie

Tyto testy byly provedeny na 2 různých typech Pb baterií 2-ma různými nabíječi. Nabíječ byl v obou případech připojen na částečně vybitou baterii, a bylo tedy provedeno pouze dobití baterií do plného stavu. Cílem tohoto testu bylo pouze zjistit průběhy napětí a proudu různých nabíječů pro různé typy Pb baterií. První baterií byla VRLA Pb baterie 12 V / 7,2 Ah (Panasonic LC-R127R2PG1 [12]), která byla nabíjena mikroprocesorem řízeným nabíječem pro VRLA Pb baterie s výstupním proudem 1 A. Průběh svorkového napětí a nabíjecího proudu je uveden na obr. B.3. Z grafu je patrné, že nabíjecí proud je pulzního charakteru a nabíjení probíhá v několika fázích. Na obrázku jsou zachyceny 4 fáze. V první fázi je baterie nabíjena malým proudem, po určitém čase přejde nabíječ do druhé fáze s plným nabíjecím proudem, který je v pravidelných časových intervalech přerušován. V tomto přerušení pravděpodobně dochází k měření svorkového napětí baterie. Po dosažení určité hodnoty svorkového napětí baterie, přejde nabíječ do třetí fáze, ve které nabíjecí proud klesá a dochází k pomalejšímu dobití baterie na hodnotu svorkového napětí 14,3 V, při kterém dojde k ukončení nabíjení a nabíječ přejde do čtvrté fáze. Tato fáze je udržovací, a je při ní udržováno svorkové napětí na hodnotě přibližně 12,94 V.

Druhou baterií byla startovací Pb baterie 12 V / 44 Ah (SPEED+GO), která byla nabíjena mikroprocesorem řízeným nabíječem (CTEK MULTI XS 3600) pro startovací Pb baterie s výstupním proudem 0,8 A, nebo 3,6 A. Pro dobíjení byl použit nižší proud (0,8 A). Průběh svorkového napětí a nabíjecího proudu je uveden na obr. B.4. Předpokládám, podle vzhledu a velikosti nabíječe, že nabíjecí proud bude také pulzního průběhu, ale velmi dobře vyfiltrován, protože z naměřených hodnot se jeví jako stejnosměrného průběhu, což je pro tyto baterie mnohem šetrnější než pulzní průběh. Nabíjení zde probíhá, podobně jako u předchozího nabíječe, také ve 4 fázích. V první fázi se proud pomalu zvyšuje na nastavenou hodnotu 0,8 A. Ve druhé fázi je baterie nabíjena téměř konstantním proudem, který ke konci této fáze mírně narůstá. Po dosažení

určité hodnoty svorkového napětí baterie, přejde nabíječ do třetí fáze, ve které nabíjecí proud klesá a dochází k pomalejšímu dobití baterie na hodnotu svorkového napětí 14,3 V, při kterém dojde k ukončení nabíjení a nabíječ přejde do čtvrté fáze. Tato fáze, která by měla být udržovací, je v nabíječce pravděpodobně špatně realizována, jelikož docházelo k vybíjení proudem přibližně 0,01 A.

5.4 Průběhy napětí při rychlém testu

Cílem těchto testů bylo dokázat správnou funkčnost „rychlého testu“. Zároveň také ukázat, jak se mění průběhy svorkového napětí při tomto testu v závislosti na SoC, velikosti zatěžovacího (testovacího) proudu, nebo na době zatěžování. První test byl proveden na Pb baterii 12 V / 7,2 Ah (Panasonic LC-R127R2PG1 [12]) pro různé hodnoty SoC. Test byl vždy proveden po odebrání 1/10 jmenovité kapacity z baterie pomocí „vybíjecího testu“. Průběh svorkového napětí a vybíjecího proudu je uveden na obr. B.5. Z grafu je patrná změna odezvy s měnícím se SoC. Nejrychlejší odezvy dosahuje baterie přibližně při SoC=70 %.

Druhý test byl proveden na stejné Pb baterii 12 V / 7,2 Ah pro různé hodnoty vybíjecího (testovacího) proudu. Průběh svorkového napětí pro různé vybíjecí proudy je uveden na obr. B.6. Z grafu je patrné, že odezva se stihne ustálit pouze při testování proudem o velikosti 1 C a 2 C. Můžeme tedy říci, že nejvhodnější je provádět „rychlý test“ se zatěžovacím proudem o hodnotě 1 C nebo 2 C. Pokud by jmenovitá kapacita akumulátoru byla příliš vysoká a elektronická zátěž by neměla dostatečný výkon pro zatěžování proudem o hodnotě 1 C, můžeme ještě použít proud o hodnotě 0,5 C (\equiv C 2), který má také přijatelnou odezvu. Proud o hodnotách nižších není pro tento test vhodný.

Třetí test byl proveden také na stejné Pb baterii 12 V / 7,2 Ah, s testovacím proudem o velikosti 1 C (7,2 A), ale v tomto případě pro různé doby zatížení. Průběh svorkového napětí a proudu pro různé doby zatížení je uveden na obr. B.7. Z grafu je patrné, že k ustálení odezvy při zatížení proudem o hodnotě 1 C dojde až po přibližně 10-ti sekundách od zatížení. Můžeme tedy říci, že čas zatěžování by měl být větší než 10 sekund. Jelikož při zatěžování po dobu 15-ti sekund došlo k ustálení odezvy i u zatěžování proudem o hodnotě 0,5 C, volím tento čas zatěžování jako nejvhodnější. Během těchto 15-ti sekund zatěžování odebereme z baterie pouze 0,03 Ah, tedy nedojde ani k výraznější změně SoC (pokles o přibližně 0,4 %).

5.5 Závislost svorkového napětí naprázdno na SoC

Cílem tohoto testu bylo dokázat, že svorkové napětí Pb baterie naprázdno je téměř lineárně závislé na SoC. Z tohoto tvrzení také vychází odhad SoC pomocí rovnice přímky (viz kap. 5.7). Tento test byl proveden na Pb baterii 12 V / 7,2 Ah (Panasonic LC-R127R2PG1 [12]) pro různé hodnoty SoC. Měření závislosti bylo prováděno pomocí „rychlého testu“, který byl spuštěn vždy po 15-ti minutách od ukončení zatěžování, pomocí kterého byla vždy z baterie odebrána 1/10 jeho jmenovité kapacity pomocí „vybíjecího testu“. Z grafu na obr. B.8, na kterém je uvedena závislost svorkového napětí naprázdno před začátkem „rychlého testu“ a po jeho dokončení, je patrné, že napětí po ukončení testu ještě není zcela ustálené, a proto není vhodné pro určování SoC. U napětí před testem se ale prokázala téměř lineární závislost na SoC, která je narušena pouze na začátku a na konci rozsahu SoC. Výsledkem testu je tvrzení, že závislost ustáleného svorkového napětí Pb baterie naprázdno na hodnotě SoC je téměř lineární a je proto vhodné pro odhad hodnoty SoC.

5.6 Závislost svorkového napětí naprázdno na zatěžovacím proudu

Tento test je pouze potvrzením výsledku z minulého testu, a to, že svorkové napětí Pb baterie naprázdno měřené po dokončení „rychlého testu“ není vhodné pro odhad SoC. Test byl proveden na stejné Pb baterii 12 V / 7,2 Ah pro různé zatěžovací proudy. Výsledná změřená závislost svorkového napětí naprázdno na velikosti zatěžovacího proudu je uvedena na obr. B.9. Hodnota svorkového napětí naprázdno měřeného před „rychlým testem“ by měla být teoreticky konstantní. Pokles uvedený na grafu je způsoben krátkou dobou pro zotavení mezi provedenými testy s různými hodnotami zatěžovacího proudu – časová náročnost testu.

5.7 Odhad SoC v závislosti na dostupné kapacitě

Cílem tohoto testu bylo dokázat možnost snadného a dostatečně přesného odhadu SoC u Pb baterií. Tento odhad byl proveden z naměřeného svorkového napětí naprázdno. Toto měření bylo provedeno vždy po 15-ti minutách od ukončení zatěžování, pomocí kterého byla vždy z baterie odebrána 1/10 jeho jmenovité kapacity pomocí „vybíjecího testu“. Tento test byl proveden na Pb baterii 12 V / 7,2 Ah (Panasonic LC-R127R2PG1 [12]) pro různé hodnoty SoC. Odhad SoC v závislosti na dostupné kapacitě je uveden na obr. B.10. Z grafu, na kterém je také naznačena přímka určující ideální odhad SoC, je patrné, že odhad je velmi přesný v rámci celého rozsahu hodnot SoC. Ještě přesnějšího odhadu by bylo možné dosáhnout v případě měření svorkového

napětí naprázdno s větším časovým odstupem po odpojení zátěže od baterie. Z důvodu časové náročnosti tohoto testu byl zvolen čas pouze 15 minut.

5.8 Závislost vnitřního odporu na SoC

Cílem tohoto testu bylo změřit tvar závislosti vnitřního odporu Pb baterie na SoC a tím ověřit závislost uvedenou na obr. 3.7. Závislost byla měřena na 2 vzorcích Pb baterie 12 V / 5,4 Ah (Leaftron LTX12-5.4 [14]). Tato změřená závislost je uvedena na obr. B.11. Z grafu je zřejmé, že vzorek č. 1 má vyšší vnitřní odpor, než vzorek č.2, ale oba vykazují stejný tvar závislosti vnitřního odporu na SoC. Velmi podobný tvar má i křivka uvedená na obr. 3.7. Můžeme tedy říci, že tvrzení o zvyšujícím se vnitřním odporu se snižujícím se SoC je pravdivé. Přesný tvar křivky vždy závisí na typu testovaného akumulátoru a může být velmi proměnlivý, protože závisí na mnoha faktorech uvedených v kap. 3.1. Vzhledem k této proměnlivosti a nelineárnosti křivky, není hodnota vnitřního odporu vhodná pro odhad SoC.

