

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Obor: Inteligentní budovy



Bateriové systémy – ampérhodinové zkoušky

Battery systems – capacity testing

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: **Bc. Michal Jacko**

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

Rok: **2018**



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jacko** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **406200**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Bateriové systémy - ampérhodinové zkoušky

Název diplomové práce anglicky:

Battery Systems - Capacity Testing

Pokyny pro vypracování:

1. Popište systémy pro měření a provádění ampérhodinových zkoušek pro články i velké bateriové systémy. Zaměřte se zejména na články založené na lithiové technologii, baterie pro domácí a průmyslové systémy (zde popište jak měření systémů lithiových, tak systémů založených na technologii olova). Pozornost věnujte také testům baterií pro elektromobily.
2. Vyhledejte relevantní platné normy (ČSN EN) pro postupy popsané v bodě jedna.
3. Porovnejte jednotlivé měřicí metody mezi sebou a vyhodnoťte jejich použitelnost pro reálné nasazení při testech baterií.
4. Realizujte měření na dostupných přípravcích (systém s přístrojem Akkumaster C5, systém s dataloggerem COMET, systém s multimetry a PC řízením, případně s dalšími dostupnými systémy). U každého systému určete nejistoty měření. Dosažené výsledky vzájemně porovnejte.
5. Zjištěné poznatky shrňte formou vědeckého článku o rozsahu 2 stran A4, který bude samostatnou přílohou diplomové práce.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **25.09.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **28.02.2019**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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.

2.11.2017
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Bateriové systémy – ampérhodinové zkoušky“ vypracoval samostatně a použil jsem podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne.....

.....

Bc. Michal Jacko

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za jeho ochotu a odborné vedení mé práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Křížovi za odbornou pomoc při vytváření ovládacího softwaru.

Bc. Michal Jacko

Anotace:

Cílem této závěrečné diplomové práce na téma „Bateriové systémy – ampérhodinové zkoušky“ bylo prozkoumat způsoby provádění ampérhodinových zkoušek pro články i velké bateriové systémy, zejména pak články založené na lithiové a olověné technologii. Speciální pozornost je věnována testům baterií pro elektromobily. Teoretická část se zaměřuje na rozdíly mezi technologiemi baterií a dále řeší relevantní platné normy pro postupy zmíněných měření. Jednotlivé metody jsou dále porovnány a je vyhodnocena jejich použitelnost pro reálná měření. Praktická část této práce se zabývá realizací měření na dostupných přípravcích a porovnáním nejistot měření jednotlivých metod. Dalším bodem praktické části je použití vlastního ovládací programu vytvořeného v rámci Projektu 2 a jeho rozšíření. Závěrem práce je shrnut poznatků ve formě vědeckého článku.

Klíčová slova

ampérhodinová kapacita, měření kapacity, bateriové systémy, lithiové baterie, olověné baterie, elektromobily

Annotation:

The aim of this diploma thesis on „Battery systems – capacity testing“ is to examine ways of cells and large battery systems capacity testing, especially lithium and lead based systems. Special attention is devoted to testing batteries for electric cars. The theoretical part focuses on the differences between lithium and lead based batteries and relevant norms for procedures of mentioned methods for testing. All methods are compared and the usability for real-world measurement is evaluated. The practical part deals with measurement implementation on the available equipment and comparison of measurement uncertainty in each method. Another goal of practical part is the application of self-made program, created during Project 2 and its extension. The conclusion of this thesis will include summary in form of scientific article.

Key terms

Capacity, capacity testing, battery systems, lithium batteries, lead batteries, electric cars

Obsah

Úvod	12
1. Lithiové a olověné baterie.....	13
1.1. Lithiové baterie.....	13
1.2. Olověné baterie.....	14
2. Elektromobily	16
2.1. Baterie pro elektromobily.....	16
2.2. Technologie elektromobilu.....	16
2.3. Energetické nároky vozidla	16
2.4. Využívané typy baterií	17
2.5. Dojezd, výměna baterie a dobíjení	17
3. Metody měření ampérhodinové kapacity.....	18
3.1. Pojmy.....	18
3.2. Kapacitní zkouška olověných akumulátorů za jmenovitých podmínek	20
3.3. Ověření okamžitého stavu elektrického náboje.....	21
3.4. Ověření skutečné doby napájení akumulátorů.....	21
3.5. Vybíjecí metoda.....	22
3.6. Neinvasivní metoda	23
3.7. Kapacita a CCA.....	23
3.8. Rapid-test metody.....	24
3.9. Plný cyklus	25
3.10. QSMS	25
3.11. EDR	25
3.12. EIS	26
3.13. Porovnání digitálních a analogových metod.....	27
4. Systémy pro měření ampérhodinové kapacity	28
4.1. Stanovení kapacity měřením prošlého náboje	28
4.2. Stanovení kapacity měřením napětí a korekcí vnitřního odporu	28

4.3.	Stanovení kapacity s použitím mikroprocesoru	29
4.4.	Stanovení kapacity pomocí přístroje AkkuMaster C5	30
4.5.	Stanovení kapacity pomocí systému s dataloggerem COMET MS55D	30
4.6.	Stanovení kapacity pomocí systému s multimetry a PC řízením (S.A.M).....	31
4.7.	Stanovení kapacity pomocí přístroje Volcraft ALC 8500.....	31
5.	Normy pro olověné a lithiové akumulátory	32
5.1.	Normy pro olověné baterie	32
5.2.	Normy pro lithiové baterie	35
5.3.	Použití norem.....	39
5.4.	Rozdíly mezi lithiovými a olověnými články	39
5.5.	Měření olověných startovacích baterií dle norem.....	40
5.6.	Měření olověných staničních baterií dle norem.....	40
5.7.	Měření olověných baterií pro všeobecné použití dle norem	41
5.8.	Závaznost technických norem.....	41
5.9.	Posuzování shody.....	42
6.	Vzorové měření a porovnání metod	42
6.1.	Porovnání metod pro vzorové měření	42
6.2.	AkkuMaster C5	43
6.3.	COMET.....	50
6.4.	S.A.M.....	52
6.5.	Volcraft ALC 8500	57
6.6.	Porovnání výsledků.....	60
7.	Závěr	60
	Literatura.....	63

Seznam symbolů:

C Ampérhodinová kapacita [Ah]

C Watthodinová kapacita [Wh]

P Výkon [W]

I Proud [A]

R Odpor [Ω]

U Napětí [V]

T Čas [s]

E Energie [kWh/m²]

T Teplota [$^{\circ}$ C, K]

η Účinnost [-]

Q Náboj [C]

Seznam zkratek a pojmů:

SoC Stav nabití

CCA Cold cranking amps

BEH Bateriově poháněné vozidlo

HEV Hybridně poháněné vozidlo

C-rate Násobek nabíjecího/vybíjecího proudu odvozeného z nominální kapacity

Seznam obrázků:

Obrázek č. 1 – Výsledky studie laboratoře Cadex

Obrázek č. 2 – Proces neinvasivní metody

Obrázek č. 3 – Randleovův diagram

Obrázek č. 4 – Porovnání odezvy akumulátorů v dobrém a špatném stavu

Obrázek č. 5 – Doba odezvy při zátěži a zotavení

Obrázek č. 6 – Nyquistův graf

Obrázek č. 7 – Blokový diagram měření prošlého náboje

Obrázek č. 8 – Blokový diagram měření napětí a korekce vnitřního odporu

Obrázek č. 9 – Blokový diagram stanovení kapacity s použitím mikroprocesoru

Obrázek č. 10 – H-Tronic AkkuMaster C5

Obrázek č. 11 – Datalogger COMET MS55D

Obrázek č. 12 – Zapojení S.A.M

Obrázek č. 13 – Volcraft ALC 8500

Obrázek č. 14 – Testovací akumulátor

Obrázek č. 15 – Stavový diagram funkce programu

Obrázek č. 16 – GUI programu

Obrázek č. 17 – Diagram funkce S.A.M.

Seznam tabulek:

Tabulka č. 1 – Staniční akumulátory

Tabulka č. 2 – Trakční akumulátory

Tabulka č. 3 – Digitální a analogové metody

Tabulka č. 4 – Normy pro lithiové a olověné akumulátory

Tabulka č. 5 – Rozdíly mezi lithiovými a olověnými články část 1.

Tabulka č. 6 – Rozdíly mezi lithiovými a olověnými články část 2.

Tabulka č. 7 – S.A.M. – Rozdíl v kapacitě po několika cyklech – test č. 1

Tabulka č. 8 – S.A.M. – Rozdíl v kapacitě po několika cyklech – test č. 2

Tabulka č. 9 – Porovnání výsledků

Úvod

Téma této závěrečné práce bylo vybráno s ohledem na dva předcházející projekty, ze kterých z velké části vychází a rozvíjí je. Celá práce se zabývá tématem ampérhodinových zkoušek bateriových systémů s přihlédnutím k přesnosti jednotlivých metod měření a také jejich reálnému použití. Měření a diagnostika bateriových systémů také souvisí s mým oborem studia Inteligentních budov, neboť tyto systémy jsou hojně využívány v nejmodernějších budovách, ať už se jedná o záložní UPS systémy, nebo bateriová pole pro fotovoltaické panely.

Úvod této práce se zaměří na teoretické aspekty a typické vlastnosti dvou konkrétních a dnes nejhojněji využívaných technologií akumulátorů, kterými jsou olověné a lithiové. Teoretická část tedy shrne obecné vlastnosti těchto dvou technologií a porovná je.

Zvláštní oddíl bude také věnován elektromobilům a technologiím použitým v odvětví elektricky poháněných motorových vozidel. Tento bod byl začleněn zejména kvůli stále narůstajícímu počtu a také velké oblibě automobilů s bateriovým pohonem. Prozatím se zdá, že automobily využívající elektrické energie jsou budoucností osobní dopravy, jejich slabinou je ale technologie baterií, jejichž kapacita ne vždy umožňuje takový dojezd na jedno nabití jako konvenční spalovací, či zážehové motory. Stejně tak nabíjení baterií není prozatím ani zdaleka tak rychlé jako tankování paliva. Proto byla tomuto tématu věnována speciální část.

Prvním z hlavních bodů této práce je popis jednotlivých systémů pro provádění ampérhodinových zkoušek, a to jak pro články, tak i pro velké bateriové systémy. Pozornost bude věnována zejména článkům založeným na lithiové technologii, bateriím pro domácí a také průmyslové systémy, u kterých se práce zaměří jak na měření systémů lithiových, tak i na systémy založených na technologii olova.

Pro potřeby zpracování informací o jednotlivých systémech pro provádění ampérhodinových zkoušek budou představeny důležité části relevantních platných norem a bude rozhodnuto, do jaké míry jsou tyto normy použitelné, kolik norem se aktuálně používá a kolik norem přibližně existuje pro olověné a lithiové akumulátory. Tato část se tedy zaměří na poměr norem věnovaných olovu a lithiu.

Všechny měřicí metody budou mezi sebou porovnány a bude vyhodnocena jejich použitelnost pro reálné nasazení při testech baterií. Metody budou rozebrány tak, aby bylo zřejmé, v čem se liší, případně jaká mají omezení.

Na dostupných přípravech budou realizována vzorová měření, kvůli zjištění a určení nejistot měření a celkové porovnání metod. Mezi použité přípravky patří systém se stanicí H-Tronic AkkuMaster C5, pro který jsem vytvořil vlastní ovládací software, dále pak systém s dataloggerem COMET, systém automatického měření s multimetry a PC řízením (S.A.M.) a také systém se stanicí Voltcraft ALC 8500. Výsledky ze všech systémů budou vzájemně porovnány za použití testovacích akumulátorů.

Veškeré zjištěné poznatky budou shrnuty formou vědeckého článku o rozsahu dvou stran A4, který je samostatnou přílohou této práce.

1. Lithiové a olověné baterie

1.1. Lithiové baterie

1.1.1. Vlastnosti lithiových baterií

Lithium je nejlehčí z kovů, disponuje největším elektrochemickým potenciálem a poskytuje nejvyšší měrnou energii na jednotku hmotnosti. Nabíjecí baterie s lithiovou anodou (kov) mohou poskytnout mimořádně vysokou energetickou hustotu. Při cyklech nabíjení a vybíjení se však na anodě tvoří dendrity. Částice, které vyrostou na anodě, překonávají separátor a způsobují zkrat. Proto se později přešlo na nekovové řešení na bázi lithia, v podobě lithiových ionů. [14]

Ačkoliv měrná energie lithium-ion baterií je o něco nižší než u baterií s kovem lithia, Li-ion jsou bezpečnější, pokud se dodržují limity napětí a proudu. Vysoké měrné energie dosahuje Li-ion hlavně díky vysokému napětí článku, které se pohybuje okolo 3,6 V. Nabíjecí charakteristiky jsou velice dobré a vybíjecí křivka je dostatečně plochá na to, aby poskytla dobré zhodnocení uložené energie v napětovém spektru 3,7 V – 2,8 V / článek. [14]

Baterie typu Li-ion vyžadují velice malou údržbu a netrpí paměťovým efektem (není třeba provádět periodické plné nabití a úplné vybití). Samovybití je téměř poloviční oproti bateriím na bázi niklu. Díky nominální hodnotě napětí 3,6 V je tento typ baterie vhodný pro přímé napájení přenosných zařízení, jako jsou digitální kamery, mobilní telefony nebo tablety. Mezi zápory Li-ion akumulátorů patřila dříve vyšší cena, to však dnes již příliš neplatí, díky širokému využití této technologie a masové produkci. Dalším mírným záporem je potřeba ochranných obvodů. [14]

Při vývoji Li-ion baterií se vyzkoušelo již několik nových technologií, včetně anod ze slitin křemíku, což mělo vylepšit vlastnosti grafitu. Potenciál k uložení až desetinásobku energie oproti grafitu se zdál sice skvělý, slitiny křemíku však nejsou velmi stabilní a hlavně při nabíjení expandují, což může způsobit nestabilitu baterie. Použití nanostruktury lithium-titanátu se ukázalo jako dobrá volba pro prodloužení životnosti, disponuje totiž dobrými nabíjecími vlastnostmi a

dobrymi vlastnostmi při nizkých teplotách. Problémem je však nízká měrná energie a vysoké náklady. [16]

Zatímco u olovených akumulátorů nemůže být řeč o rychlonabíjení, lithium je v tomto ohledu značně v lepší pozici. Většinu lithiových akumulátorů lze nabíjet proudem odpovídajícím 1C, některé však i 5C. Pro porovnání, olovené akumulátory standardně nabíjíme proudy 0,2C a nižšími. Lithium má také navrch co se týká měrné energie, neboť běžné hodnoty watt hodinové kapacity se pohybují okolo 100 Wh/kg a více, v porovnání s olovem, které se může pochlubit maximálně 40 Wh/kg. [1]

Je zřejmé, že technologie a konstrukce lithiových akumulátorů se od těch olovených může značně lišit. Příkladem tohoto rozdílu v konstrukci, který vychází z fyzikálních a chemických vlastností akumulátorů, jsou olovené akumulátory s regulovaným ventilem (VRLA). Lithiové akumulátory jsou totiž ve všech případech uzavřené, protože není třeba řešit vznik vodíku a zvyšující se tlak uvnitř akumulátoru.