5.9 Závislost vnitřního odporu na zatěžovacím proudu

Cílem tohoto testu bylo zvolit nejvhodnější velikost testovacího proudu při „rychlém testu“ pro měření vnitřního odporu. Při měření této závislosti byly použity 2 vzorky Pb baterie 12 V / 7,2 Ah (Panasonic LC-R127R2PG1 [12]), 2 vzorky Pb baterie 12 V / 5,4 Ah (Leaftron LTX12-5.4 [14]) a startovací Pb baterie 12 V / 44 Ah (SPEED+GO). Závislosti byly měřeny pomocí „rychlého testu“ pro různé velikosti testovacího proudu. Změřené závislosti vnitřního odporu na velikosti testovacího proudu jsou uvedeny na obr. B.12. Z tohoto grafu je zřejmé, že naměřený vnitřní odpor baterie klesá se vzrůstající velikostí testovacího proudu. Vzorek č. 2 Pb baterie 12 V / 5,4 Ah vykazuje určitou anomálii, kdy u testovacího proudu s nejvyšší hodnotou velikost vnitřního odporu mírně vzrostla. Předpokládám, že to bude způsobené nějakou chybou měření. Z ostatních naměřených závislostí můžeme říci, že vhodnou velikostí testovacího proudu je 0,5 C, 1 C nebo 2 C. Pro tyto hodnoty se naměřený vnitřní odpor téměř nemění, dosahujeme tedy rozumné přesnosti měření.

5.10 Porovnání měření vnitřního odporu při zatížení a zotavení

Tento test si kladl za cíl zjistit, zda je vhodnější měřit vnitřní odpor baterie těsně po zatížení, nebo těsně po odpojení zátěže (zotavení ze zatížení). Podle teoretického předpokladu, by měly být obě naměřené hodnoty stejné, ale bohužel tomu tak není.

Test byl proveden na Pb baterii 12 V / 5,4 Ah (Leaftron LTX12-5.4 [14]). Naměřené hodnoty vnitřního odporu pro různé proudy v obou oblastech jsou uvedeny na obr. B.13. Z grafu je patrné, že naměřené hodnoty jsou stejné pouze pro maximální a minimální zvolený testovací proud. Minimální hodnotu testovacího proudu vyloučíme, protože přesnost měření vnitřního odporu je zde nejhorší. Naměřené hodnoty pro ostatní proudy jsou rozdílné. Může to být způsobeno chemickými procesy probíhajícími uvnitř akumulátoru, nebo i způsobem měření. Důležité je, že nejsou shodné a nejsem schopen říci, který způsob měření je přesnější. Proto volím jako výslednou hodnotu vnitřního odporu baterie aritmetický průměr z obou dvou naměřených hodnot.

5.11 Závislost odezvy při zatížení a zotavení na SoC

Cílem tohoto testu bylo zjistit, zda platí předpoklad o zvětšující se ploše odezvy (EDR) se snižujícím se SoC uvedený v kap. 3.2.3 pro akumulátory založené na bázi lithia také pro Pb akumulátory. Test byl proveden na Pb baterie 12 V / 7,2 Ah (Panasonic LC-R127R2PG1 [12]). Měření obou odezev bylo prováděno pomocí „rychlého testu“, který byl spuštěn vždy po 15-ti minutách od ukončení zatěžování, pomocí kterého byla vždy z baterie odebrána 1/10 jeho jmenovité kapacity pomocí „vybíjecího testu“. Naměřené závislosti jsou uvedeny na obr. B.14. Z grafu je zřejmé, že předpoklad pro akumulátory založené na bázi lithia neplatí pro Pb akumulátory. Požadované zvětšování plochy odezvy se snižujícím se SoC dosahuje pouze odezva na zatížení, a to pouze od hodnoty SoC 80 %.

5.12 Závislost odezvy při zatížení a zotavení na zatěžovacím proudu a délce zatěžování

Provedeným testem 5.11 bylo zjištěno, že Pb akumulátory se nechovají podle předpokladů pro akumulátory založené na bázi lithia. A právě z tohoto důvodu jsem se rozhodl provést několik různých testů, které by určily chování odezev Pb akumulátorů. Testy jsem prováděl na všech bateriích, stejně jako při testu 5.9 pomocí „rychlého testu“. Naměřil jsem závislosti odezvy při zatížení (viz obr. B.15) a zotavení (viz obr. B.16) na zatěžovacím proudu, a závislosti odezvy při zatížení (viz obr. B.17) a zotavení (viz obr. B.18) na délce zatěžování.

Porovnáním grafů pro odezvy při zotavení můžeme říci, že délka zatěžování nemá výraznější vliv na tvar křivky, a se zvyšujícím se testovacím proudem se zvětšuje plocha odezvy při zotavení. Pokud porovnáme grafy s odezvami na zatížení, můžeme říci, že tvar naměřených křivek se výrazně mění s velikostí zatěžovacího proudu i s délkou zatěžování. Výsledkem tohoto testu je, že použití naměřených hodnot odezev

na zatížení a při zotavení u Pb akumulátorů není možné bez další informace. Tato informace by mohla být doplněna provedením dalších testů na větším počtu baterií, mezi kterými by byly i baterie s různými, a především známými, stavy (SoH). Poté by mohlo být možné tyto hodnoty využít pro odhad stavu baterie (orientační hodnota SoH).

Kapitola 6

Metodika optimálního provozu akumulátorů

Cílem této kapitoly je poskytnout metodické pokyny pro optimální provoz akumulátorů. Provoz by měl být optimální s ohledem na dosažení vysoké spolehlivosti systému pro zálohování napájení a maximální životnosti použitých akumulátorů. Jelikož byly akumulátory typu LiFePO₄ částečně z této práce vyjmuty (po dohodě s vedoucím práce), bude se tato kapitola převážně věnovat Pb akumulátorům.

Většina potřebných informací o závislostech jednotlivých parametrů akumulátorů na jiných parametrech, nebo vlivech (faktorech) již byla v práci uvedena v předchozích kapitolách, proto se zde budu často odkazovat na dříve uvedené skutečnosti a grafy.

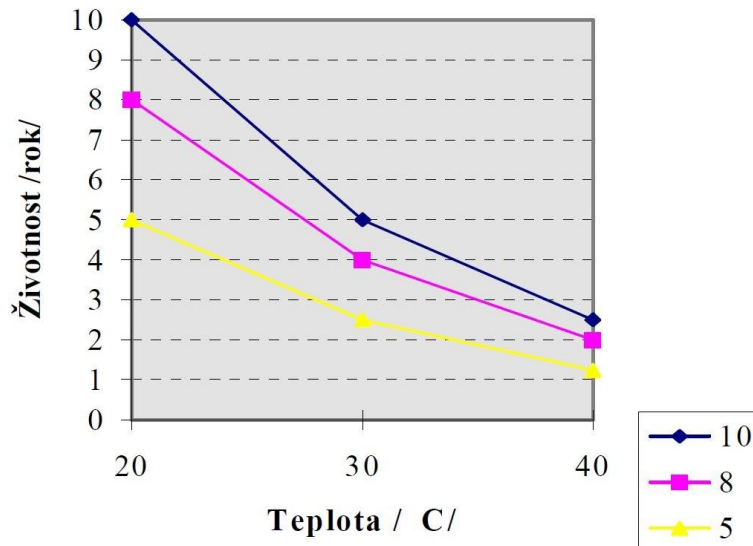
Nejdříve by bylo vhodné provést rozbor zadaného problému. Najít optimální metodiku provozu akumulátorů v závislosti na obou zadaných požadavcích nebude snadné, protože tyto požadavky jsou částečně protichůdné. Bude tedy nutné najít určitý kompromis.

Pro dosažení vysoké spolehlivosti systému pro zálohování napájení je nutné, aby byly akumulátory stále plně nabité, a měly tedy k dispozici nejvyšší možnou dostupnou kapacitu. Není tedy možné například provádět testování kapacity vybíjením, jelikož během tohoto testu dojde k plnému vybití akumulátorů. Nikdy nevíme, kdy dojde k výpadku dodávky energie z primárního zdroje napájení. Mohlo by se stát, že k němu dojde právě v okamžiku, kdy budou akumulátory vybíjeny testem kapacity, nebo dokonce budou zrovna plně vybité. Tato situace by neměla nikdy nastat. Další podmínkou pro dosažení vysoké spolehlivosti systému pro zálohování napájení je zachování nejvyšší možné maximální dostupné kapacity akumulátorů po celou dobu jejich životnosti, která by měla být co nejdelší.

Pro dosažení maximální životnosti použitých akumulátorů je důležité zajistit správné podmínky v prostředí, kde jsou použity, správné nabíjení a dobíjení, cyklování, zatěžování co nejnižším proudem a zajistit, aby nikdy nebyly vybíjeny na vyšší hodnotu DoD, než je doporučená.

Velmi důležitá je provozní **teplota** akumulátorů a teplota okolního prostředí, jelikož na teplotě závisí téměř všechny parametry akumulátorů. Tato závislost je téměř vždy negativní se zvyšující se teplotou. Proto bychom měli zajistit, aby teplota v místnosti,

kde jsou uloženy akumulátory systému pro zálohování napájení, byla nejlépe konstantní a pohybovala se kolem 20 °C (maximálně 25 °C). Ukázka závislosti životnosti Pb akumulátorů různých typů na teplotě okolí vyšší než 20 °C je uvedena na obr. 6.1. Určitým způsobem můžeme tuto závislost na teplotě zmírnit, pokud přizpůsobíme udržovací nabíjecí napětí vyšší teplotě (napětí snížíme). [56]



Obrázek 6.1. Závislost životnosti Pb akumulátorů na teplotě (Zdroj: [56])

Na teplotě také závisí **samovybíjení**, tedy samovolná ztráta energie v době nepoužívání (nedobíjení). Pro dlouhodobější skladování akumulátorů založených na bázi lithia je doporučováno neskladovat akumulátory plně nabitě, ale pouze částečně. Příklad poklesu kapacity v závislosti na teplotě a stavu nabití, při kterém byly uskladněny Li-Ion akumulátory je uveden v tab. 6.1. Uvedené hodnoty ZDK (Zbývající Dostupná Kapacita) jsou zjištěny po 1 roce skladování. Uvedené tvrzení platí i pro akumulátory nasazené v systému zálohovaného napájení, které nejsou v permanentním udržovacím režimu, ale jsou dobíjeny po určité době, nebo ztrátě kapacity. Akumulátory nikdy nesmíme skladovat vybité, nebo s nízkým stavem nabití. Pro akumulátory založené na bázi lithia je doporučována hodnota SoC pro uskladnění kolem 40 %. U Pb akumulátorů bývá samovybíjení vyšší než u akumulátorů založených na bázi lithia, ale zase jim nevádí skladování v plném stavu nabití. Pb akumulátorům nejvíce škodí vysoké hodnoty svorkového napětí (udržovací režim), při kterých dochází ke korozi mřížek elektrod, která je nevratná. A dále nízký stav nabití, při kterém dochází k sulfataci. Oba dva jevy způsobují značné snížení maximální dostupné kapacity, proto je potřeba se jim vyvarovat. [42], [57]

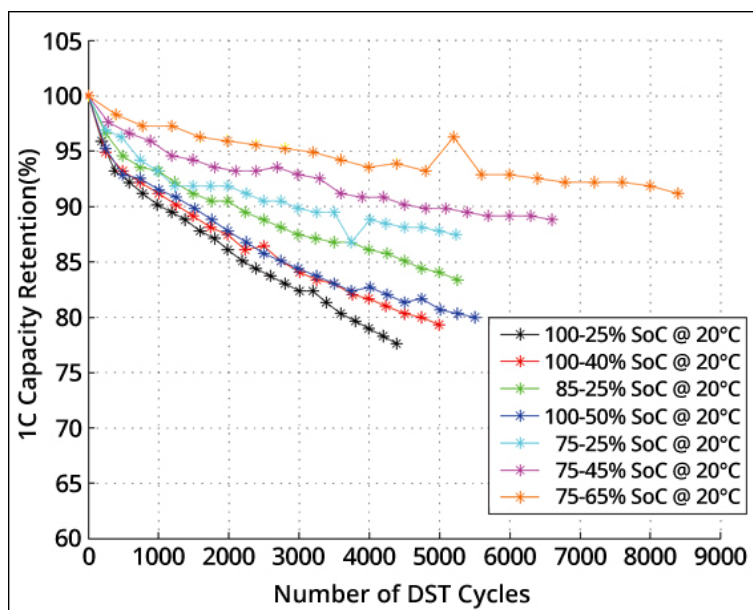
Velmi důležité je zajistit, aby akumulátory nikdy nebyly vybíjeny na vyšší hodnotu **DoD**, než je doporučena. U Pb akumulátorů je to 40 až 50 % DoD, u akumulátorů založených na bázi lithia je to 75 až 80 % DoD. Jelikož se zvyšující se hloubkou vybíjení

Teplota skladování	Nabito na 40 %	Nabito na 100 %
0°C	ZDK 98 %	ZDK 94 %
25°C	ZDK 95 %	ZDK 80 %
40°C	ZDK 85 %	ZDK 65 %
60°C	ZDK 75 %	ZDK 60 %

Tabulka 6.1. Pokles kapacity v závislosti na teplotě a stavu nabití Li-Ion akumulátoru po 1 roce skladování (Zdroje: [42], [57])

Úroveň vybití (DoD)	Startovací Pb baterie	Trakční Pb baterie	LiFePO4
100 %	12 - 15 cyklů	150 - 200 cyklů	600 cyklů
50 %	100 - 120 cyklů	400 - 500 cyklů	1950 cyklů
30 %	130 - 150 cyklů	1000 a více cyklů	5500 cyklů

Tabulka 6.2. Průměrný počet cyklů Pb startovací a trakční baterie a LiFePO4 akumulátorů (Zdroje: [8], [42])



Obrázek 6.2. Závislost počtu cyklů Li-Ion akumulátoru na rozsahu SoC (omezení úrovně nabití a vybití) (Zdroj: [42])

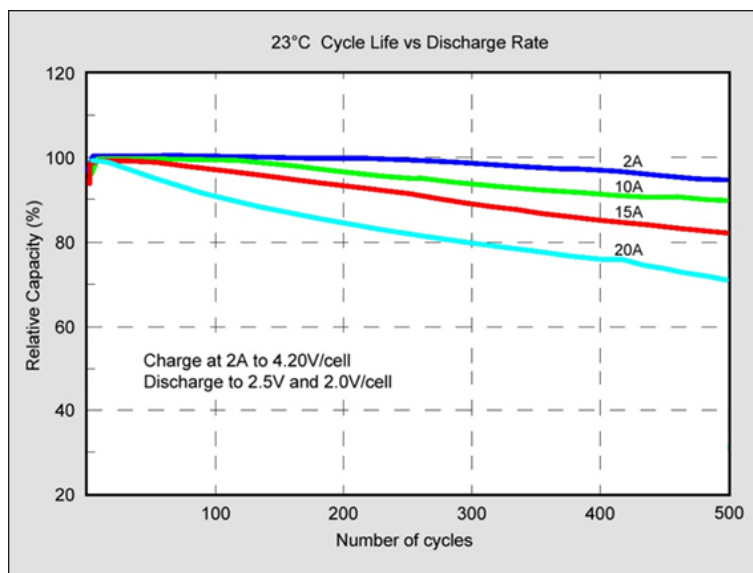
rapidně klesá počet možných cyklů akumulátoru. Příklad počtu cyklů Pb startovacích a trakčních baterií a LiFePO4 akumulátorů pro 3 různé úrovně DoD je uveden v tab. 6.2.

Pro dosažení přijatelné životnosti Pb akumulátorů nesmí hloubka vybíjení (DoD) překročit 80 %, ale pro dosažení maximální životnosti, by hloubka vybíjení neměla překročit 30 až 40 %. Při delším skladování je nutné zajistit průběžné nabíjení (jednou

za 4 až 6 měsíců), nebo lépe provedení cyklu (vybití na doporučenou hodnotu DoD a následné plné nabití). Takovéto cyklování je pro Pb akumulátory nejšetrnější. [45]

U akumulátorů založených na bázi lithia je nejvhodnější udržovat jejich stav nabití v rozsahu 75 až 65 % SoC (viz obr. 6.2). Při tomto rozsahu hodnot SoC je docíleno nejdelší životnosti. Tento rozsah je dobře použitelný pro uskladnění akumulátorů, ale ne pro provoz v zařízení. Stav nabití lithiových akumulátorů provozovaných v libovolném zařízení je vhodné udržovat v rozsahu 85 až 25 % SoC. [42]

Maximální dostupná kapacita akumulátorů je také závislá na velikosti odebíraného proudu (viz obr. 6.3), a s tím související zkracování životnosti (nižší počet cyklů). Ale tato závislost je těžko řešitelná. Je vhodné napájet z akumulátorů pouze to nejnütnější a šetřit tím energii v nich uloženou. S nižším počtem připojených zařízení bude také nižší odběr a akumulátory budou pomaleji stárnout.



Obrázek 6.3. Životnost Li-Ion akumulátoru v závislosti na vybíjecím proudu (Zdroj: [19])

Neméně důležité je také **nabíjení a dobíjení** akumulátorů, které zde již bylo okrajově zmíněno. Nabíjení by mělo být prováděno samozřejmě nabíječem vhodným pro daný typ akumulátorů se správně nastaveným napětím pro ukončení nabíjení. Nabíjecí proud by měl být co nejnižší, ale také s ohledem na přijatelnou dobu nabíjení. Čím nižším proudem budeme akumulátory nabíjet, tím vyšší životnosti mohou dosáhnout. Velkou otázkou je **dobíjení** akumulátorů. Pokud jsou akumulátory uskladněny, nebo nasazeny v systému zálohovaného napájení, který napájí připojená zařízení z akumulátorů pouze výjimečně, můžeme mít k akumulátorům permanentně připojený nabíječ, který bude pracovat v udržovacím režimu. Je to nejjednodušší řešení pro obsluhu a také máme k dispozici maximální dostupnou kapacitu akumulátorů v libovolný okamžik, ale dochází k rychlému stárnutí akumulátorů. Tento režim je tedy nejvhodnější z hlediska

vysoké spolehlivosti zálohovacího systému, ale není vhodný pro zajištění maximální životnosti akumulátorů. S rychlejším poklesem maximální dostupné kapacity akumulátorů navíc souvisí zkrácení možné doby provozu zálohovaných přístrojů při provozu z akumulátorů. Mohli bychom tedy říci, že klesá i spolehlivost zálohovacího systému.

Druhou, lepší, možností je akumulátory neponechávat v udržovacím režimu, ale po dokončení nabíjení nabíječ odpojit a nechat akumulátory bez dalšího dobíjení („udržování“), jako by byly uskladněny. Pokud dojde k jejich vybití napájením zálohovaných přístrojů v době výpadku, je nutné opět (automaticky) připojit nabíječ a zahájit nabíjení. Pokud by dlouho nedošlo k využití energie uložené v akumulátorech, bylo by vhodné provést jejich vybití na doporučenou hodnotu DoD a jejich opětovné nabití. Toto umělé cyklování akumulátorům téměř neškodí, a díky tomuto provozu se jejich životnost může velmi prodloužit. Otázkou ale je, kdy provádět tento obnovovací cyklus. Tento okamžik může být definován časovým údajem, poklesem napětí, nebo SoC na určitou hodnotu. Osobně bych tento obnovovací cyklus prováděl 1 krát za měsíc, nebo při poklesu SoC o 5 %. Tím bude zajištěna vysoká hodnota dostupné kapacity, a zároveň prodloužení životnosti akumulátorů. Při provádění tohoto obnovovacího cyklu sady akumulátorů musí být tato sada odpojena od systému zálohovaného napájení a zároveň k němu musí být připojena jiná sada akumulátorů pro zajištění permanentního zálohování.

Pokud bych měl na závěr shrnout doporučení pro provoz Pb akumulátorů, pak mohu říci, že je vhodné je nabíjet na úroveň SoC 100 % a po nabití je odpojit od nabíječe a nechat volně, dokud nepoklesne hodnota SoC o 5 %, nebo neuplyne 1 měsíc. V tomto okamžiku je vhodné provést obnovovací cyklus složený z vybití akumulátoru na hodnotu DoD 40 % a poté provést plné nabití. Stejný provoz můžu doporučit i u LiFePO₄ akumulátorů, pouze je vhodné je nabíjet na hodnotu SoC 85 % a vybití při obnovovacím cyklu je možné provádět až na hodnotu SoC 25 % (75 % DoD). Při použití akumulátorů na bázi lithia je nutné použít balancer, který bude vyrovnávat napětí na jednotlivých člancích (ekvalizace), což výrazně prodlouží životnost celé baterie.

V této kapitole byly použity tyto zdroje: [8] [19], [32], [42], [66], [75].