1.2. Olovené baterie

1.2.1. Vlastnosti olovených baterií

Olovená baterie byla první komerčně používanou nabíjecí baterií vůbec. Navzdory stáří této technologie je stále hojně používána díky své spolehlivosti a levnému poměru ceny za watt. Zatímco v automobilech je pomalu, ale jistě vytlačována lithiem, stále se používá ve vysokozdvizných vozících, staničních aplikacích, kde již ale také proráží lithium a také v systémech UPS. [18]

Struktura baterie je tvořena slitinami olova, protože čisté olovo je příliš měkké na to, aby vydrželo svou hmotnost. V malém množství se tedy přidávají jiné kovy, aby byla zaručena mechanická pevnost a zlepšily se elektrické vlastnosti. Nejčastějšími přidávanými kovy jsou antimon, vápník, cín a selen. Přidání antimonu a cínu zlepšuje „deep-cycling“ (cyklus hlubokého vybití), ale zvyšuje se tím spotřeba vody a tím i potřeba vyrovnávacího nabíjení. Tím je myšleno úmyslné nabíjení vyšším proudem, které odstraní krystaly sulfátu, které by mohly zapříčinit snížení kapacity.[27] Vápník sice snižuje míru samovybíjení, má však za následek oxidaci kladné elektrody při přebití. Moderní olovené baterie se také dopují selenem, kadmíem, cínem a arsenem, kvůli snížení obsahu vápníku a antimonu. [3]

Olovená baterie je poměrně těžká a při tzv. deep-cyclingu má kratší životnost oproti bateriím založeným na technologiích niklu a lithia. Plné vybití totiž způsobuje zátěž, a při každém cyklu

nabití/vybití ztrácí baterie část své kapacity. U nové baterie v dobrém stavu je tato ztráta malá, ale zvyšuje se, jakmile je kapacita na polovině své původní hodnoty. [3]

V závislosti na míře vybíjení vydrží olověná baterie při aplikacích s deep-cyclingem zhruba 200 – 300 cyklů. Tato poměrně krátká životnost je způsobena korozí na kladné elektrodě, vyčerpáním aktivního materiálu a expanze kladných desek. Zvýšení rychlosti stárnutí můžeme očekávat při zvýšených teplotách a při vysokých vybíjecích proudech. [3]

Nabíjení olověné baterie je vcelku jednoduché, musí být však dodrženy napěťové limity. Nízké napětí sice chrání baterii, ale snižuje výkon a zvyšuje sulfataci na záporné desce. Na druhou stranu vysoké napětí zlepšuje výkon, způsobuje ale korozi kladné desky. Zatímco proces sulfatace může být včasným zásahem obrácen, koroze je permanentní. [3]

S rychlým nabíjením u olověných baterií počítat nemůžeme, neboť nabíjecí proudy se obvykle pohybují mezi 0,05C – 0,2C a plné nabití trvá běžně 14 – 16 hodin. Skladovat tyto baterie je nutné ve stavu plného nabití, stav nižšího nabití totiž opět způsobuje sulfataci a tím snížený výkon. Částečným řešením je přidání uhlíku na zápornou elektrodu, je tím však snížena měrná energie. [3]

Životnost olověných baterií je průměrná, jejich výhodou však je, že nepodléhají paměťovým efektům jako systémy na bázi niklu, a také nejlépe udržují náboj. Kupříkladu Ni-Cd baterie ztrácí přibližně 40 % uložené energie již v průběhu tří měsíců. Stejně ztráty samovybitím dosáhne olověná baterie zhruba za rok. Lépe také pracuje při nižších teplotách, a v teplotách pod nulou dosahuje lepších výsledků oproti bateriím Li-ion. [3]

Uzavřené olověné baterie (název tak úplně neodpovídá pravdě), se dělí na několik základních typů, kterými jsou olověné gelové s regulovaným ventilem (VRLA), nebo absorpční skleněné rohože (AGM). Menším bateriím s kapacitami do 30 Ah, baleným v plastových nádobách se říká uzavřené olověné baterie, a používají se do menších systémů UPS, pro nouzové osvětlení, nebo do vozíků. Díky nízké ceně, spolehlivosti a malé náročnosti na údržbu se používají tyto baterie hlavně ve zdravotnictví. Větší VRLA systémy se používají pro záložní zdroje telefonních antén, bank nebo letišť.

AGM poskytuje několik výhod, mezi které se řadí rychlejší nabíjení, nebo také okamžité vysoké proudové zatížení. AGM se hodí nejlépe pro baterie střední velikosti s kapacitami 30 Ah – 100 Ah. Příklady typického použití jsou startovací baterie motocyklů, nebo baterie pro systém start-stop u micro-hybridních automobilů. Kapacita AGM baterií se snižuje postupně, zatímco u

gelových (VRLA) systémů se kapacita drží dlouho na vysoké úrovni a až ke konci životního cyklu klesá mnohem rychleji.

Optimální provozní teplota u VRLA baterií je 25 °C, a s každým navýšením o 8 °C se sníží životnost na polovinu. Nejlepších výsledků o olověných baterií dosáhneme při pomalém vybíjení, je tu však i možnost dodání značně vyšších proudových impulzů v řádech několika Coulombů, pouze ale po několik málo sekund. Díky tomu lze olovené baterie použít jako startovací.

2. Elektromobily

2.1. Baterie pro elektromobily

Baterie pro elektromobily musí splňovat několik kritérií, aby byly vhodné pro toto použití. Jedním z parametrů je vhodné napětí, dále pak typ baterie, který ovlivňuje hmotnost a samozřejmě také kapacita, jež se odvíjí od typu elektromobilu. Neoddělitelnou součástí je samozřejmě také kritérium bezpečnosti, které u lithiových baterií rozsáhle řeší norma [ČSN EN 50604](#) v kombinaci s [ČSN EN ISO 12405](#). Toto kritérium je testováno například hrubým zacházením, vystavení extrémním klimatickým podmínkám a také simulacemi havárie (nárazu) vozidla.

2.2. Technologie elektromobilu

Pro pohon vozidla je použit výhradně elektromotor a veškerou energii pro pohon musí dodat akumulátorová baterie, palivové nebo fotovoltaické články. Akumulátorová baterie musí být po spotřebování energie dobít z vnějšího zdroje. Po dobu dobíjení je vozidlo mimo provoz.

Při brzdění je využita tzv. rekuperace, kdy pracuje elektromotor jako alternátor, nebo dynamo. Získaná energie se pomocí elektrického měniče nabíjí zpět do akumulátoru. Velké proudy způsobené razantním brzděním může akumulovat i superkapacitor. Finální dobrzdění musí však zařídit brzdy mechanické, energie je tedy přeměněna na teplo a ztracena. [18]

2.3. Energetické nároky vozidla

Pokud vezmeme v úvahu vozidlo o hmotnosti zhruba 1000 kg, které se pohybuje průměrnou rychlostí 60 km/h, je pro pohon potřeba střední výkon přibližně 12 kW až 16 kW nebo špičkový 30 kW až 40 kW. Při akčním rádiu 3 hodiny je potřeba asi 50 kWh elektrické energie, kterou musí akumulátor dodat. [18]

Z tohoto přibližného odhadu můžeme usoudit, že články takového akumulátoru budou řazeny do série a k omezení ztrát je nutné zvolit napětí vyšší, než je napětí palubní (24 V, 12 V). Běžně používané hodnoty se pohybují v rozmezí 100 V až 300 V. Pokud bychom tedy předpokládali

potřebu elektrické energie o hodnotě 50 kWh, potřebná kapacita pak bude v rozmezí 170 Ah až 500 Ah, v závislosti na napětí. [18]

2.4. Využívané typy baterií

Do úvahy přichází více typu akumulátorů, ne všechny jsou však vhodné například pro městský elektromobil. V případě olověného akumulátoru by se totiž jeho hmotnost pohybovala okolo 500 kg. U NiMH akumulátorů by to pak bylo zhruba 350 kg a u lithiových již jen 160 kg. [18] Lithiové akumulátory tedy rozhodně znamenají velký přínos, co se týká hmotnosti a na rozdíl od minulosti, kdy byly větší akumulátory zpravidla olověné už tento předpoklad neplatí a lithiové akumulátory se nyní používají i například v provedení s kapacitou několika MWh. [25]

2.5. Dojezd, výměna baterie a dobíjení

Dojezd elektromobilů je současně rychlostí dobíjení velice důležitým parametrem, který určuje jeho reálnou použitelnost. Pokud pomineme pracovní stroje, jako jsou vysokozdvizné vozíky, které stále ještě v některých případech využívají olověných baterií a budeme se soustředit do elektromobily do běžného provozu, zde jsou již poměrně hojně využívány baterie lithiové, kvůli své nižší hmotnosti a vyšší měrné energii, která se pohybuje až v horizontu pětinasobku oproti olovu. [18]

Zatímco dříve byly elektromobily limitovány dojezdem zhruba 200 km, nebo se vyráběly jako hybridní, kde po vyčerpání baterie přišel na řadu motor spalovací, dnes již existují automobily, které zvládnou dojezd mnohem vyšší. Mezi největší novinky předního výrobce elektromobilů, kterým je Tesla Motors, patří například tahač Tesla Semi, který je schopen dojezdu až 800 km a osobní automobil Tesla Roadster s dojezdem až 1000 km. Těchto vzdáleností by mělo být dosaženo i při dálničních rychlostech, což může bez problému konkurovat dnešním spalovacím motorům. [15] Díky elektropohonu budou mít tyto dopravní prostředky mimo jiné i skvělé zrychlení a maximální rychlost, kterými porazí i nejrychlejší sériově vyráběné automobily a tahače na světě.

Základním nedostatkem elektromobilů hned po dojezdu je však dobíjení. Doplnění paliva u automobilů se spalovacím nebo zážehovým motorem je totiž mnohem rychlejší, než dobíjení elektromobilů. Z počátku se zdálo, že by tomto problému mohla vyřešit jednoduchá výměnná stanice, která by vyměnila vybitou baterii za novou v horizontu několika sekund. Pro tento účel by však baterie musela být jediným blokem, aby vůbec k rychlé výměně mohlo dojít. To však dnes u většiny elektromobilů není možné, neboť je baterie kvůli aerodynamice, rozložení hmotnosti a konstrukci rozprostřena po větší ploše jako sériovo-paralelní kombinace mnoha

článků. K nabíjení musí tedy dojít připojením elektromobilu do sítě nebo speciální nabíječky. Ty však prozatím nejsou všude.

Nejnovější dobíjecí stanice od Tesly by měla dobít baterii výše zmíněného tahače již za 30 minut, které poskytnou dojezd 600 km. To se zdá být velice slušnou hodnotou, bohužel doplnění benzínu a nafty bývá stále rychlejší a také vyvstává otázka masového použití, kdy by se ve stejnou dobu nabíjelo tisíce elektromobilů. Na takový scénář prozatím nikde není vytvořena potřebná infrastruktura a okamžitý potřebný výkon pro takovýto scénář je astronomický. [21]

3. Metody měření ampérhodinové kapacity

3.1. Pojmy

3.1.1. Ampérhodinová kapacita

Měření kapacity poskytuje nejzákladnější informace o daném akumulátoru a díky těmto měřením získáme aktuální informaci o stavu konkrétního akumulátoru. Jmenovitá ampérhodinová kapacita pak udává celkový náboj, který je akumulátor schopen při plném nabití pojmout. Hodnota 1 Ah je definována jako náboj, který akumulátor dodá do vnějšího obvodu při konstantním proudu 1 A po dobu jedné hodiny.

3.1.2. Ztráta kapacity

Běžně opotřebenou baterii můžeme pomyslně rozdělit do tří částí. Část s tzv. dostupnou energií je schopna tuto energii dodat okamžitě, prázdnou část baterie musíme nejdříve nabít, než bude schopna energii dodat a pak je tu část nepoužitelná, která se díky stárnutí stala neaktivní. [13]

Procesem stárnutí baterie se nepoužitelná část neustále zvětšuje, a to většinou lineárně. Kapacita baterie se tedy oproti původní zmenšuje a nabíjení tak zpravidla trvá kratší dobu, konkrétně tedy u baterií založených na niklu a částečně i olovu. Toto pravidlo příliš neplatí u Li-ion baterií, kde stárí, a tedy snížená schopnost přenosu náboje zabraňuje toku elektronů a tím se i protahuje nabíjecí čas. [13]

Na rozdíl od baterií z niklu, které podléhají tzv. paměťovému efektu, se u olova a lithia nedoporučuje hluboké vybíjení, neboť je to pro baterii větší zátěž a její životnost klesá. Výjimkou jsou také chytré baterie, kde se hlubokým vybíjením zajišťuje kalibrace. [13]

3.1.3. Kapacitní zkoušky akumulátorů

Kapacitním zkouškám se podrobují akumulátory za jmenovitých podmínek kvůli porovnání naměřených hodnot s parametry udávanými výrobcem, nebo za provozních podmínek pro změření doby, po kterou může akumulátor dodávat energii spotřebiči.

Výpočet kapacity z kapacitní zkoušky je dán vzorcem:

$$C = \int_0^t I(t) \cdot dt \quad (1)$$

V případě konstantního proudu pak zjednodušeně:

$$C_{\vartheta} = I_V \cdot t \quad (2)$$

kde C je kapacita akumulátoru [Ah], ϑ je střední teplota elektrolytu (případně střední teplota nádoby) během kapacitní zkoušky [°C], I je vybíjecí proud [A] a t je doba vybíjení [h]. [17]

Přepočet kapacity na jmenovitou teplotu:

Dle vzorce v bodě 3.1.3 lze zjistit kapacitu akumulátoru při skutečné teplotě v době testu. Pro přepočet kapacity na jmenovitou teplotu musíme využít následujících vzorců – platí pro olověné akumulátory.

Pro staniční akumulátory:

$$C_{20} = \frac{C_{\vartheta}}{1 + 0,006 \cdot (\vartheta - 20)} \quad (3)$$

Pro trakční akumulátory:

$$C_{30} = \frac{C_{\vartheta}}{1 + 0,006 \cdot (\vartheta - 30)} \quad (4)$$

Pro startovací a motocyklové akumulátory:

$$C_{25} = \frac{C_{\vartheta}}{1 + 0,006 \cdot (\vartheta - 25)} \quad (5)$$

kde C_{20} , C_{25} , C_{30} je kapacita přepočtená na konkrétní jmenovitou teplotu, ϑ je střední teplota elektrolytu (případně střední teplota nádoby) během kapacitní zkoušky [°C] a C_{ϑ} představuje kapacitu akumulátoru při střední teplotě elektrolytu během zkoušky [Ah]. [17]

Výpočet vybíjecího odporu pro kapacitní zkoušky:

Výpočet vybíjecího odporu vychází z Ohmova zákona a je rozšířen o korekční činitel. Potřebný vybíjecí odpor lze tedy vypočítat následovně:

$$R_v = \frac{U_N \cdot 1,05}{I_v} \quad (6)$$

Kde U_N představuje jmenovité napětí baterie, I_v vybíjecí proud a 1,05 činitel zvyšující jmenovité napětí na skutečnou počáteční hodnotu. [17]

3.2. Kapacitní zkouška olověných akumulátorů za jmenovitých podmínek

Kapacitní zkouška se provádí běžně před uvedením akumulátoru do činnosti, nebo při opravě a revizi. Před započnutím kapacitní zkoušky musí být akumulátor plně nabit, ponechán dvě hodiny v klidu a zkouška pak musí být provedena za jmenovité teploty a hustoty elektrolytu, která je stanovena výrobcem. To samozřejmě platí pouze pro akumulátory olověné. Postup pro kapacitní zkoušky různých typů olověných akumulátorů je následující, pokud výrobce neuvede jinak. [17]

3.2.1. Staniční akumulátory

Zkouška probíhá při teplotě $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, vybíjením konstantním proudem, který se rovná $0,1C_{10}\text{ (A)} \pm 1\%$ bez přerušení až po dosažení konečného vybíjecího napětí 1,8 V na článek. U lithiových akumulátorů by se konečné vybíjecí napětí pohybovalo kolem 2,75 V - 3 V/článek a vybíjecí proud ve většině případů okolo 1C. Napětí článků se měří před začátkem vybíjení a dále pak v hodinových intervalech, teplota a hustota alespoň v jednom z článků. Při poklesu napětí nejslabšího článku na 1,85 V se měří napětí v intervalech 15 minut, 10 minut a 5 minut, až do poklesu na hodnotu 1,8 V na článek, kdy se vybíjení ukončí. U baterií sestavených z monobloků, kde nelze měřit napětí jednotlivých článků, se vybíjení ukončí, pokud je dosaženo následujících hodnot u konkrétních bloků:[17]

12V blok	10,8 V
6V blok	5,4 V
4V blok	3,6 V

Tabulka č. 1 – Staniční akumulátory [17]

Jako staniční se v některých případech používají i akumulátory Li-ion, jejich použití doposud ale nebylo až tak časté, neboť jejich vlastnosti v nízkých teplotách nejsou tak dobré jako u olova. Všeobecně jsou lithiové baterie použity spíše u menších až středních systémů [23], existují však již i aplikace, kde se používají lithiové staniční akumulátory. Takovým příkladem je největší

lithiová staniční baterie na světě, kterou Tesla nainstalovala v Austrálii, ve městě Jamestown. Celá sestava disponuje kapacitou přes 100 MWh. [26]

3.2.2. Trakční akumulátory

Zkouška probíhá při teplotě $30\text{ °C} \pm 4\text{ °C}$, vybíjením konstantním proudem, který se rovná $0,2C_5$ (A) až po dosažení konečného vybíjecího napětí 1,7 V na článek. Napětí se měří na všech člancích, teplota a hustota elektrolytu na jednom kontrolním článku, a to před začátkem vybíjení a dále po 30 minutových intervalech, do poklesu nejslabšího z článků na hodnotu 1,8 V. Poté se měří v 5 minutových intervalech do napětí 1,75 V a dále nepřetržitě do 1,7 V na článek. U bloků jsou konečná vybíjecí napětí následující: [17]

12V blok	10,2 V
6V blok	5,1 V
4V blok	3,4 V

Tabulka č. 2 – Trakční akumulátory [17]

3.2.3. Startovací a motocyklové akumulátory

Zkouška probíhá při konstantní teplotě $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, vybíjením konstantním proudem $0,05C_{20}$ (A) $\pm 1\%$. Napětí jednotlivých bateriových bloků, teplota a hustota elektrolytu v jednom kontrolním článku se měří před začátkem zkoušky a poté v hodinových intervalech. Při poklesu napětí 12 V baterie na 11,4 V (u 6 V baterie 5,7 V) se měřicí interval zkracuje na 30 minut, při poklesu pod 10,5 V (u 6 V baterie 5,25 V) se měří v intervalech po 5 minutách až do poklesu napětí na hodnotu 10,2 V (5,1 V), kdy se vybíjení ukončí. [17]

3.3. Ověření okamžitého stavu elektrického náboje

Tato metoda dovoluje zjistit zbytkovou kapacitu akumulátoru v libovolném části provozu. Baterie je vybíjena z aktuálního stavu nabití dle kroků výše uvedených, v kapitole 3.2.- Kapacitní zkouška za jmenovitých podmínek. [17]

3.4. Ověření skutečné doby napájení akumulátorů

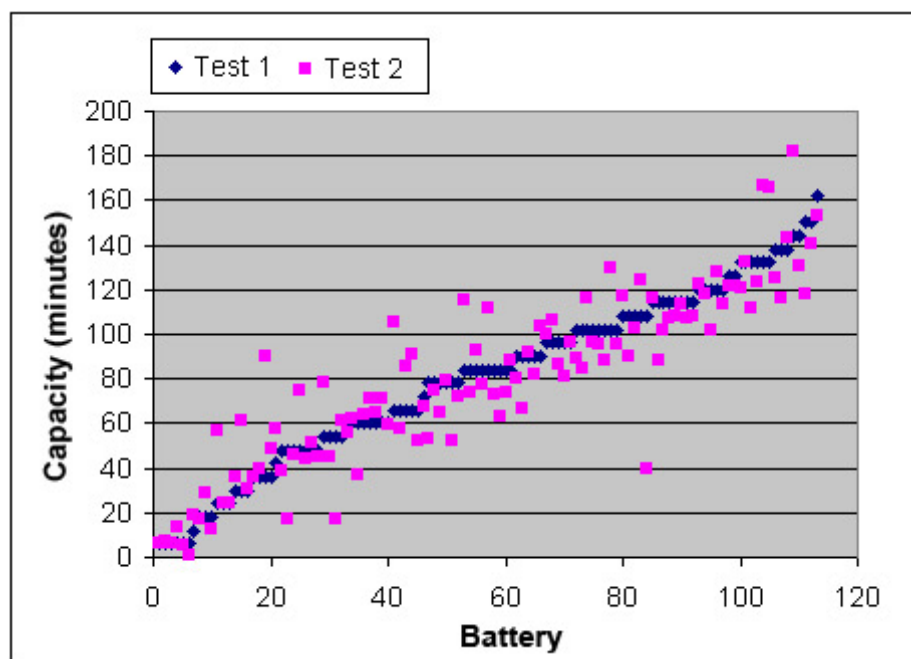
Metodu ověření doby napájení můžeme využít zejména při proměnlivém zatížení akumulátorů, neboť tabulky a grafy výrobce nejsou pro tuto situaci využitelné. Pokud tabulky nebo grafy k danému typu akumulátoru chybí, lze metodu použít i pro případ konstantního odběru. [17]

3.5. Vybíjecí metoda

Ačkoliv by se dalo očekávat, že metoda vybíjecí bude nejpřesnější, není tomu tak vždy, zvláště pak u baterií olověných. I při dodržení potřebných standardů, kontrolovaného prostředí a velmi přesného měřicího vybavení se může stát, že se jednotlivá měření budou lišit. Pro tyto jevy bohužel stále nemáme úplné vysvětlení, můžeme však s jistotou říci, že se týkají hlavně zmíněných olověných baterií, baterie na bázi lithia a niklu jsou při tomto typu měření o něco stálější a výsledky jednotlivých měření se od sebe příliš neliší. [7]

Ukázkou těchto jevů je měření laboratoře Cadex, která provedla test 91 baterií [7], které se lišily jak kapacitou, tak opotřebením, jak je to naznačeno ve výsledném grafu [Obrázek č. 1]. Průběh testování se držel standardu SAE J537, tedy byly baterie před testem plně nabity a ponechány 24 hodin v klidu. Dále byly podrobeny vybíjení proudem 25 A až do konečného vybíjecího napětí 10,50 V (1,75 V/článek). Modrá barva reprezentuje měření číslo 1, které bylo zopakováno po několika dnech, jak reprezentuje růžová barva testu číslo 2. Hodnoty kapacit se v některých případech lišily až o $\pm 15\%$. [7]

Podobný jev jsem pozoroval i v průběhu vzorového měření olověných akumulátorů za použití různých metod, které jsou představeny v kapitole 6. Vzorové měření. Ačkoliv různé hodnoty naměřených kapacit můžeme částečně přičíst metodám měření a jejich přesnosti stále se zde objevují značné rozdíly.



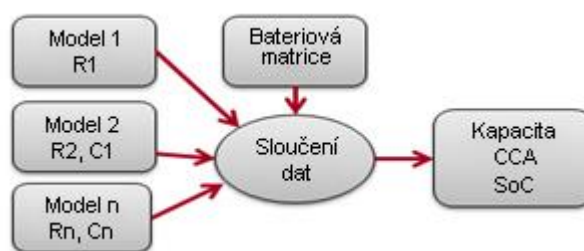
Obrázek č. 1 – Výsledky studie laboratoře Cadex

Vybíjecí metoda je vhodná hlavně pro menší akumulátory, případně pak i střední. Je tedy využitelná u akumulátorů pro běžné denní použití, jako jsou akumulátory lithiové s malou kapacitou, které napájí různé menší domácí přístroje.

3.6. Neinvasivní metoda

Metoda zvaná SpectroTM (vyvinutá laboratoří Cadex) používá multi-modelovou elektrochemickou impedanční spektroskopii (EIS), která zjišťuje stav baterie skenovacím procesem během několika málo sekund. Tato technologie kombinuje EIS s komplexním modelováním, pro odhad kapacity, CCA a SoC, pomocí matrice („vyhledávací tabulky“). [7]

Princip metody spočívá v injekci sinusového signálu o několika frekvencích do baterie při několika milivoltech. Extrahované signály jsou digitálně vyfiltrovány a vytvoří tzv. Nyquistův graf, který je dále proložen různými elektrochemickými modely. SpectroTM vybere ten nejvhodnější model, ostatní jsou vypuštěny. Nakonec dochází ke korelaci hodnot klíčových parametrů a odvození (odhadu) CCA. Proces je zjednodušen na obrázku č. 2 [7].



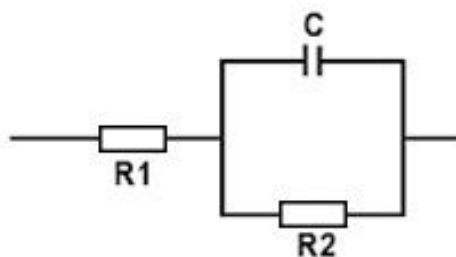
Obrázek č. 2 – Proces neinvasivní metody

3.7. Kapacita a CCA

Kapacita a CCA jsou dvě hlavní hodnoty popisující stav startovacích baterií. Tyto hodnoty na sobě však nezávisí (snad kromě konce životnosti baterie) a tak nelze z jedné odvodit tu druhou.

Většina metod pro rychlotesty měří vnitřní odpor baterie a z této hodnoty odhadují velikost CCA. Měření vnitřního odporu baterie je relativně jednoduchý proces, nemůže ale být sám o sobě použit pro změření kapacity baterie ani pro informaci, zda je potřeba baterii již vyměnit. Většina startovacích baterií totiž využívá poměrně malou část kapacity pro start motoru, problém přichází až v případě, kdy kapacita klesne pod 30 % a baterie již není schopna motor rozběhnout. [7]

Některé bateriové testery vychází z předpokladu, že startovací baterie, která je v dobré kondici, vykazuje hodnotu odporu R_1 (na Randleově diagramu – Obrázek č. 3) v jednotkách miliohmů, pokud je však hodnota dvoumístná, značí to některou z následujících situací. [7]



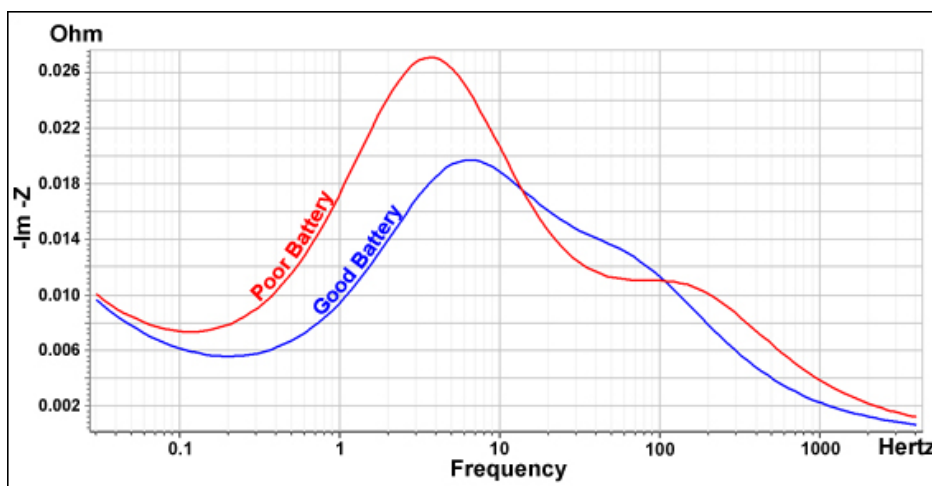
Obrázek č. 3 – Randleovův diagram

- 1) Nízká hodnota elektrolytu
- 2) Stratifikace elektrolytu
- 3) Sulfatace elektrod
- 4) Špatné nebo poškozené spojení kolektorových desek a sloupků
- 5) Zkorodované kolektorové desky
- 6) Špatné připojení baterie na svorkách nebo uvnitř baterie.