Kapitola 7

Závěr

Zadání této diplomové práce bylo složeno z několika dílčích úkolů, a v tuto chvíli mohu říci, že byly všechny splněny. Jedním z úkolů bylo navrhnout systém pro zálohování napájení časových a frekvenčních etalonů a dalších přístrojů v Laboratoři přesného času a frekvence FEL ČVUT. Provedený návrh je uveden v kap. 2.3 a kompletní schéma navrženého systému zálohování napájení je uvedeno na obr. 2.13. Tento systém je složen ze 2 bateriových systémů různého typu. Prvním je bateriový systém složený z Pb baterií o nominálním napětí 24 V a kapacitě 120 Ah. Druhým je bateriový systém složený z akumulátorů typu LiFePO₄, jehož nominální napětí je 25,6 V a kapacita 60 Ah, přičemž maximální dostupná kapacita, s ohledem na hloubku vybíjení, je srovnatelná. Osazení dvěma bateriovými systémy je vhodné z hlediska permanentního zálohování i při probíhající údržbě na jednom bateriovém systému a tedy možnost provádět různé testy na různých typech akumulátorů. Jedná se tedy o laboratorní systém zálohování napájení s dalším využitím pro různé závěrečné práce.

Dalším úkolem bylo provést rozbor metod testování parametrů a zjišťování stavu akumulátorů. Tímto úkolem se zabývá kap. 3. Metod testování různých parametrů akumulátorů existuje velké množství, ale kompletní princip metody je známý pouze u zlomku z nich. V rozboru je uveden obsáhlejší seznam různých metod testování parametrů akumulátorů, ale pouze některé z nich jsou následně rozebrány podrobněji. Všechny podrobněji popsané metody jsou následně implementovány v realizovaném testeru.

Jak již nastínil předchozí odstavec, dalším úkolem této práce, a to jedním z nejdůležitějších, bylo navrhnout a realizovat tester akumulátorů. Tester parametrů a stavu akumulátorů jsem navrhl a realizoval. Kompletní popis je uveden v kap. 4. Realizovaný tester je laboratorního typu, je tedy složen z různých laboratorních přístrojů, které jsou ovládány pomocí uživatelské aplikace spuštěné na počítači, ke kterému jsou přístroje připojeny. Pomocí tohoto realizovaného testeru bylo provedeno několik různých testů (viz kap. 5), které potvrdily správnou funkčnost navrženého testeru a navíc i některé teoretické předpoklady uvedené u vlastností akumulátorů a testovacích metod.

Tento tester byl po předchozí domluvě s vedoucím práce omezen pouze na Pb baterie z důvodu nedostupnosti akumulátorů typu LiFePO₄ pro testování v době realizace testeru. Aplikace testeru je předpřipravena pro implementaci testovacích metod

pro LiFePO₄ akumulátory. V tuto chvíli je plně funkční pro Pb akumulátory a nabízí 4 různé druhy testů. Po domluvě s vedoucím práce nebyl zatím realizovaný tester použit pro kontinuální monitoring stavu zálohovacích akumulátorů, protože tyto akumulátory zatím nejsou v Laboratoři přesného času a frekvence FEL ČVUT k dispozici. Navíc pro získání použitelných výsledků by bylo zapotřebí provádět monitorování stavu akumulátorů minimálně 1 měsíc a to není v rámci diplomové práce možné, testování je tedy velice časově náročné. Mnohem důležitější pro tuto práci bylo provést více různých testů pomocí realizovaného testeru.

Posledním úkolem bylo navrhnout metodiku pro zajištění optimálního provozu akumulátorů v systému zálohovaného napájení s ohledem na dosažení vysoké spolehlivosti zálohovacího systému a maximální životnosti použitých akumulátorů. Tato metodika je zpracovaná v kap. 6. Výsledkem je nejvhodnější režim nabíjení a vybíjení akumulátorů nasazených v systému zálohování napájení a způsob jejich pravidelné údržby pro zajištění maximální životnosti těchto akumulátorů.

Závěrem tedy můžu říci, že jsem splnil všechny požadované úkoly zadání této diplomové práce.

Literatura

- [1] *5071A - Cesium Primary Frequency Standard* [online]. Microsemi. [vid. 13.4.2018]. Dostupné z:
<https://www.microsemi.com/product-directory/cesium-frequency-references/4115-5071a-cesium-primary-frequency-standard>
- [2] *5071A Primary Frequency Standard (datasheet)* [online]. Microsemi. [vid. 23.4.2018]. Dostupné z:
https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/133269-5071a-datasheet
- [3] *Co byste měli vědět o záložních zdrojích UPS* [online]. Abax. [vid. 27.4.2018]. Dostupné z:
<http://www.abax.cz/aktuality/co-byste-meli-vedet-o-zaloznich-zdrojich-ups/>
- [4] *Unikátní rychlonabíjecí stanice ukrývá výjimečnou baterii* [online]. Technický týdeník, (pj). [vid. 9.5.2018]. Dostupné z:
https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/unikatni-rychlonabijeci-stance-ukryva-vyjimecnou-baterii_43290.html
- [5] Horčík J. *Na Českobudějovicku roste první česká obří baterie pro rozvodnou síť* [online]. Hybrid.cz. [vid. 9.5.2018]. Dostupné z:
<http://www.hybrid.cz/na-ceskobudejovicku-roste-prvni-ceska-obri-baterie-pro-rozvodnou-sit>
- [6] *Secondary Batteries: Valve Regulated Lead-Acid Batteries* [online]. Panasonic. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
<https://eu.industrial.panasonic.com/products/batteries-energy-products/secondary-batteries-rechargeable-batteries/valve-regulated-lead>
- [7] *How does the Lead Acid Battery Work?* [online]. Battery University. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries
- [8] *Jak funguje olověný akumulátor?* [online]. TZB-info. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [9] Connor J. *Battery Showdown: Lead-Acid vs. Lithium-Ion* [online]. 22.1.2017, Solar Micro Grid. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
<https://medium.com/solar-microgrid/battery-showdown-lead-acid-vs-lithium-ion-1d37a1998287>

- [10] *Olověný akumulátor* [online]. Wikipedie. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Olověný_akumulátor
- [11] Marconi *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení* [online]. 20.12.2008. [vid. 10.5.2018].
Dostupné z:
http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf
- [12] *Panasonic LC-R127R2PG* (datasheet) [online]. Panasonic. [vid. 10.5.2018].
Dostupné z:
https://www.tracopower.com/products/tsp-panas_072.pdf
- [13] *Valve regulated lead acid batteries* (datasheet) [online]. Panasonic. [vid. 10.5.2018].
Dostupné z:
http://www.mouser.com/ds/2/315/Panasonic_LC-R127R2P-463155.pdf
- [14] *LTX SERIES-High Rate – LTX12-5.4* (datasheet) [online]. Leaftron.
[vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
<https://eshop.micronix.cz/data/cz/att/002/4230-2379.pdf>
- [15] Ing. Jandura P. *Přehled a vlastnosti současných akumulátorů používaných v elektromobilech* [online]. 15. červen 2010, Liberec. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
http://skfm2010.tul.cz/postery/Jandura_Pavel.pdf
- [16] *Převzatý obrázek* [online]. Bpress. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
<http://www.bpress.cn/list/di/pic/75/273275.jpg>
- [17] *Niklkadmiový akumulátor (NiCd)* [online]. Bateria. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
<http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--pouceni/jak-to-funguje-/niklkadmiovy-akumulator-nicd.htm>
- [18] *Battery Types Used in Wind and Solar Electric Systems* [online]. Northern Arizona Wind & Sun. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.solar-electric.com/learning-center/batteries-and-charging/battery-types-for-solar-electric-systems.html>
- [19] *Cycle Performance of NiCd, NiMH and Li-ion* [online]. Battery University.
[vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/cycle_performance_of_nicd_nimh_and_li_ion
- [20] *Nikl-kadmiový akumulátor* [online]. Wikipedie. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiový_akumulátor
- [21] *Jak na baterie* [online]. Cettra. [vid. 10.5.2018]. Dostupné z:
<http://www.cettra.cz/baterie/jak-na-baterie>
- [22] *Převzatý obrázek* [online]. Marine Electronics. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.marineelectronicsjournal.com/content/news/news.asp?show=view&ac=1&a=140>

- [23] Zajíc M. *Často kladené otázky o LiIon člancích* [online]. Zajic.cz. [vid. 11.5.2018].
Dostupné z:
<http://www.zajic.cz/nablion/lionfaq.htm>
- [24] *Li-ion baterie: principy, provoz, rady* [online]. Cnews.cz. [vid. 11.5.2018].
Dostupné z:
<https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>
- [25] *Rozdíly mezi bateriemi typu Li-Ion a Li-Pol* [online]. Smart Mobil. [vid. 11.5.2018].
Dostupné z:
<http://www.smart-mobil.eu/clanky/44-rozdily-mezi-bateriemi-typu-li-ion-a-li-pol-/>
- [26] *Lithium-iontový akumulátor* [online]. Wikipedie. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontový_akumulátor
- [27] *How to choose the best battery for a solar energy system* [online]. EnergySage. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-are-the-best-batteries-for-solar-panels/>
- [28] *Summary Table of Lithium-based Batteries* [online]. Battery University. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries
- [29] *Types of Lithium-ion* [online]. Battery University. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [30] *Převzatý obrázek* [online]. EV lithium. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<http://www.evlithium.com/LiFePO4-Battery/>
- [31] *Lithiové - Lithium Ion baterie* [online]. fgFORTE. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.fg-forte.cz/lithiove-lithium-ion-baterie.html>
- [32] *10 důvodů proč LiFEPO baterie nahrazují Pb baterie* [online]. Prosolar. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<http://prosolar.cz/news/10-10-duvodu-proc-LiFEPO-baterie-nahrazuji-Pb-baterie>
- [33] *Lithium-železo-fosfátový akumulátor* [online]. Wikipedie. [vid. 11.5.2018].
Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-železo-fosfátový_akumulátor
- [34] *GWL/Power WB-LYP60AHA LiFeYPO₄ (3.2V/60Ah)* [online]. GWL Power. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/WB-LYP60AHA-LiFeYPO4-3-2V-60Ah.html>
- [35] *Návrh a provoz elektrického akumulátoru v pasivním domě „Plus“ se 17 bytovými jednotkami* [online]. TZB-info. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:

- <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/15393-navrh-a-provoz-elektrickeho-akumulatoru-v-pasivnim-dome-plus-se-17-bytovymi-jednotkami>
- [36] *What is Lithium Battery Technology?* [online]. Northern Arizona Wind & Sun. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.solar-electric.com/learning-center/batteries-and-charging/lithium-battery-technology.html>
- [37] Zilvar J. *Přichází doba akumulátorů* [online]. TZB-info. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13444-prichazi-doba-akumulatoru>
- [38] *Převzatý obrázek* [online]. HE3DA. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.he3da.cz/kopie-de-news>
- [39] *HE3DA* [online]. HE3DA. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.he3da.cz/>
- [40] *Představení domácí baterie HE3DA na výstavě Smart energy forum 2017* [online]. TZB-info. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16392-predstaveni-domaci-baterie-he3da-na-vystave-smart-energy-forum-2017>
- [41] Zilvar J. *HE3DA: chceme vyrábět akumulátory do automobilů a pro solární pole* [online]. TZB-info. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/14422-he3da-chceme-vyrabet-akumulatory-do-automobilu-a-pro-solarni-pole>
- [42] *How to Prolong Lithium-based Batteries* [online]. Battery University. [vid. 11.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries
- [43] *Lithium-ion vs Lead-Acid cost analysis* [online]. PowerTech. [vid. 13.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-vs-lead-acid-cost-analysis/>
- [44] *GWL/Power WB-LYP60AHA LiFeYPO₄ (3.2V/60Ah)* [online]. GWL POWER. [vid. 14.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/WB-LYP60AHA-LiFeYPO4-3-2V-60Ah.html>
- [45] *Pb záložní akumulátor VRLA GEL 12V/120Ah (OTL120-12)* [online]. i4wifi. [vid. 14.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.i4wifi.cz/Napajeci-zdroje-1/Baterie-pro-zalozni-zdroje/Pb-zalozni-akumulator-VRLA-GEL-12V-120Ah-OTL120-12.html>

- [46] *Profesionální nabíječka akumulátorů DECA DC3713* [online]. Himalaj. [vid. 14.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.himalaj.cz/product/nabijecky-a-testery/397/profesionalni-nabijecka-akumulatoru-deca/59115>
- [47] *GWL/Power Charger 24V/20A for LFP/LTO cells (8 cells), BMS input* [online]. GWL POWER. [vid. 14.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.ev-power.eu/Chargers-6V-to-36V/Charger-24V-20A-for-LFP-LTO-cells-8-cells-BMS-input.html>
- [48] *GWL/Power Simple Battery Management Board 8 cells (24V/60A)* [online]. GWL POWER. [vid. 14.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.ev-power.eu/Battery-Management/Simple-Battery-Management-Board-8-cells-24V-60A.html>
- [49] *GWL/Power Cell Balancing Module (3.60V- 1.7A)* [online]. GWL POWER. [vid. 14.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.ev-power.eu/Battery-Management/Cell-Balancing-Module-3-60V-1-7A.html>
- [50] *Detektor napětí 110-230V* [online]. HW group. [vid. 14.5.2018]. Dostupné z:
http://www.obchod.hw.cz/detektor-napeti-110-230v_d43273.html
- [51] *Měnič napětí P1000U-242, 24V/230V - 1000W. Čistá sinusovka. CARSPA* [online]. Deramax. [vid. 14.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.deramax.cz/menic-napeti-p1000u-242-24v-230v-1000w-cista-sinusovka-carspa>
- [52] Piller S., Perrin M., Jossen A. *Methods for state-of-charge determination and their applications* [online]. Journal of Power Sources, Volume 96, Issue 1, 1.6.2001, str. 113-120. [vid. 19.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775301005602>
- [53] *Handbook for Stationary AGM-VRLA Batteries Part 2: Installation, Commissioning and Operation* [online]. 7.1.2012, AGM-Handbook, Industrial Power, Application Engineering. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
<http://docplayer.net/26363297-Handbook-for-stationary-agm-vrla-batteries-part-2-installation-commissioning-and-operation.html>
- [54] *BU-902: How to Measure Internal Resistance* [online]. Battery University. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_internal_resistance
- [55] Moravec J. *Záložní zdroje elektrické energie – 2.díl: Statické zdroje* [online]. 13.10.2015, O energetice. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
<http://oenergetice.cz/elektrina/zalozni-zdroje-elektricke-energie-2-dil-staticke-zdroje/>

- [56] Ing. Gric P. *Eurobat - Rukověť ke specifikaci uzavřených olověných akumulátorových článků pro staničních použití* [online]. Praha, PEG. [vid. 19.5.2018].
Dostupné z:
<http://peg.cz/peg/clanky/eurobat>
- [57] *Používání a údržba baterie* [online]. Elektro sport. [vid. 19.5.2018]. Dostupné z:
<http://elektrosport.cz/vse-o-elektrokolech/baterie/jak-pecovat-o-baterii-elektrokola>
- [58] *Jak je to s baterií?* [online]. E totem. [vid. 19.5.2018]. Dostupné z:
<http://www.e-totem.cz/o-elektrokolech/jak-je-to-s-baterii>
- [59] *State of health* [online]. Wikipedia. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/State_of_health
- [60] Zou Y., Hu X., Ma H., Li S. E. *Combined State of Charge and State of Health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan* [online]. Journal of Power Sources, Volume 273, 1.1.2015, str. 793-803. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775314015572>
- [61] *Battery Test Methods* [online]. Battery University. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_test_methods
- [62] *BU-914: Battery Test Summary Table* [online]. Battery University. [vid. 20.5.2018].
Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_914_battery_test_summary_table
- [63] *Battery Rapid-test Methods* [online]. Battery University. [vid. 19.5.2018].
Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_907a_battery_rapid_test_methods
- [64] *BU-902a: How to Measure CCA* [online]. Battery University. [vid. 20.5.2018].
Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_cca_cold_cranking_amp
- [65] *BU-907: Testing Lithium-based Batteries* [online]. Battery University.
[vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/testing_lithium_based_batteries
- [66] *BU-905a: Testing Starter Batteries in Vehicles* [online]. Battery University.
[vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_905a_testing_starter_batteries_in_vehicles
- [67] *BU-904: How to Measure Capacity* [online]. Battery University. [vid. 20.5.2018].
Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_capacity

- [68] *BU-903: How to Measure State-of-charge* [online]. Battery University. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge
- [69] *Testing Nickel-based Batteries* [online]. Battery University. [vid. 19.5.2018]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/testing_nickel_based_batteries
- [70] Schweiger H. G., Obeidi O., Komesker O., Raschke A., Schiemann M., Zehner C., Gehnen M., Keller M., Birke P. *Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells* [online]. *Sensors* 2010, 10, 5604–5625. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
<http://www.mdpi.com/1424-8220/10/6/5604>
- [71] Chang W. *The State of Charge Estimating Methods for Battery A Review* [online]. Hindawi Publishing Corporation, Volume 2013, Article ID 953792. [vid. 20.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/953792/>
- [72] *Programmable DC Electronic Load Operation Manual V1.0*. [online]. Benchtop instrument. [vid. 22.5.2018]. Dostupné z:
http://www.twintex.com.tw/proimages/SZ_Operation_Manual/PPL_Programmable_DC_Electronic_Load_Users_Manual_V01_20161214_NEU.pdf
- [73] *High-Resolution LXI Digitizers* [online]. Keysight Technologies. [vid. 22.5.2018]. Dostupné z:
<https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-9636EN.pdf?id=1493916>
- [74] *Capacity Testing of VRLA Batteries* [online]. Technical Bulletin 41-7135. C&D Technologies, 2012. [vid. 23.5.2018]. Dostupné z:
http://www.cdtechno.com/pdf/ref/41_7135_0412.pdf
- [75] Lukeš J. *Jak správně nabíjet akumulátory (baterie) v mobilních zařízeních?* [online]. 19.8.2015, WM mania. [vid. 19.5.2018]. Dostupné z:
<https://wmmania.cz/clanek/jak-spravne-nabijet-bezne-li-ion-akumulatory-chytrych-zarizeni/>