R1 představuje odpor elektrolytu, který je ovlivněn body 1 a 2. Paralelní část R2/C pak představuje odpor a rychlost přenosu náboje. To značí množství energie nutné k překonání potenciálové bariéry na rozhraní elektrody a elektrolytu, což vede k přesunu elektronů mezi elektrodou a svorkami. U baterie, která je ve špatném stavu je odpor bariéry vyšší, než u baterie s vyšší kapacitou. Paralelní část R2/C je tedy využívána k odhadu kapacity. Rozdělení dle Randleova modelu umožňuje lepší posouzení stavu baterie a je tak možné poznat rozdíl mezi baterií, která je pouze vybitá ale v dobrém stavu a baterií, které je ve stavu špatném. [7]

3.8. Rapid-test metody

Většina rychlých metod měření se zaměřuje buď na měření napětí, vnitřního odporu, nebo jako popisuje bod 3.2, jsou založeny na vysílání signálů do baterie.



Obrázek č. 4 – Porovnání odezvy akumulátorů v dobrém a špatném stavu [19]

3.9. Plný cyklus

Jak již název naznačuje, tato metoda spočívá v provedení celého cyklu nabití/vybití baterie regulovaným proudem pro určení její kapacity. Zatímco je tato metoda velice přesná a může v případě smart baterie posloužit k její kalibraci, je u větších baterií velice časově náročná a také invazivní, Proto je tato metoda vhodná spíše pro menší až střední akumulátory, u kterých si zároveň můžeme dovolit jejich vyřazení kvůli měření. [19] Dalším problémem této metody je také to, že měřené hodnoty při plném nabití a plném vybití v rámci cyklování baterie kolísají. To v praxi znamená to, že maximální naměřená kapacita v první cyklu může být vyšší, než v cyklu desátém. Tento jev lze velice dobře pozorovat například u vzorového měření pomocí soustavy S.A.M., v bodě 6.5.

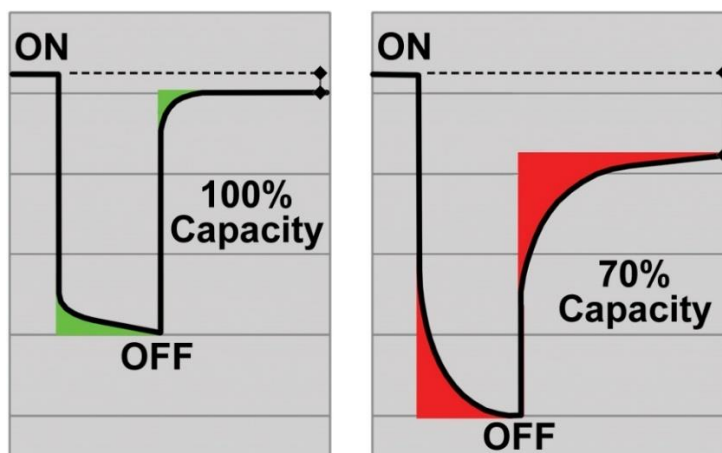
3.10. QSMS

Quick-sort Model Specific je metoda testu baterie, jejíž princip spočívá v měření odporu při použití stejnosměrného a střídavého proudu. Příkladem může být zkouška Li-ion baterie typu 18650, jejíž odpor je zhruba 110 mΩ při injekci stejnosměrného proudu a přibližně 36 mΩ při střídavém proudu s frekvencí 1 kHz. Rozdíl mezi naměřenými údaji lze dále poměřit s parametry v připravených tabulkách pro daný typ baterie, kde můžeme zjistit stav baterie. [9]

3.11. EDR

Metoda zvaná Electrochemical Dynamic Response měří pohyb iontového proudu mezi elektrodami pomocí zátěžových impulzů a vyhodnocuje dobu odezvy při zátěži a zotavení. Doba

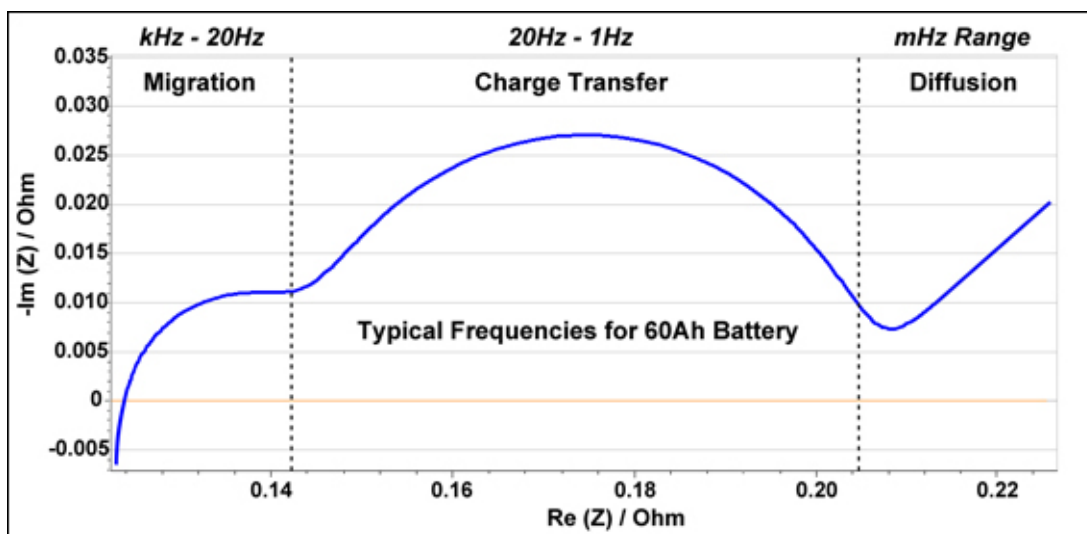
zotavení se opět porovná s uloženými parametry, podle kterých lze určit stav baterie. Na obrázku níže je jsou vyobrazeny dva případy, v prvním je odezva a tedy zotavení baterie rychlé, neboť její kapacita je na 100 %, v druhém případě je zotavení pomalejší, kapacita je zde přibližně na 70 %. [9]



Obrázek č. 5 – Doba odezvy při zátěži a zotavení [9]

3.12. EIS

Electrochemical Impedance Spectroscopy patří mezi komplexnější rychlotesty, které pro měření baterie využívají několika frekvencí a Nyquistův graf. Ten je dále proložen elektrochemickými modely, díky kterým můžeme odhadnout několik klíčových vlastností baterie – kapacitu, CCA a SoC. Celá metoda je neinvazivní a zabere přibližně 15 sekund. [9]



Obrázek č. 6 – Nyquistův graf [9]

3.13. Porovnání digitálních a analogových metod

Testovací metoda		Olověné baterie	Li-ion
Analog	Napětí	Odhaduje stav nabití ve stavu otevřeného obvodu. Teplota a aktivní materiály v systému baterie mohou ovlivnit hodnotu napětí. Hodnocení výkonu není možné.	
	Odpor	Lze určit selhání způsobené teplotou a jiné defekty. Odhad kapacity není možný.	Snížení kapacity nemusí ovlivnit odpor baterie.
	Plný cyklus	U větších (staničních) baterií se používá jen zřídka.	U menších baterií se doporučuje.
	Rapid test	Časová doména měří odpor a tok iontů. Frekvenční doména měří kapacitu.	Vysoká účinnost umožňuje časovou a frekvenční doménu.
	BMS	Napětí, proud a teplota slouží pro monitorování baterií.	Vhodné pro většinu Li-ion baterií.
Digitál	Prošlý náboj	Nízká účinnost nabíjení a vybíjení činí tuto metodu nepraktickou.	Vhodné pro většinu Li-ion baterií.
	Read and charge	Nepraktická metoda kvůli nízké účinnosti nabíjení, vybíjení a vysoké míře samovybíjení.	Vhodná díky vysoké účinnosti.
	State of life indicator	Určuje stav baterie podle dodané energie. Nová baterie začíná na 100 %. Čerpání energie spotřebovává náboj a vyvolává výměnu baterie při nulové kapacitě. Může být použita na všechny baterie.	

Tabulka č. 3 – Digitální a analogové metody [10]

4. Systémy pro měření ampérhodinové kapacity

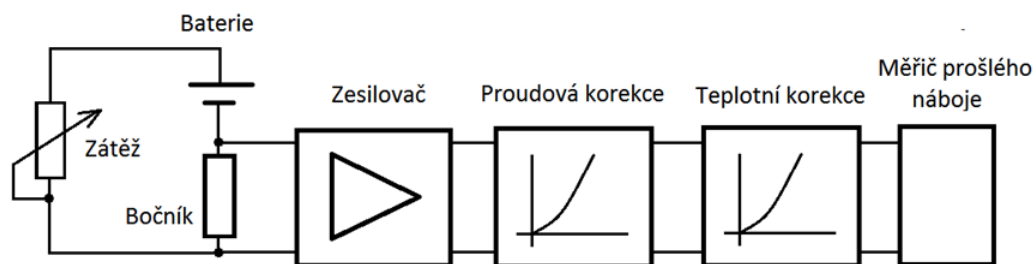
4.1. Stanovení kapacity měřením prošlého náboje

Princip této metody je založen na měření přenosu náboje z baterie do zátěže. Pro zvětšení přesnosti zde bereme v potaz některé jevy, kterými se skutečná baterie liší od ideálního zdroje, což by mohlo ovlivnit měření. Konkrétně zohledňujeme vliv závislosti využitelné kapacity akumulátoru na velikosti odebíraného proudu a vliv teploty. Prošlý náboj se stanovuje obdobou vzorce (1), popřípadě (2), kdy je náboj určen prošlým proudem za čas. [17]

Hodnota proudu odebíraného z baterie se převádí na odpovídající napětí pomocí bočnicku. Napětí se dále zesiluje na potřebnou velikost. Vliv velikosti proudu odebíraného z akumulátoru na velikost jeho využitelné kapacity je kompenzován korekčním činitelem. Korekce má opačný charakter než výše zmíněný jev. [17]

Významný vliv na využitelnou kapacitu baterie má její provozní teplota. Teplotní korekce má podobný účel jako proudová, koriguje se však chyba způsobená teplotní závislostí využitelné kapacity baterie. [17]

Měřič prošlého náboje pak pracuje jako integrátor okamžité hodnoty proudu. Při realizaci této soustavy se používá integrační zesilovač, nebo se vstupní napětí převádí na kmitočty a v daných intervalech se zaznamenává počet pulsů. Pro stanovení prošlého náboje lze také využít číslicové integrátory. [17]

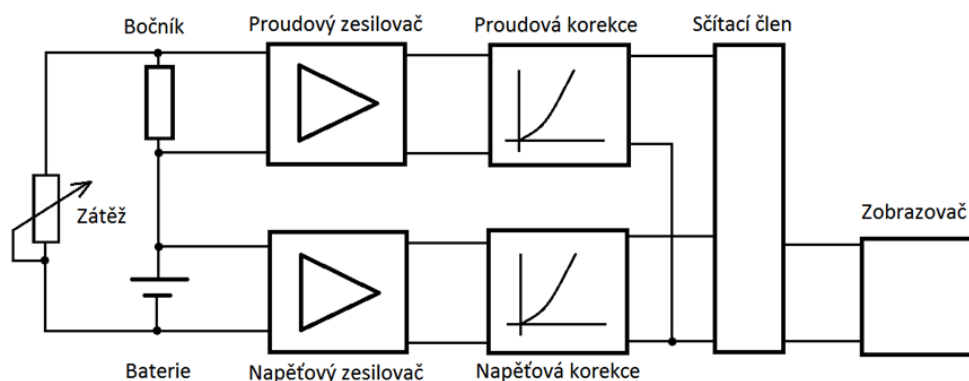


Obrázek č. 7 – Blokovaný diagram měření prošlého náboje [17]

4.2. Stanovení kapacity měřením napětí a korekcí vnitřního odporu

Touto metodou měříme napětí akumulátoru, jakožto ukazatele jeho stavu. Z naměřené hodnoty napětí lze posoudit kapacitu akumulátoru. Hodnotě okamžitého napětí tedy odpovídá určitému stupni nabití. Nejjednodušší metodou pro zobrazení stavu akumulátoru je použití jednoduchých

kontrolek, které se rozsvěčují úměrně velikosti napětí, systém tedy funguje jako voltmetr. Tento způsob ale poslouží pouze k velice přibližnému měření. Při změně odběru proudu se totiž mění i napětí akumulátoru v závislosti na jeho vnitřním odporu. Proto je opět nutná korekce. Zde způsobuje největší chybu úbytek napětí na vnitřním odporu při zatížení. Naměřené údaje tedy korigujeme korekčním členem, který navrhne díky předchozímu měření konkrétního akumulátoru při různých zatíženích. Doplněním uvedených korekcí můžeme získat přesnější výsledky. Jedno z možných zapojení je znázorněno na blokovém schématu níže.[17]

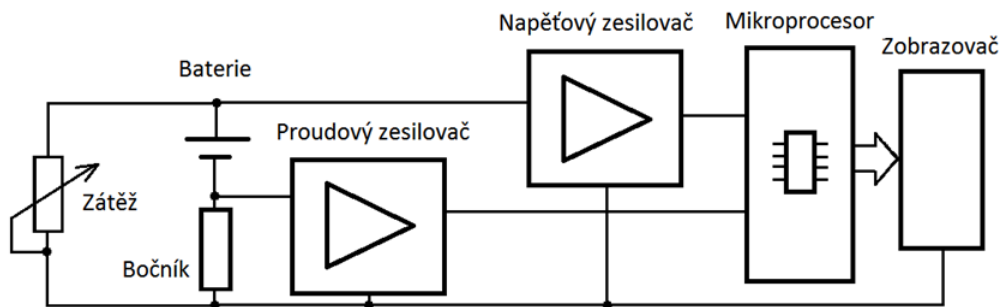


Obrázek č. 8 – Blokový diagram měření napětí a korekce vnitřního odporu [17]

Napěťový korekční činitel upravuje napětí z předcházejícího stupně tak, aby jeho výstupní hodnota korigovala pokles výstupního napětí akumulátoru na jeho vnitřním odporu. Výstupní napětí za proudovou a napěťovou korekci jsou vedena na sčítací člen, který sečte příspěvky od obou předcházejících bloků.

4.3. Stanovení kapacity s použitím mikroprocesoru

Výše zmíněné metody mají slabinu v tom, že nastavení pro korekci jevů, které činí měření nepřesným, jsou vždy vázány na konkrétní akumulátor. Univerzálnější zařízení, které má tedy plnit výše zmíněné funkce a být schopno měřit kapacity nejrůznějších akumulátorů bez závislosti na jejich typu nebo stáří, bude muset vyhodnocovat údaje pomocí mikroprocesoru. [17]



Obrázek č. 9 – Blokový diagram stanovení kapacity s použitím mikroprocesoru [17]

4.4. Stanovení kapacity pomocí přístroje AkkuMaster C5

Stanovení kapacity akumulátoru pomocí nabíjecí stanice AkkuMaster C5 bude, stejně jako zbytek níže zmíněných metod, podrobněji rozebrán v kapitole 6. - Vzorové měření. Funkčně odpovídá stanice AkkuMaster měření kapacity s použitím mikroprocesoru.



Obrázek č. 10 – H-Tronic AkkuMaster C5

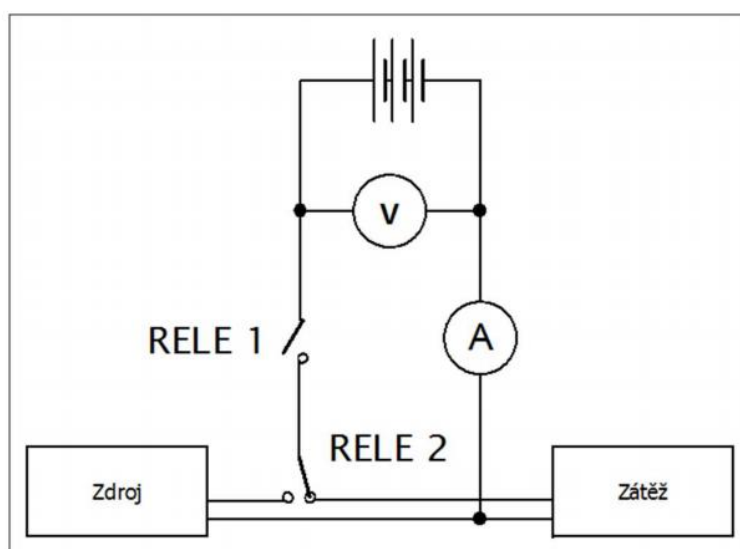
4.5. Stanovení kapacity pomocí systému s dataloggerem COMET MS55D

Datalogger COMET MS55D je pouze jednou částí celého systému, který vytvořil jako diplomovou práci Ing. Matěj Kmínek [20] a slouží jako záznamové zařízení, ke kterému je zapotřebí ještě nabíjecí a vybíjecí obvod, mezi kterými se přepíná pomocí relé.



Obrázek č. 11 – Datalogger COMET MS55D

4.6. Stanovení kapacity pomocí systému s multimetry a PC řízením (S.A.M)



Obrázek č. 12 – Zapojení S.A.M [22]

Výše uvedený obrázek č. 12 představuje základní zapojení soustavy automatického měření, jehož bližší vlastnosti jsou vysvětleny v kapitole 6.5.1.

4.7. Stanovení kapacity pomocí přístroje Volcraft ALC 8500

Metoda používající nabíjecí stanici Volcraft ALC 8500 je principiálně podobná AkkuMasteru C5, také používá kompaktní řešení zakoupené jako celek a využívá obdobného zapojení a tedy odpovídá určování kapacity s pomocí mikroprocesoru.



Obrázek č. 13 – Voltcraft ALC 8500

5. Normy pro olověné a lithiové akumulátory

Hlavním úkolem této kapitoly je zmapovat v současné době používané normy pro testování baterií a zjistit, jakých metod využívají pro měření kapacity, pro jaké aplikace jsou metody určeny a jak se liší normy pro lithiové a olověné baterie.

Normy pro olověné články	Normy pro lithiové články
ČSN EN 50342	ČSN EN 62660
ČSN EN 60254	ČSN EN 61960
ČSN EN 61982	ČSN EN 50604
ČSN EN 60896	ČSN EN 62620
ČSN EN 61056	ČSN EN 62619
	ČSN EN 62133
	ČSN EN 60086
	ČSN ISO 12405

Tabulka č. 4 – Normy pro lithiové a olověné akumulátory

5.1. Normy pro olověné baterie

Mezi normy, které se zabývají metodami zkoušek olověných baterií a jsou tedy relevantní pro tuto práci, patří následující.

5.1.1. ČSN EN 50342 - Olověné startovací baterie. Všeobecné požadavky, metody zkoušek a číselné označení. (pozn.-VRLA-valve regulated lead acid)

$$I_{10}(A) = \frac{C_{10n}(Ah)}{10(h)} \quad (7)$$

C_{10n} je nominální kapacita stanovená výrobcem, C_{10e} je efektivní kapacita stanovená při vybíjení konstantním proudem I_{10} do $U=10,5$ V,

ICC - cranking current - proud udaný výrobcem, který je baterie schopná dodat při -18 °C, baterie je vybíjena proudem I_{10} (spočten výše), který je držen na konstantní hodnotě ± 1 % dokud napětí neklesne pod $10,50$ V $\pm 0,05$ V-čas je zaznamenán (k vybíjení musí dojít v horizontu 1h-5h od nabití).

Kapacita je dále spočtena jako

$$C_{10e}(Ah) = I_{10}(A) \cdot t(h) \quad (8)$$

Z každé testovací sekvence baterií 1-4 se vezme maximální hodnota $C_{10e\max}$ a střední hodnota je spočtena jako:

$$\bar{C}_{10e}^{max} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 C_{10e\ i}^{max} \quad (9)$$

Standardní odchylka:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (C_{10e\ i}^{max} - \bar{C}_{10e}^{max})^2}{3}} \quad (10)$$

musí být dále splněna podmínka

$$\frac{(\bar{C}_{10e}^{max} - S)}{C_{10n}} \geq 0,95 \quad (11)$$

5.1.2. ČSN EN 60254 - Olověné trakční baterie. Část 1: Všeobecné požadavky a metody zkoušek.

Tato norma se týká olověných trakčních akumulátorů pro napájení elektrických pohonů. Platí tedy pro všechny aplikace trakčních akumulátorů, které zahrnují silniční vozidla, lokomotivy, průmyslové nákladní vozidla a mechanická manipulační zařízení.

Úvod je soustředěn na souhrn elektrických testů, mezi které patří hlavně kapacitní testy, zkoušky udržení náboje a také vybíjení vysokými proudy. Běžný vybíjecí proud při testování kapacity se

pohybuje okolo 0,2C, je to tedy 5h vybíjecí proud. Pokud u těchto akumulátorů budeme hovořit o tzv. „high discharge rate“, kterým je myšleno vybíjení vysokými proudy, mluvíme o hodnotách okolo 1C.

Norma dále stanovuje přesnost měřících přístrojů a toleranční pásma pro měření napětí, proudu, teploty, hustotu elektrolytu, čas apod. Následující kapitoly jsou věnovány konkrétním postupům elektrických testů, které jsou zmíněny výše. Závěr je věnován článkům, které disponují regulací pomocí ventilů (VRLA) a postupu pro jejich testy.

5.1.3. ČSN EN 61982 - Akumulátorové baterie pro pohon elektrických silničních vozidel.

Část 3: Zkoušky funkčních vlastností a životnosti. (Nevztahuje se na baterie lithiové)

Toleranční pásma měřících přístrojů: – ±1 % napětí, ±1 % proud, ±2 % výkon, ±2 K teplota, ±0,1 % čas, ±0,1 % velikost, ±0,1 % hmotnost.

Výpočet skutečné kapacity:

$$C_a = \frac{C}{1+\lambda(t_0-25)} (Ah) \quad (12)$$

C_a - skutečná kapacita při referenční teplotě, C – kapacita při teplotě měření, t_0 – počáteční teplota, λ – teplotní korekční faktor, Rated capacity - kapacita v Ah při vybíjení konstantním proudem-3h kapacita při 25 °C

$$I_n(A) = \frac{C_n(Ah)}{3h} \quad (13)$$

5.1.4. ČSN EN 60896 - Staniční olověné akumulátory. Všeobecné požadavky a zkoušky.

Tato norma se soustředí hlavně na staniční olověné akumulátory, požadavky na ně a metody zkoušek, které se na tomto typu akumulátorů provádí.

Úvodní část patří jako obvykle pojímům, dále zde můžeme nalézt provozní charakteristiky a také organizaci zkoušek, což představuje parametry a pásma přesnosti měřících přístrojů. V kapitole zabývající se metodami zkoušek nalezneme velice přesné postupy zkoušek jak elektrických, tak mechanických (provozních).

Speciální kapitola elektrických zkoušek se věnuje typickým případům použití staničních olověných akumulátorů, nalezneme zde tedy zkoušku vybíjení při velmi nízkých teplotách, zkoušky udržování nabití (kapacity), a nebo také tabulky pro permanentní nabíjení.

5.1.5. ČSN EN 61056 - Olověné baterie pro všeobecné použití (typy s regulačním ventilem). Část 1: Základní požadavky, funkční charakteristiky. Metody zkoušek.

Tato norma souvisí se dvěma výše uvedenými normami, a to konkrétně s ČSN EN 60254 a ČSN EN 60896. Nevztahuje se však na použití, jakými jsou startování motoru, trakci a stacionární použití.

Úvod je věnován pojmům, definicím a následují funkční charakteristiky a zvláštní požadavky. Běžné měření kapacity probíhá proudem I_{20} , tedy proudem odpovídajícím 0,05C. Dále následují testy odolnosti v režimech cyklického nabíjení, udržovacího nabíjení a také zkoušky uchování náboje a maximální dovolený proud.

Z elektrických testů je také norma soustředěna na vybíjecí charakteristiky při vysokém proudu a nabíjecí schopnost po hlubokém vybíjení.

Poměrně detailně jsou v normě představeny obecné podmínky zkoušek, mezi které patří výběr vzorků, měřicí přístroje atd. Konkrétní popisy zkušebních metod pro výše zmíněné elektrické testy jsou vyloženy v následujících kapitolách a norma je zakončena teorií o funkci ventilu a vzorci pro výpočet emise plynu.

5.2. Normy pro lithiové baterie

5.2.1. ČSN EN 62660-1 - Lithium-ion akumulátorové články pro pohon elektrických silničních vozidel – Část 1: Zkoušky funkčních vlastností

Tato norma se zabývá zkouškami sekundárních lithium-ionových článků, využívaných pro pohon elektrických vozidel, jak ve verzi kompletně bateriové, tak hybridní.

Hlavním úkolem je specifikovat testovací metody a získat nezbytné parametry pro tento typ baterie, jako je například kapacita, měrný výkon, měrná energie, způsob uskladnění a životnost. Použité metody pak zajistí dostatečný výkon pro pohon elektrického pohonu a bezpečné použití lithium-ionových baterií.

Metody, vzorce a parametry vycházející z normy:

Referenční testovací proud:

$$I_r(A) = \frac{C_n(Ah)}{1(h)} \quad (14)$$

C_n - jmenovitá kapacita, n - čas v hodinách.

Teplota v místnosti při provádění testů by měla být na hodnotě $-25\text{ °C} \pm 2\text{ K}$.

Měřicí schopnosti přístrojů:

- odpor voltmetrů minimálně $1\text{ M}\Omega/\text{V}$
- celá soustava ampérmetru a obvodu by měla mít přesnost třídy 0,5 nebo lepší

Tolerance přesnosti sledovaných nebo měřených hodnot(\pm) – 0,1 % napětí, 1 % proud, 2 K teplota, 0,1 % čas, 0,1 % velikost, 0,1 % hmotnost.

Měření kapacity :

- Článek musí být nejdříve nabit dle normy -
- Musí proběhnout stabilizace teploty – teplota článku se nemění více než 1 K za hodinu
- V dalším kroku se článek vybíjí za stanovené teploty konstantním proudem až do konečného vybíjecího napětí, poskytnutého výrobcem. Vybíjecí proud a teplota se řídí opět dle normy.

Další kapitoly se zabývají testy výkonu, energie, nabíjecími/vybíjecími testy a také testy teplotními.

5.2.2. ČSN EN 61960 - Akumulátorové články a baterie obsahující alkalické nebo jiné nekysele elektrolyty – Akumulátorové lithiové články a baterie pro přenosné použití.

Tato norma se zabývá zejména zkouškami funkčních vlastností a požadavky pro akumulátorové lithiové články a baterie pro přenosné použití. V normě je definována minimální požadovaná úroveň funkčních vlastností a normalizované metody pro provádění zkoušek.

V úvodu norma definuje důležité pojmy, toleranční pásma pro měřené veličiny a také označení jednotlivých typů. V dalších kapitolách jsou uvedeny požadavky pro elektrické testy, tedy podmínky pro nabíjení, vybíjení a také postupy pro tyto akce.

5.2.3. ČSN EN 50604 - Akumulátorové lithiové baterie pro lehká EV (elektrická vozidla).

Tato norma se soustředí na lithium-ion bateriové systémy pro pohon elektrických silničních vozidel. Požadavky na tyto systémy se totiž významně liší od požadavků pro baterie používané pro spotřební elektroniku.

ČSN EN 50604 je třeba používat ve spojení s ISO 12405, jejíž shrnutí se nachází v následující kapitole. Kapitoly týkající se zvláštních požadavků v ČSN EN 50604-1 doplňují nebo pozměňují odpovídající kapitoly v ISO 12405.

Zkoušky popsané v této normě jsou uzpůsobeny tak, aby napodobovaly podmínky, které mohou nastat během provozu nebo manipulace. Zahrnují také situace nesprávného použití, hrubého zacházení a extrémních podmínek.

Úvodní kapitoly normy uvádějí důležité termíny a značky používané v dokumentaci. Dále následují obecné požadavky, tedy podmínky zkoušek, tolerance měřených veličin, přípravy na zkoušky a bezpečnostní opatření.

V následujících kapitolách jsou probírány mechanické zkoušky, klimatické zkoušky a simulace nehody vozidla. V neposlední řadě jsou zde elektrické zkoušky a zkoušky funkčnosti systému.

Přílohy normy obsahují popsané nákresy bateriových systémů, jejich součástí, značení systémů a také informace týkající se přepravy.

5.2.4. ČSN EN ISO 12405 - Elektricky poháněná silniční vozidla – Specifikace zkoušek pro lithium-ion trakční bateriové sady

Jak je zmíněno výše, tato norma spolupracuje s normou ČSN EN 50604, věnuje se lithiovým bateriím pro trakci a stanovuje zkušební postupy a bezpečnostní požadavky na zmíněný typ akumulátorů. Nevztahuje se však na bateriové sady pro dvou a tříkolová vozidla.