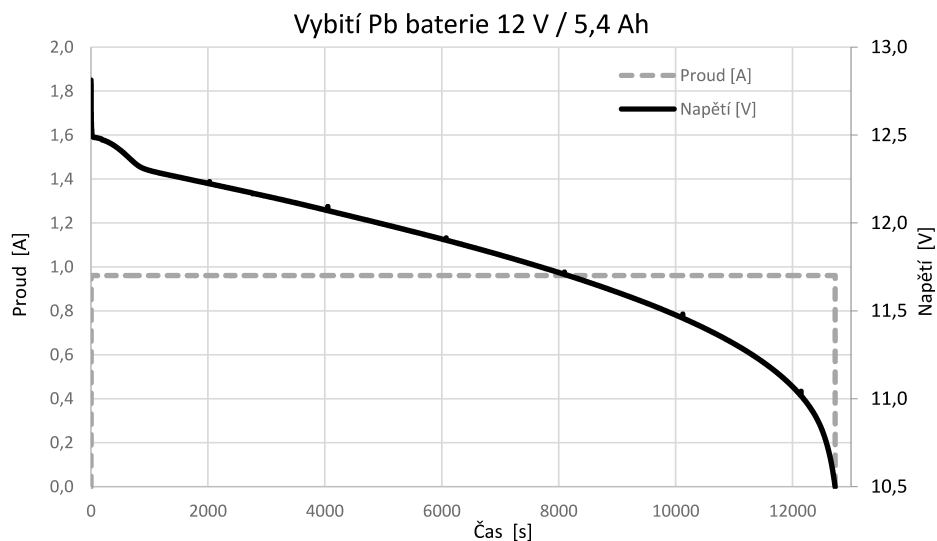
Příloha A

Zkratky použité v této práci

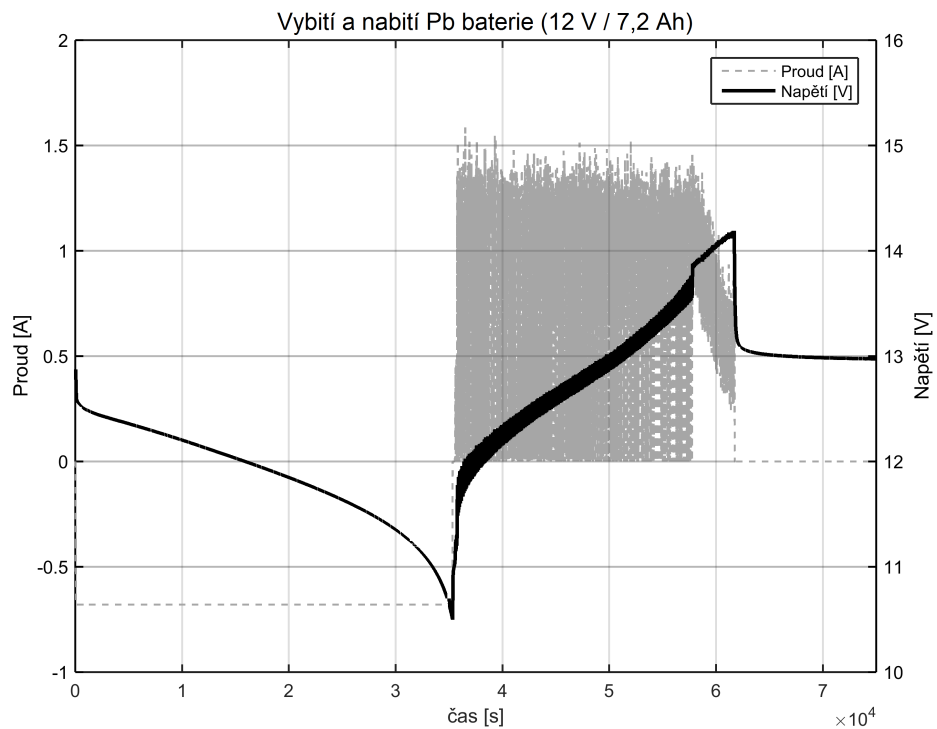
- AC Alternating Current – střídavý proud.
- A/D Analog to Digital – analogově digitální (převodník).
- AGM Absorbent Glass Mat — druh VRLA Pb akumulátoru.
- AV ČR Akademie věd České republiky.
- BMS Battery Management System – balancer používaný u baterií složených z akumulátorů.
- CC Constant Current – režim konstantního proudu.
- CP Constant Power – režim konstantního výkonu.
- CR Constant Resistance – režim konstantního odporu.
- CV Constant Voltage – režim konstantního napětí.
- CCA Cold Cranking Amps – startovací proud za studena.
- D/A Digital to Analog – digitálně analogový (převodník).
- DC Direct Current – stejnosměrný proud.
- DoD Depth of Discharge – hloubka vybití.
- EDR Electrochemical Dynamic Resposponse – Elektrochemická dynamická odezva.
- EIS Electrochemical Impedance Spectroscopy – metoda testování akumulátorů.
- FEL ČVUT Fakulta elektrotechnická Českého vysokého učení technického v Praze.
- GPS Global Positioning System – Globální navigační systém.
- GUI Graphical User Interface – grafické uživatelské rozhraní.
- HE3DA High Energy 3D Acumulator – typ akumulátoru.
- H2SO4 Kyselina sírová (elektrolyt Pb akumulátoru).
- Li-Ion Lithium Iontový (akumulátor).
- LiFePO4 Lithium Iron Phosphate – Lithium železo fosfátový (akumulátor).
- LFP viz LiFePO4.
- LTO Lithium Titanate Oxid – typ akumulátoru.
- LXI LAN eXtensions for Instrumentation – ethernetové rozhraní pro komunikaci s měřicími přístroji.
- NB Notebook – přenosný počítač.
- NI National Instruments.
- NiCd Nickel–Cadmium – Nikl-kadmiový (akumulátor).
- NICAD viz NiCd.

Příloha B

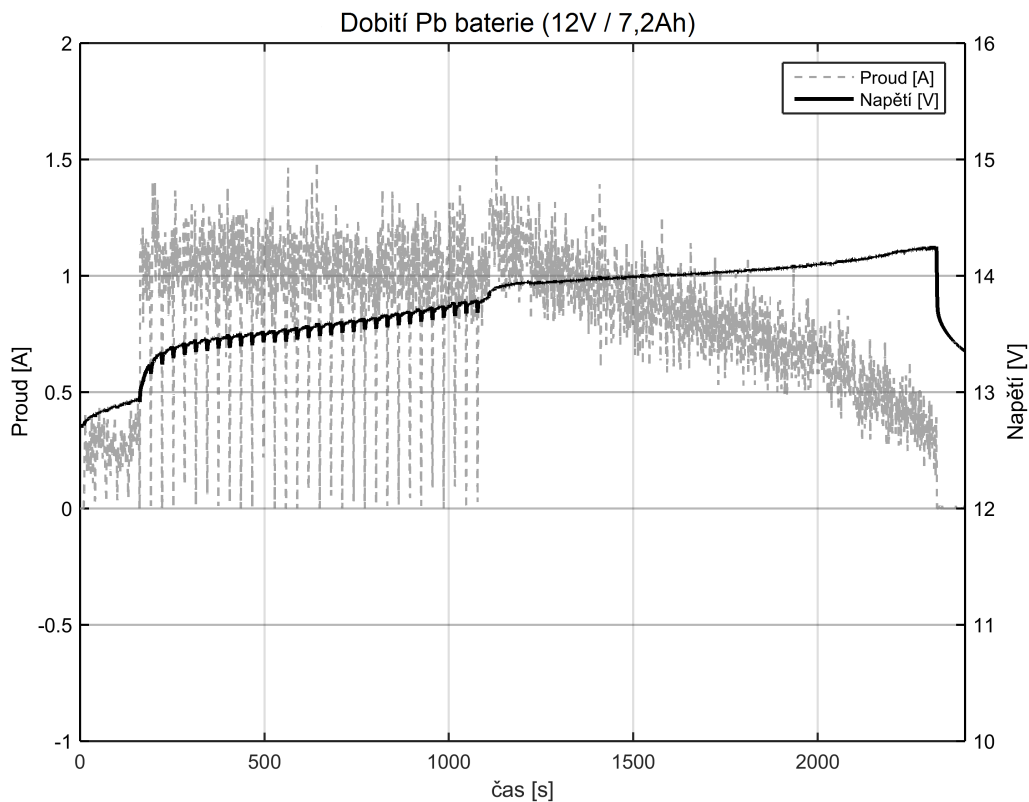
Grafy provedených testů akumulátorů



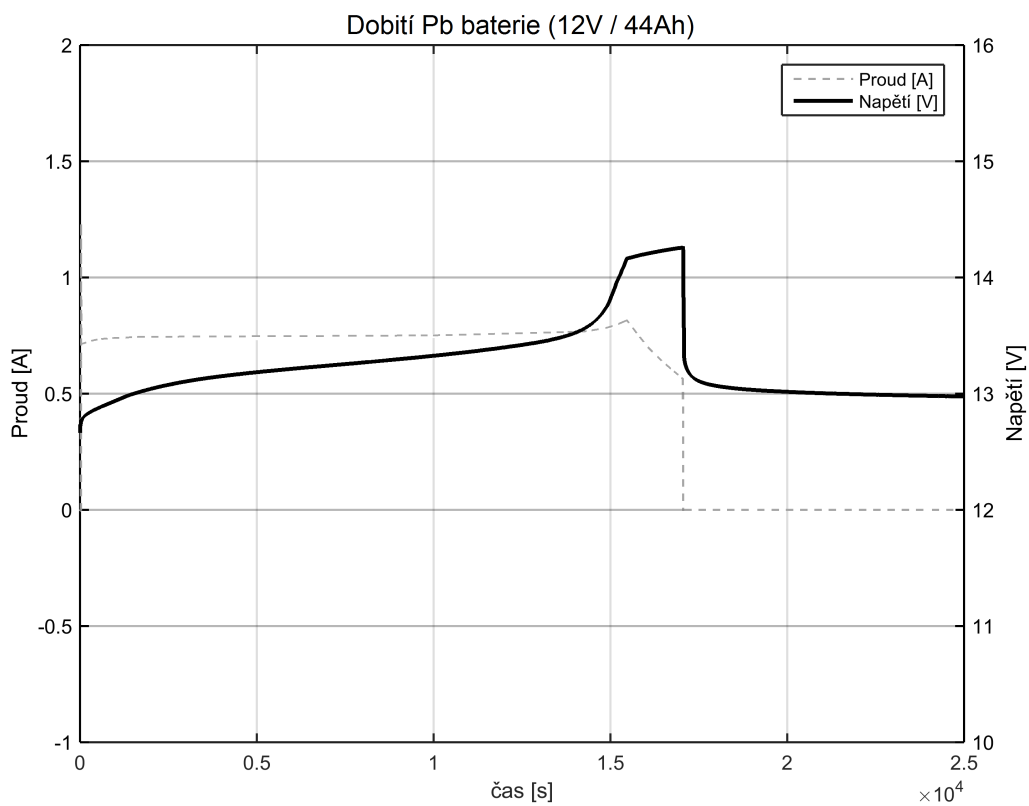
Obrázek B.1. Vybití Pb baterie (12 V / 5,4 Ah) pro zjištění dostupné kapacity



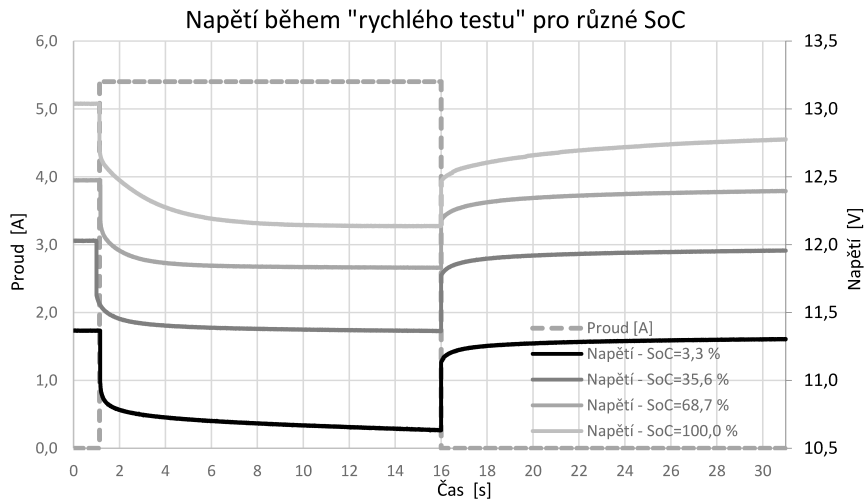
Obrázek B.2. Vybití a nabití Pb baterie (12 V / 7,2 Ah) pro zjištění účinnosti nabíjení



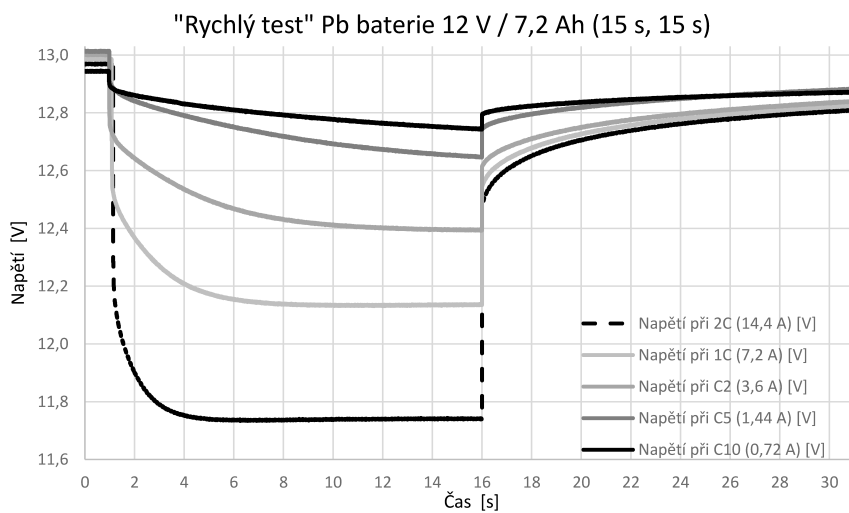
Obrázek B.3. Dobití Pb baterie (12 V / 7,2 Ah) – průběhy nabíjení



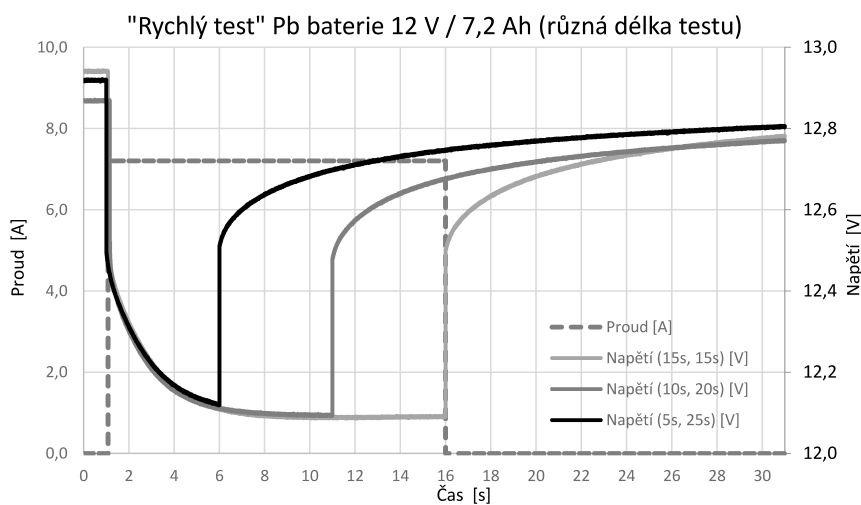
Obrázek B.4. Dobití Pb baterie (12 V / 44 Ah) – průběhy nabíjení



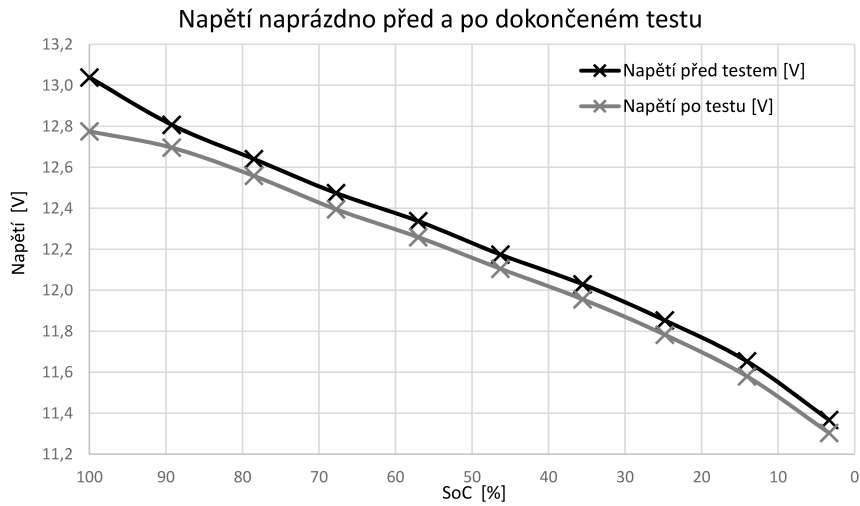
Obrázek B.5. Průběhy napětí při rychlém testu v závislosti na SoC



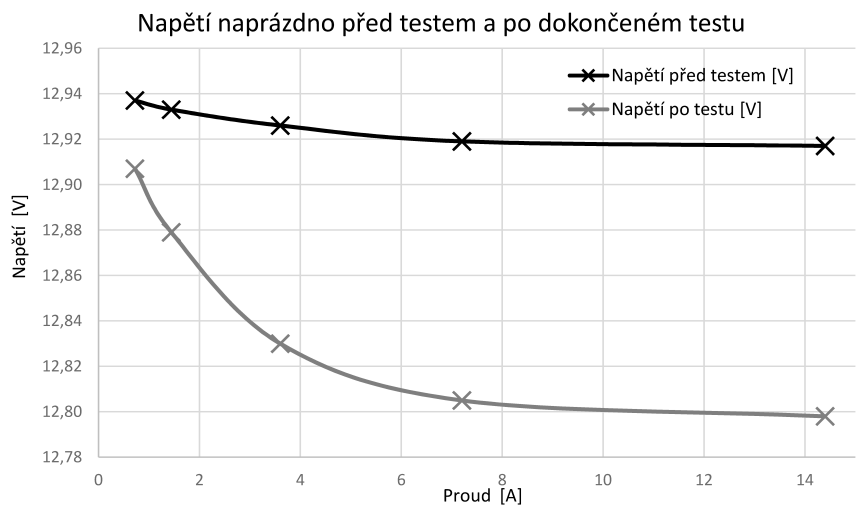
Obrázek B.6. Průběhy napětí při rychlém testu v závislosti na zatěžovacím proudu



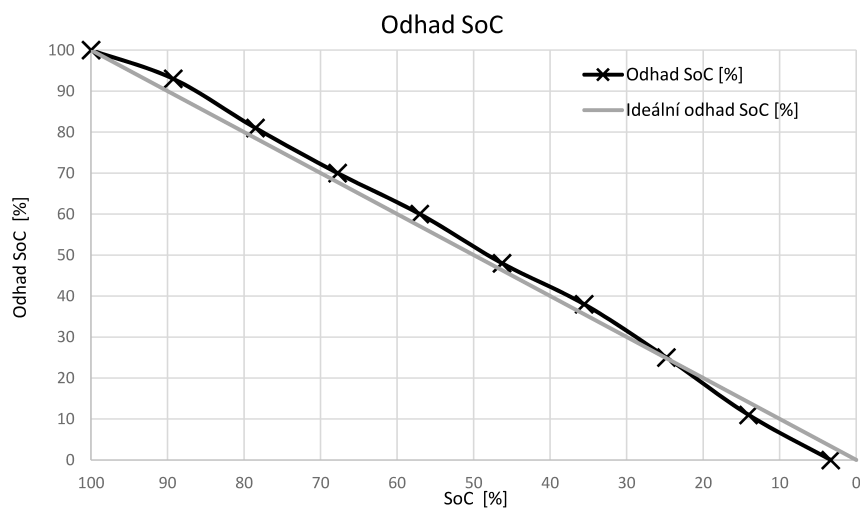
Obrázek B.7. Průběhy napětí při rychlém testu v závislosti na délce zatěžování



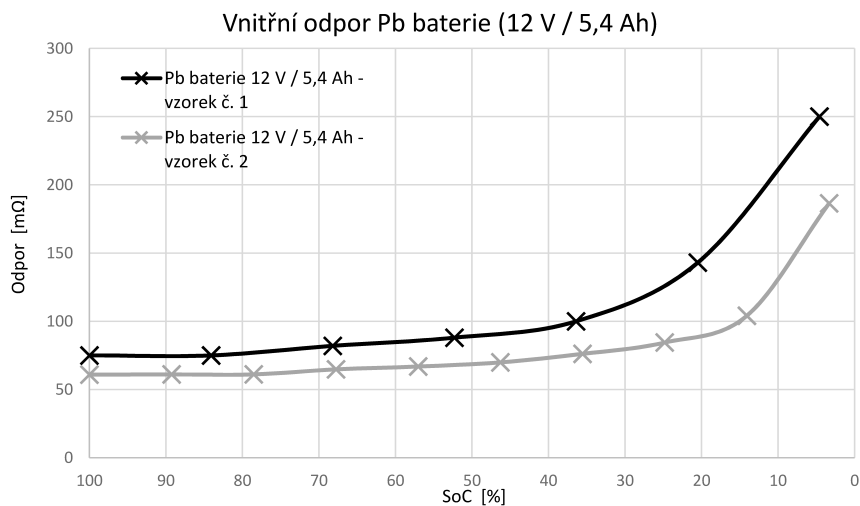
Obrázek B.8. Závislost svorkového napětí naprázdno na SoC



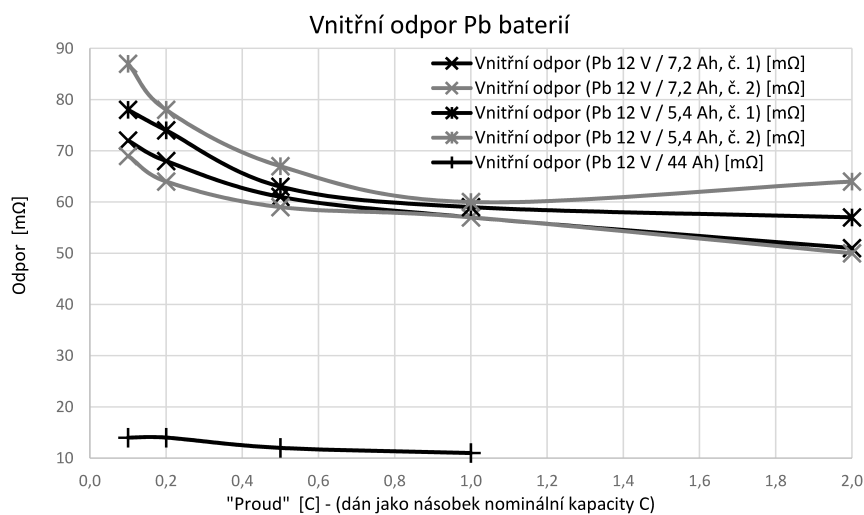
Obrázek B.9. Závislost svorkového napětí naprázdno na zatěžovacím proudu