Úvod normy je věnován pojmům a tolerančním pásmům pro měřicí přístroje. Dále se norma zabývá mechanickými testy, které jsou potřeba pro běžný provoz bateriových sad v trakci, tedy testy vibrací, mechanického šoku, klimatickými testů a samozřejmě i simulacemi nehod vozu. Z elektrických testů nalezneme v normě hlavně testy zkratu a ochrany před nadměrným vybitím.

5.2.5. ČSN EN 62620 - Akumulátorové články a baterie obsahující alkalické nebo jiné nekyselé elektrolyty - Akumulátorové články a baterie pro použití v průmyslových aplikacích

Tato norma stanovuje značení, zkoušky a požadavky pro uzavřené akumulátorové lithiové články a baterie pro použití v průmyslových aplikacích včetně stacionárního provedení jako jsou UPS, systémy pro akumulaci energie, nouzové napájení, vysokozdvížné vozíky, golfové vozíky a prostředky železniční a námořní dopravy.

Úvodní část normy je standardně věnována pojům a tolerančním pásmům pro měřené veličiny, dále se zde pak nachází i značení a zkratky. Další kapitoly se věnují elektrickým testům, tedy kapacitní testy, cyklování, uchování náboje a také jsou zde popsány nutné podmínky pro testy, jako je okolní teplota. Průběh testů je zde popsán velice podrobně.

5.2.6. ČSN EN 62619 - Akumulátorové články a baterie obsahující alkalické nebo jiné nekyselelé elektrolyty – bezpečnostní požadavky pro akumulátorové lithiové články a baterie pro použití v průmyslových aplikacích.

ČSN EN 62619 se zabývá primárně bezpečnostními požadavky na lithiové články a baterie. Úvodní část patří opět pojům a tolerančním pásmům měřených veličin, což je následováno obecnými požadavky. Dále jsou vysvětleny požadavky a podmínky konkrétních zkoušek, jako jsou zkoušky pádem, zkouška nárazem, zkouška vnějším zkratem, zkouška tepelným namáháním, zkouška přebíjením apod.

V závěru jsou uvedeny požadavky na bezpečnost bateriového systému s ohledem na funkční bezpečnost. Přílohy jsou věnovány provozní oblasti pro bezpečné použití a postupům při zkoušce šíření poruchy.

Tato norma se ve svých částech odkazuje na ČSN EN 62133 a ČSN EN 62620.

5.2.7. ČSN EN 62133-2 - Akumulátorové články a baterie obsahující alkalické nebo jiné nekyselelé elektrolyty. Část 2: Lithiové systémy

Úvodem normy jsou definice, pojmy a toleranční pásma měřících přístrojů, za kterými následují obecné bezpečnostní požadavky. Další kapitoly se věnují typovým zkouškám pro nejrůznější provozní situace, zvláštním požadavkům, jako jsou nabíjecí požadavky, mechanické zkoušky, nebo nucenému vybíjení.

Závěr je věnován informacím pro bezpečnost a také značení. Přílohy jsou poměrně rozsáhlé a věnují se různým tématům, jako například bezpečnosti, přepravě, nabíjení apod.

5.2.8. ČSN EN 60086-4 - Primární baterie – Část 4: Bezpečnost lithiových baterií.

Tato část normy se soustředí především na požadavky pro testování bezpečnosti akumulátorů. Jsou zde uvedeny jak toleranční pásma přístrojů, tak i elektrické a mechanické zkoušky. Jak již plyne z názvu, jedna celá kapitola se věnuje pouze bezpečnosti a bezpečnostním požadavkům například pro manipulaci s akumulátory. Závěr je pak věnován značení a přílohy se dle zabývají bezpečností, skladováním a zásadami pro konstruktéry, kteří vytváří zařízení používající tento typ baterií.

5.3. Použití norem

I když předešlé dvě kapitoly jistě nezahrnují úplně každou relevantní normu týkající se postupů pro měření kapacity lithiových a olovených článků, jsou zde zmíněny ty nejdůležitější a nejvíce používané. Z mého průzkumu je zřejmé, že ačkoliv lithiové baterie jsou na vzestupu, používají se čím dál více a vytlačují baterie olovené, normy pro testování tohoto typu baterií lehce zaostávají a není jich zdaleka tolik, kolik bychom očekávali a v některých případech nejsou zdaleka tak rozsáhlé, nebo se lithiovým bateriím věnuje pouze část normy. Postupy pro některé typy a aplikace lithiových akumulátorů bohužel chybí. Odvození od postupů nacházejících se v normách pro akumulátory olovené však v drtivé většině není možné.

Technologie lithiových baterií je totiž diametrálně odlišná od olova a testovací parametry musí splňovat jiné hodnoty. Rozdíly mezi oběma technologiemi, kvůli kterým není možné použít stávající normy pro olovo, jsou uvedeny v následující kapitole.

5.4. Rozdíly mezi lithiovými a olovenými články

	Jmenovité napětí	Napětí při plném nabití	Konečné vybíjecí napětí	Minimální napětí
Olovo	2 V/čl.	2,67 V/čl.	1,75 V/čl.	1,5 V/čl.
Lithium (obecně)	3,6 V (3,7 V)/čl.	4,2 V/čl.	2,75 V – 3 V/čl.	2,5 V/čl.
Lithium titanát	2,4 V/čl.	2,85 V/čl.	1,8 V/čl.	1,5 V/čl.
Lithium fosfát	3,2 V/čl.	3,65 V/čl.	2,5 V/čl.	2,0 V/čl.

Tabulka č. 5 – Rozdíly mezi lithiovými a olovenými články část 1. [1]

	Měrná energie	Charge rate	Discharge rate	Životnost
Olovo	30 - 40 Wh/kg	0,1 C - 0,3 C	0,1 C	500-800 cyklů
Lithium (obecně)	150-200 Wh/kg	0,7 C – 1 C	1 C (u některých	500-1000 cyklů
Lithium titanát	70-80 Wh/kg	1 C (max 5 C)	Možné 10 C	3000 - 7000
Lithium fosfát	90-120 Wh/kg	1 C	1 C	1000 - 2000

Tabulka č. 6 – Rozdíly mezi lithiovými a olovenými články část 2. [1]

5.5. Měření olověných startovacích baterií dle norem

5.5.1. Kontrola 20 hodinové kapacity C_e

Během této zkoušky musí být baterie uloženy ve vodní lázni udržované na teplotě $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Víko baterie musí být nejméně 15 mm, ale ne více než 25 mm nad hladinou vody. Pokud je v nádobě více baterií, je minimální vzdálenost mezi bateriemi a také mezi stěnami a bateriemi stanovena na 25 mm.

Baterie musí být vybíjena konstantním proudem I_n udržovaným na jmenovité hodnotě s přesností $\pm 2\%$, dokud napětí na pólových vývodech neklesne na $10,50\text{ V} \pm 0,05\text{ V}$. Zaznamenáváme dobu t (h) tohoto vybíjení. Začátek vybíjení musí být v rozmezí 1 až 5 hodin od ukončení nabíjení. Ze zaznamenaných dat lze spočítat kapacitu dle vzorce: [17]

$$C_e = t \cdot I_n (Ah) \quad (15)$$

5.5.2. Kontrola reverzní kapacity $C_{r,e}$

Baterie musí být i při tomto testu umístěna v lázni, jako při kontrole 20 hodinové kapacity. V rozmezí 1 až 5 hodin od ukončení nabíjení musí být baterie vybíjena proudem $25\text{ A} \pm 1\%$, dokud napětí na pólových vývodech neklesne na $10,50\text{ V} \pm 0,05\text{ V}$. Zaznamenáváme dobu t (min) tohoto vybíjení. Rezervní kapacita lze pak vypočítat dle vzorce: [17]

$$C_{r,e} = t(\text{min}) \quad (16)$$

5.6. Měření olověných staničních baterií dle norem

Ke kapacitní zkoušce staniční baterie lze přikročit, byla-li připravena dle pokynů výrobce, je nová a úplně nabitá. Pro usnadnění měření teploty při této zkoušce se pro baterii s méně než 100 články zvolí jeden vztažný článek pro každou skupinu šesti článků, pro baterie s více než 100 články se zvolí jeden vztažný na každou skupinu deseti článků. Teplota elektrolytu se musí měřit bezprostředně před vybíjením a jednotlivé hodnoty musí být v rozmezí 15 °C až 30 °C . Průměrná teplota se pak vypočítá jako aritmetický průměr jednotlivých hodnot a musí být ve stejném rozmezí, stejně jako okolní teplota. Je však žádoucí, aby se teplota okolí i teploty článků přibližovaly referenční teplotě 20 °C nebo 25 °C . [17]

Při kapacitní zkoušce (1h až 24h od nabití) je baterie vybíjena proudem I_{rt} , jehož hodnota musí být konstantní, s tolerancí $\pm 1\%$, v případě ruční regulace $\pm 5\%$. Napětí na pólových vývodech musí být zaznamenáváno automaticky v závislosti na čase, nebo odečítáno z voltmetru, v tomto případě ale musí odečítání proběhnout minimálně při 25 %, 50 % a 80 % vypočtené vybíjecí doby dle vzorce: [17]

$$t = \frac{C_{rt}}{I_{rt}} \quad (17)$$

A dále pak v přiměřených časových intervalech, které umožňují zjištění konečného vybíjecího napětí U_f . Vybíjení je ukončeno, dosáhne-li napětí hodnoty:

$$U_{fn} = n \cdot U_f \quad (18)$$

Kde n značí počet článků. Pokud bylo dosaženo průměrného napětí nebo pokud napětí na článku nebo na monoblokové baterii dosáhlo hodnoty $U = U_f - 200 \text{ mV}_{pc}$ nebo pokud v případě monoblokové baterie o n článcích je $U = U_f - \sqrt{n} \cdot 200 \text{ mV}$, zkouška se musí ukončit. [17]

Naměřená kapacita C (Ah) při průměrné počáteční teplotě θ se vypočítá jako součin vybíjecího proudu (A) a vybíjecí doby (h). Pokud se průměrná počáteční teplota odchyluje od referenční hodnoty, musí být naměřená kapacita C korigována na skutečnou kapacitu C_a pro vybranou referenční teplotu (20 °C, 25 °C), pomocí rovnice: [17]

$$C_{a20^\circ C} = \frac{C}{(1+\lambda(\theta-20^\circ C))} \quad (19)$$

Pro vybíjení delší než 3 h, musí být použit koeficient $\lambda=0,006$, pro rychlejší vybíjení pak $\lambda=0,01$.

5.7. Měření olověných baterií pro všeobecné použití dle norem

Pokud není stanoveno jinak, baterie musí být při zkoušce ve svislé poloze, okolní teplota musí být v rozmezí 15 °C až 35 °C, relativní vlhkostí mezi 25 % a 85 % a tlaku 86 kPa až 106 kPa. [17]

5.7.1. Skutečná kapacita při 20 h vybíjecím proudem

Před testem musí být baterie nabita a ponechána bez zatížení po dobu 5 h až 24 h. Po dobu zkoušky musí být teplota okolí udržována na hodnotě $25^\circ C \pm 1 \text{ K}$. Baterie je dále vybíjena konstantním proudem $I_{20} \pm 2\%$ až do dosažení napětí na pólových vývodech $U_t = n \cdot 1,75 \text{ V}$. Doba vybíjení t (h) se zaznamenává a skutečná kapacita se dále vypočítá jako $C_a = t \cdot I_{20}$. Skutečná kapacita C_a musí být větší než C_{20} , jinak se musí postup opakovat. Požadovaných hodnot musí být dosaženo nejdéle při pátém vybíjení. [17]

5.8. Závaznost technických norem

České normy (dle Zákona č. 142/1991 Sb. o československých normách ve znění Zákona č. 632/1992 Sb – v současné době řešeno Zákonem č. 22/1997 Sb) jsou závazné jen v těch částech, kde jsou v textu závazná ustanovení s uvedením ministerstva nebo orgánu státní správy, na základě kterého byla závaznost stanovena. Jedině uvedený orgán je oprávněn povolit na základě

požadavku výjimku. Ostatní nezávazné části jsou považovány za optimální řešení. Klíčové výrazy „požaduje se“ nebo „musí se“ tedy uvádějí ustanovení, jejichž splnění je nutné k prokázání shody výrobku s normou. V případě, že se výrobce odchýlí od ustanovení, nemůže prohlásit shodu s normou. [17]

5.9. Posuzování shody

Na základě Zákona č. 22/1997 Sb. Stanoví vláda nařízeními výrobky, u kterých musí být posouzena shoda s požadavky technických předpisů a základní technické požadavky. Jsou-li vlastnosti výrobku v souladu s harmonizovanými českými normami, předpokládá se, že jsou základní požadavky splněny. U výrobků stanovených nařízeními, je výrobce povinen před uvedením na trh vydat prohlášení o shodě, pokud se tak nestane, distributor nesmí výrobek prodávat. Výjimkou jsou výrobky označené evropskou značkou shody CE. Výrobce tedy sám otestuje určený počet akumulátorů z výrobní série, s největší pravděpodobností podle jedné z norem v kapitole 5 a vlastnosti by měly odpovídat požadavkům dané normy. Pokud odpovídají, je vydáno prohlášení o shodě. [17]

6. Vzorové měření a porovnání metod

6.1. Porovnání metod pro vzorové měření

Základním předpokladem pro porovnání níže zmíněných měřících metod je použití stejných akumulátorů pro vzorové měření a pozorování rozdílů mezi naměřenými hodnotami. Očekávání je takové, že nejpřesnější metodou by měla být metoda S.A.M., díky velice přesným multimetrům.

Realizace vzorových měření proběhla na několika měřících soustavách, jejichž tvorba byla většinou součástí závěrečných prací či projektů ostatních studentů, včetně metody s přístrojem AkkuMaster C5, pro který jsem vytvořil software v rámci předmětu Projekt 2. V rámci snahy porovnat měřící soustavy, jejich přesnost a nejistoty, byly pro tento pokus vybrány dvě olověné baterie shodných parametrů, rozdílného stáří a opotřebování.