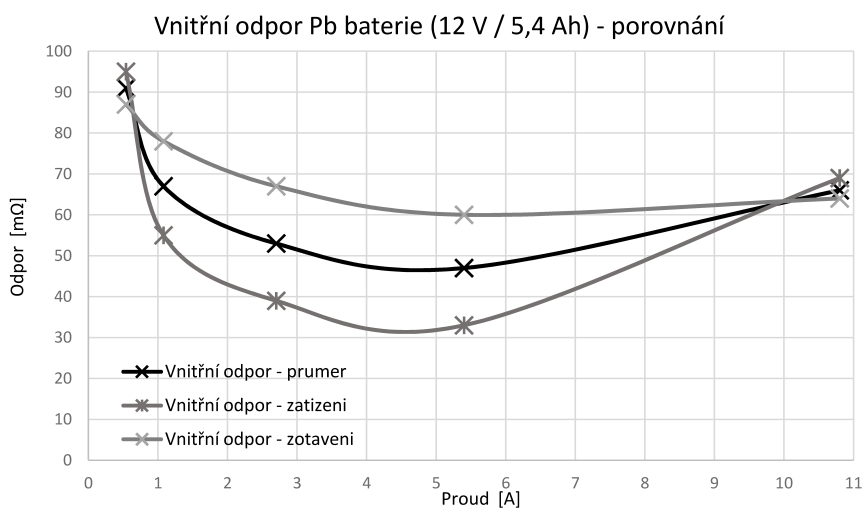
Obrázek B.10. Odhad SoC v závislosti na dostupné kapacitě



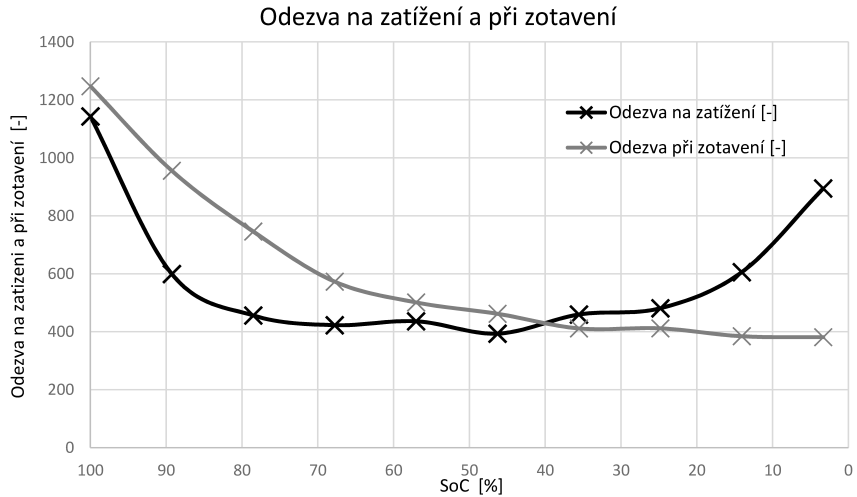
Obrázek B.11. Závislost vnitřního odporu na SoC



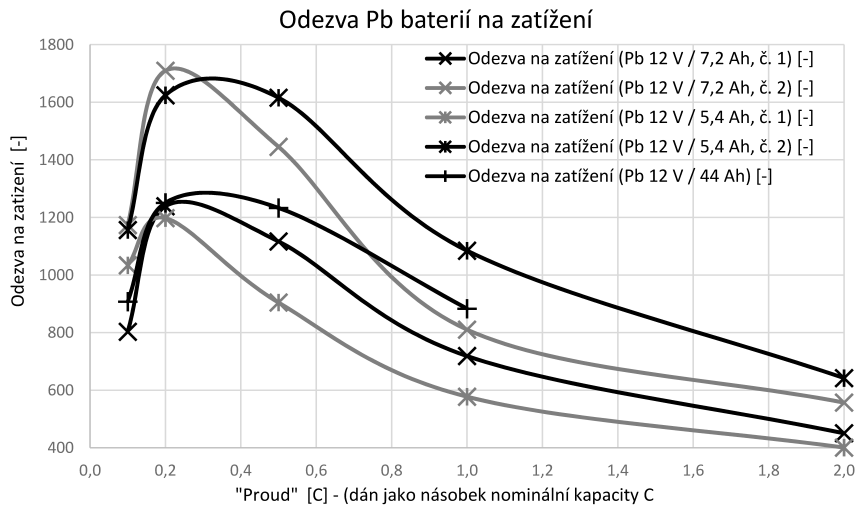
Obrázek B.12. Závislost vnitřního odporu na zatěžovacím proudu



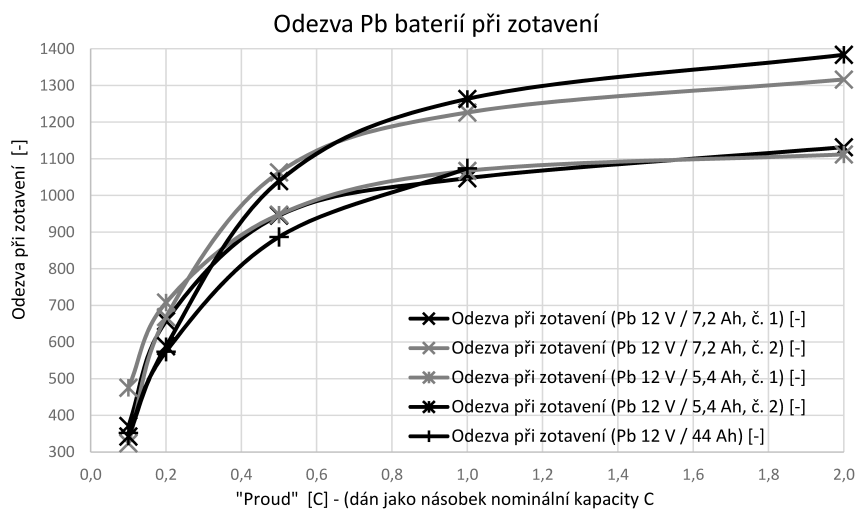
Obrázek B.13. Porovnání měření vnitřního odporu při zatížení a zotavení



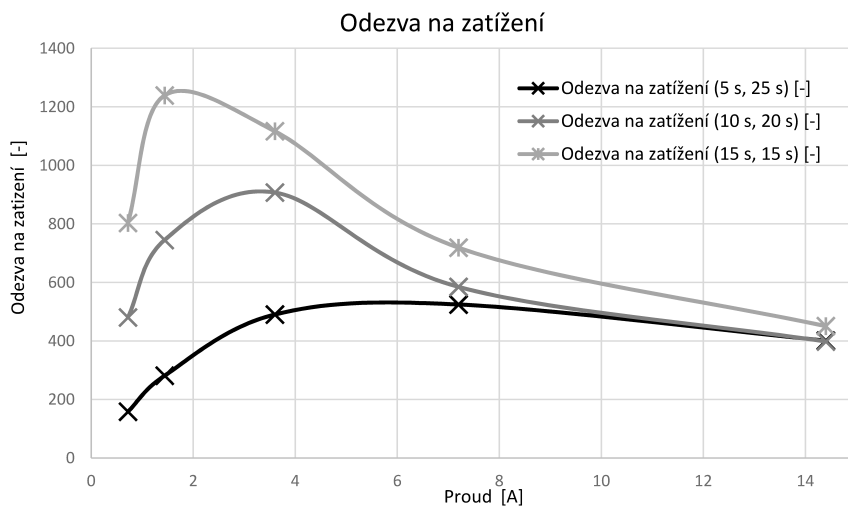
Obrázek B.14. Závislost odezvy při zatížení a zotavení na SoC



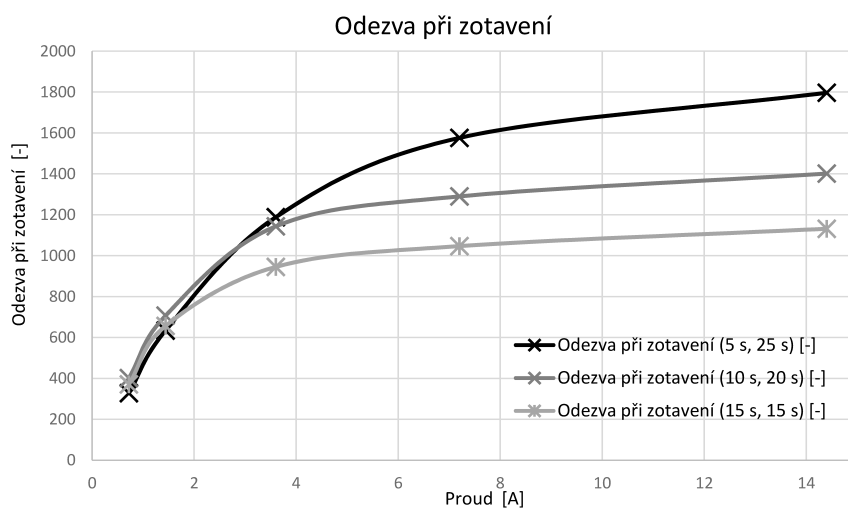
Obrázek B.15. Závislost odezvy při zatížení na zatěžovacím proudu



Obrázek B.16. Závislost odezvy při zotavení na zatěžovacím proudu



Obrázek B.17. Závislost odezvy při zatížení na délce zatěžování



Obrázek B.18. Závislost odezvy při zotavení na délce zatěžování

Příloha C

Obsah elektronické přílohy (CD)

```
Diplomová_práce-Dastyh_Lukáš  
|---Foto  
|  |---Aplikace  
|  |---Grafy  
|---Literatura  
|---DP_Dastyh_Lukáš_2018.pdf
```