Vybrané akumulátory (2kusy) jsou olověné šesti článkové baterie s následujícími parametry:



Obrázek č. 14 – Testovaný akumulátor - olovený

- Nominální napětí – 12 V
- Kapacita - 7,2 Ah
- Max. proud – 2,16 A

6.2. AkkuMaster C5

6.2.1. Vlastnosti přístroje

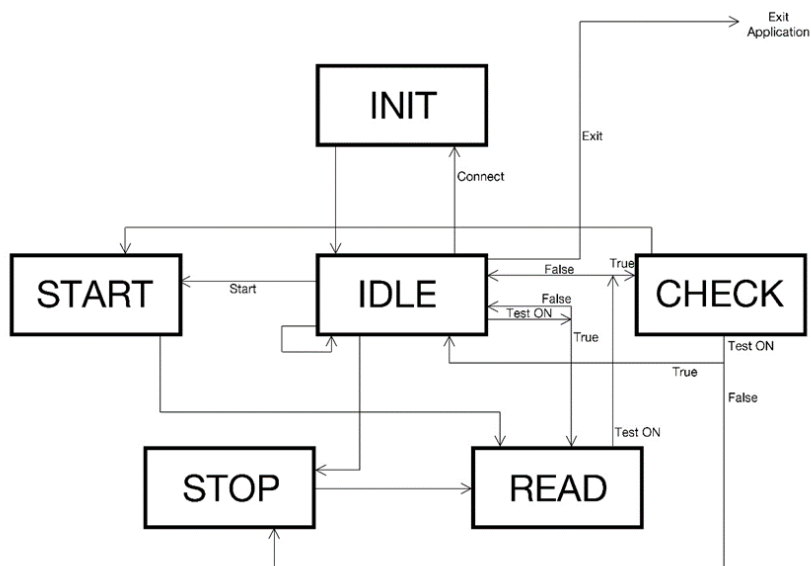
- Maximální nabíjecí proud – 5000 mA
- Maximální vybíjecí proud – 5000 mA
- Minimální proud – 50 mA
- Maximální nabíjecí výkon – 70 W
- Maximální vybíjecí výkon – 30 W
- Maximální výstupní napětí - 38000 mV
- Minimální výstupní napětí 100 mV
- Maximální pokles napětí – 4000 mV

6.2.2. Použitý software

Jelikož software dodávaný výrobcem byl pro potřeby diplomové práce zcela nedostatečný, stala se jeho tvorba námětem pro projekt předcházející diplomové práci a v rámci této práce byl software dále vylepšován pro použití na více přístrojích zároveň. Hlavním problémem dodávaného softwaru bylo to, že nebylo možné sledovat měření v reálném čase, nebylo možné parametry měření nastavovat jednoduše na PC, ale bylo třeba je nastavovat na malém dvouřádkovém displeji přístroje, který navíc v průběhu měření dokázal zobrazit jen omezené množství informací o stavu.

V rámci diplomové práce byl software rozšířen tak, aby bylo možné jeho použití na několika stanicích zároveň. K PC tedy můžeme připojit více nabíjecích stanic a na základě nastaveného COM portu počítače, se můžeme k jednotlivým přístrojům připojit a samostatně je ovládat.

6.2.3. Funkce softwaru – stavový diagram



Obrázek č. 15 – Stavový diagram funkce programu

6.2.4. Uživatelské rozhraní



Obrázek č. 16 – GUI programu

6.2.5. Zadávací parametry

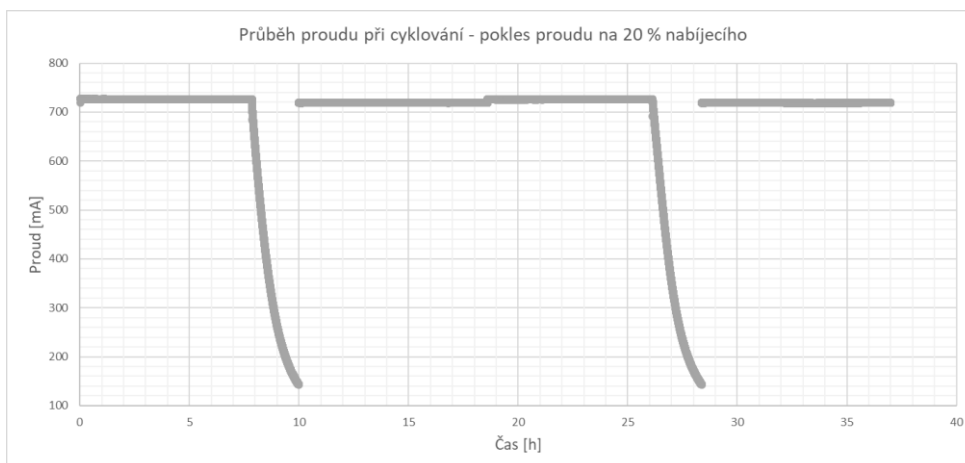
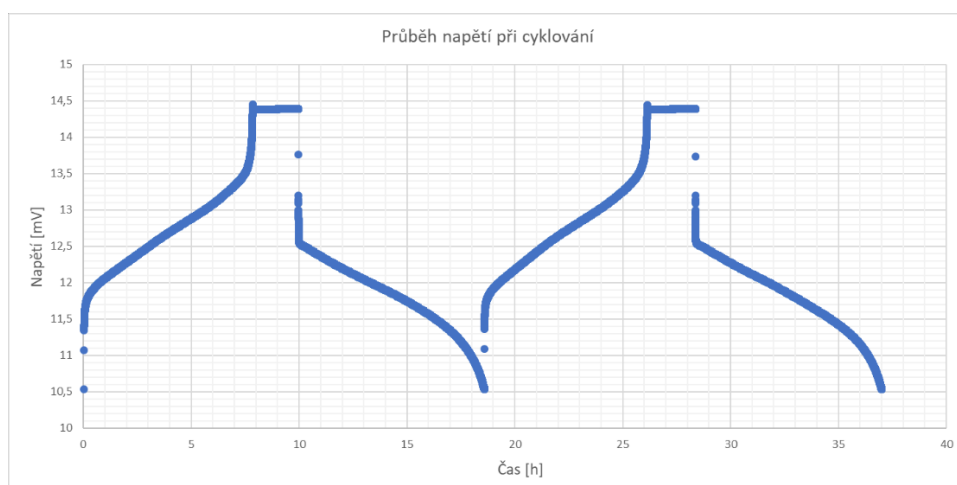
- a) Nabíjení – napětí, proud, konečný nabíjecí proud (udáno v % nabíjecího proudu)
- b) Vybíjení – proud, napětí baterie, konečné vybíjecí napětí
- c) Cyklování – parametry pro nabíjecí a vybíjecí část, počet cyklů

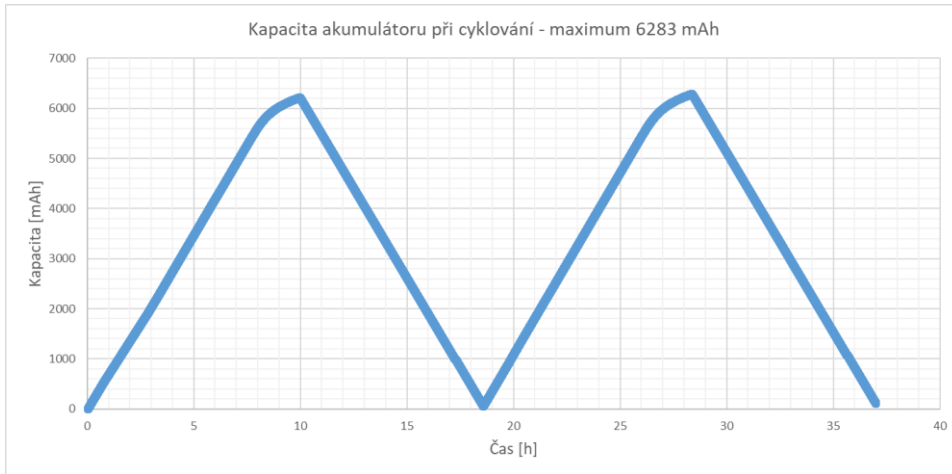
6.2.6. Výstupy

Výstup programu má hned několik forem, a to jak číselné zobrazení, slovní zobrazení stavu, tak i vizuální zobrazení v podobě grafů. Hodnoty napětí, proudů a teploty používaného akumulátoru jsou zobrazeny v číselné formě a tyto hodnoty jsou dále zpracovány a vyneseny do grafu. Teplota akumulátoru je dostupná pouze při zapojení přídavného teploměru, jehož zdířka se nachází na zadní straně přístroje. Slovní zobrazení stavu přístroje informuje uživatele o tom, zda začíná nabíjení/vybíjení, probíhá nabíjení/vybíjení, nebo zda je přístroj v nečinnosti.

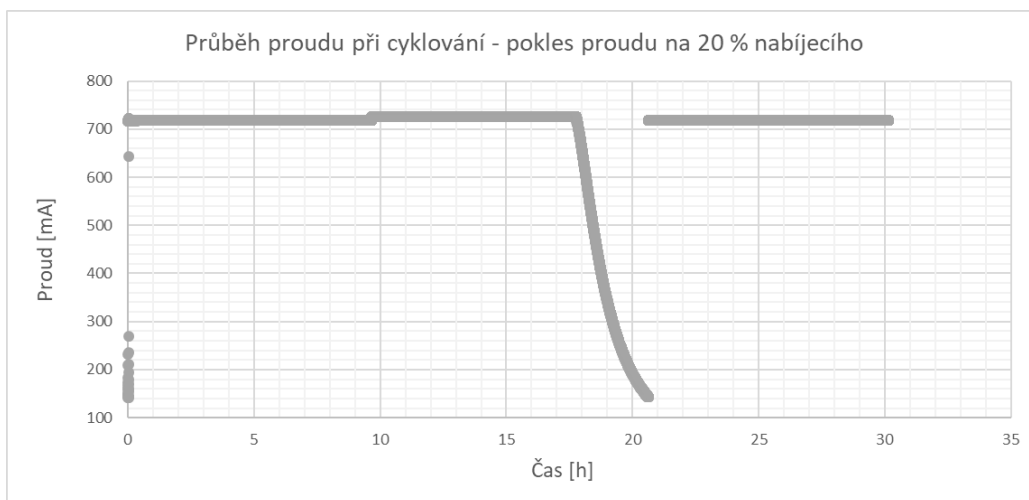
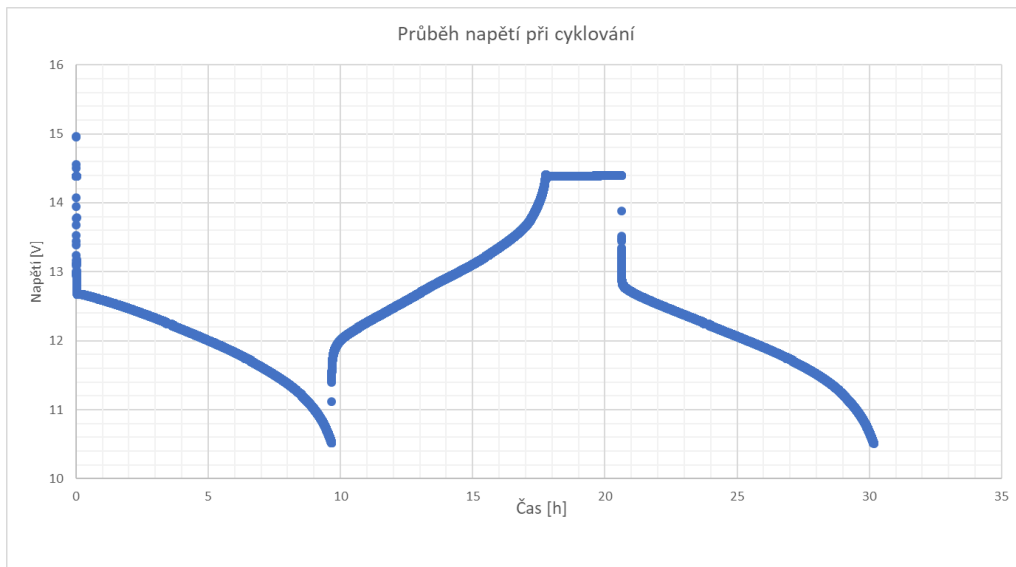
6.2.7. Vzorové měření

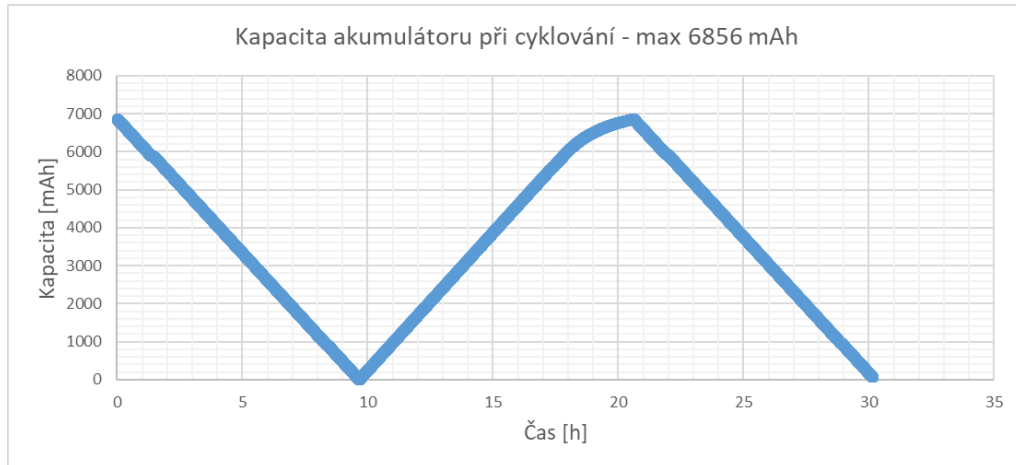
6.2.7.1. Vzorek č. 1





6.2.7.2. Vzorek č. 2





6.2.8. Nejistoty

Nejistoty měření jsou způsobeny nejrůznějšími vlivy, které se vyskytují spolu s naměřenou veličinou a projeví se odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny. Pokud jsou tyto vlivy systematické a jejich vliv je známý, lze je korigovat. Skutečná hodnota leží s jistou pravděpodobností v určitém pásmu okolo naměřených hodnot. Rozsah pásma určuje nejistota měření.

Pro určení tzv. kombinované nejistoty dle vzorce:

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (20)$$

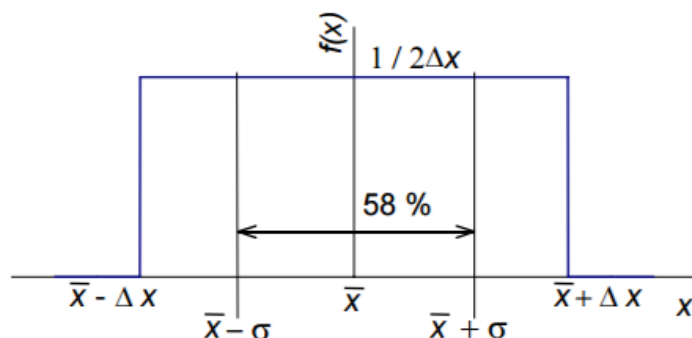
potřebujeme nejistotu typu A:

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (21)$$

a nejistotu typu B:

$$D = \frac{[\Delta x - (-\Delta x)]^2}{12} = \frac{4\Delta x^2}{12} = \frac{\Delta x^2}{3} \quad (22)$$

$$\sigma = \sqrt{D} = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} \quad (23)$$



Nejistota typu A se však určuje statistickým zpracováním z výsledků opakovaných měření, při kterých se několikrát opakuje měření stejné veličiny, což není případ této práce. V tomto případě lze tedy kombinovanou nejistotu zjednodušit pouze na nejistotu typu B. Ta je konkrétně u číslicových přístrojů určena dle následujících vzorců:

$$u_B = \sigma = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{\delta_1}{100} \cdot X + \frac{\delta_2}{100} \cdot M}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

$$u_B = \sigma = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{\delta_1}{100} \cdot X + N \cdot R}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

kde X – měřená hodnota

R – rozlišení přístroje

M – hodnota měřicího rozsahu

δ_1 – chyba z odečtené hodnoty

N – počet kvantizačních kroků

δ_2 – chyba z rozsahu

Pravděpodobnost, že skutečná hodnota leží v intervalu standardní nejistoty, činí 68 % pro normální rozložení nejistoty typu A a 58 % pro rovnoměrné rozdělení u nejistoty typu B. Rozšířená nejistota $U(x)$ je definována jako součin kombinované standardní nejistoty u_C a koeficientu rozšíření k_r . Hodnota k_r musí být vždy u výsledku uvedena a nejčastěji se používá $k_r = 2$.

$$U(x) = k_r \cdot u_C(x) \quad (26)$$

Příklad vyčíslení nejistoty pro měření napětí:

- ADC převodník – 12 bit (4096 hodnot)
- Referenční napětí – 2,5 V
- Nejmenší měřitelná hodnota v tomto rozsahu – referenční napětí nutno zesílit 16x:

$$\frac{38000}{4096} = 9 \text{ mV} \cdot 16 = 148 \text{ mV} \quad (27)$$

- V tomto rozsahu je největší možná chyba:

$$\frac{148}{38000} = 0,39 \% \quad (28)$$

- Použitý rozsah $M = 38000 \text{ mV}$
- $\pm 0,39 \%$ z odečtené hodnoty
- $\pm 0,1 \%$ z rozsahu
- Naměřená hodnota = 12000 mV

$$u_B = \frac{\frac{0,39}{100} \cdot 12000 + \frac{0,1}{100} \cdot 38000}{\sqrt{3}} = 49 \text{ mV} \quad (29)$$

Odpovídá nejistotě $0,41 \%$, při rozšířené nejistotě pak:

$$U_x = 12000 \text{ mV} \pm 98 \text{ mV}; \text{ kr} = 2$$

$$U_x = 12000 \text{ mV} \pm 0,82 \% ; \text{ kr} = 2$$

Proudový rozsah 5000 mA na 12 bit převodník:

$$\frac{5000}{4096} = 1,22 \text{ mA} \quad (30)$$

$$\frac{1,22}{5000} = 0,024 \% \quad (31)$$

Nejistota nastavené hodnoty proudu na zdroji:

$$u_I = \frac{\sqrt{\left(I \cdot \frac{\delta_{11}}{100} + \delta_{12} + \delta_2\right)^2 + (\delta_3)^2}}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

kde δ_{11} představuje chybu z odečtené hodnoty, δ_{12} konstantní složku chyby z odečtené hodnoty, δ_2 chybu z rozsahu a δ_3 další vlivy.

$$u_Q = u_I \cdot t = \frac{\sqrt{\left(720 \cdot \frac{0,024}{100} + 0,01\right)^2 + (0,002)^2}}{\sqrt{3}} = 5,986 \text{ mA} \quad (33)$$

Standardní nejistota z odečten hodnoty:

$$u_B = \frac{\sqrt{\left(\frac{0,024}{100} \cdot 720\right)^2 + \left(\frac{0,1}{100} \cdot 5000\right)^2}}{\sqrt{3}} = 2,888 \text{ mA} \quad (34)$$

Kombinovaná nejistota :

$$u_{IC} = \sqrt{0,002888^2 + 0,005986^2} = 0,00665 \text{ A} = 6,65 \text{ mA} \quad (35)$$

$$u_Q = 6,65 \cdot 10 = 66,5 \text{ mAh} \quad (36)$$

6.3. COMET

6.3.1. Vlastnosti přístroje

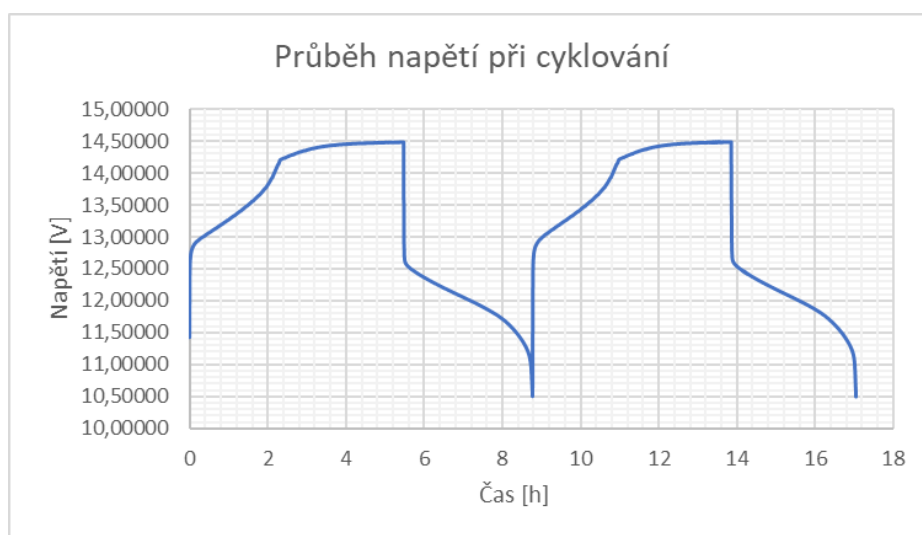
Měřicí soustava COMET v podobě kufříku slouží k měření a zaznamenávání procesu nabíjení a vybíjení baterií. Hlavní součástí je vložený datalogger COMET MS55D, díky kterému lze zaznamenávat dlouhodobě několik průběhů napětí a proudů v libovolném obvodu. Celá soustava totiž disponuje celkem 16 vstupy, které jsou rozděleny napůl, a to na nízkonapěťové (do 100 mV) a vysokonapěťové (do 75 V). [20]

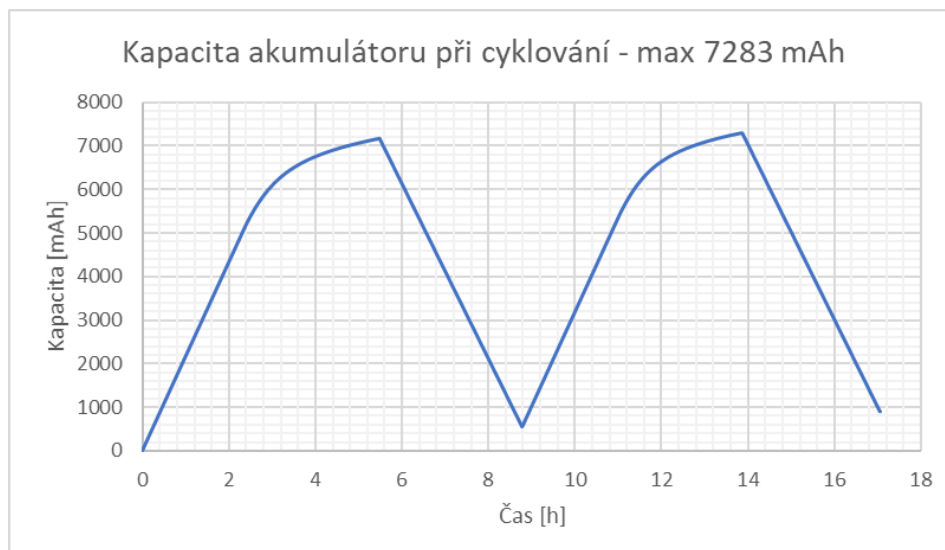
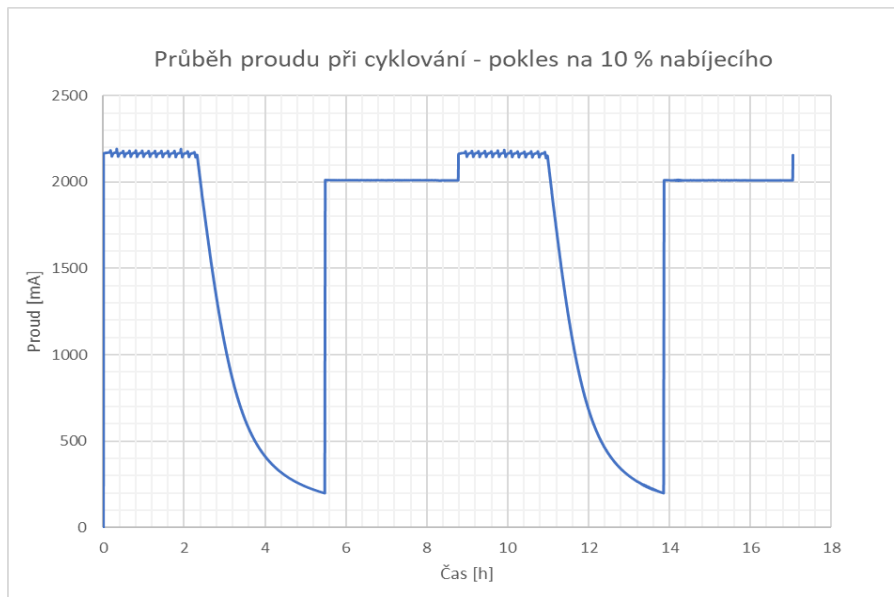
K prvním dvěma nízkonapěťovým vstupům jsou připojeny výstupy z proudových bočníků (kanál 1 – 10 A, kanál 2 – 60 A). Tyto vstupy jsou k bočníkům připojeny natrvalo a nelze k nim přivést jiný signál. [20]

K přepínání mezi nabíjecím a vybíjecím obvodem dochází pomocí relé výstupu ALARM OUT, ten však dokáže ovládat cyklování pouze jednoho akumulátoru. Pro více akumulátorů naráz by bylo třeba více relé výstupů. Pro tento případ je soustava vybavena možností připojení relé desky MP018 s 16 síťovými relé 250 V/8 A. [20]

6.3.2. Vzorové měření

Pro tento test byla využito jiného akumulátoru než u ostatních metod. Testovaným vzorkem byl olověný akumulátor Shimastu NPG 12-12 o kapacitě 12 Ah. Z naměřených hodnot vyplývá, že tento akumulátor je značně opotřebován a to se projevilo i na naměřené kapacitě.





6.3.3. Nejistoty

- Napětí bylo přivedeno na vstupní modul D4 s rozsahem 0-75 V měří s přesností 0,1 %

$$u_B = \frac{\frac{0,1}{100} \cdot 12000 + \frac{0,1}{100} \cdot 75000}{\sqrt{3}} = 50 \text{ mV} \quad (37)$$

- Zdroj:

$$u_Q = u_I \cdot t = \frac{\sqrt{\left(0,2 \cdot \frac{0,1}{100} + 0,003\right)^2 + (0,002)^2}}{\sqrt{3}} = 0,00217 \text{ A} \quad (38)$$

- Proud byl měřen přes bočník 12 A/60 mV z něhož bylo napětí vyvedeno na vstupní modul D0 s rozsahem 0-100 mV a přesností 0,1 %

k = 5 mV/A

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{0,002}{(0,005)^2} \cdot \frac{0,3}{100} \cdot 0,002\right)^2 + \left(\frac{1}{0,005} \cdot \frac{0,1}{100} \cdot 0,002 + \frac{0,1}{100} \cdot 0,1\right)^2} = 0,0118 \text{ A} \quad (39)$$

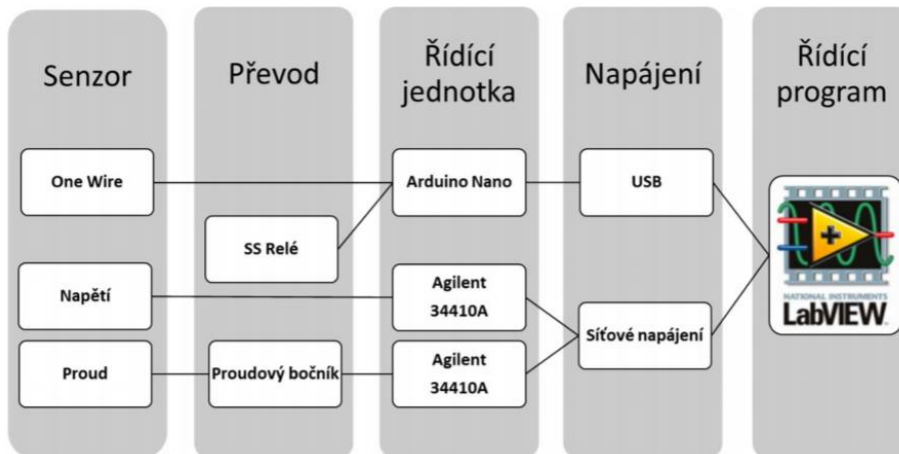
- Na ústředně COMET byl nastaven přepočít 0 mV = 0 A, 60 mV = 6,666 A
- k = 9 mV/A
- Kombinovaná nejistota:

$$u_{IC} = \sqrt{0,00217^2 + 0,0118^2} = 0,0119 \text{ A} = 11,9 \text{ mA} \quad (40)$$

$$u_Q = 11,9 \cdot 5,5 = 65,5 \text{ mAh} \quad (41)$$

6.4. S.A.M

6.4.1. Vlastnosti přístroje



Obrázek č. 17 – Diagram funkce S.A.M. [22]

Výše uvedený diagram je 2. verzí práce Bc. Michala Hrušky, který tuto sestavu vytvořil jako svou bakalářskou práci. Pro řízení celé sestavy bylo zvoleno Arduino nano, pro přepínání bylo použito tzv. „Solid state“ relé a měření zajišťují digitální multimetry Agilent 34410A. Celá sestava je ovládána programem vytvořeným v LabVIEW v rámci stejné bakalářské práce.

Parametry multimetru Agilent 34410A:

- Proudový rozsah: do 3A (s použitím proudového bočníku až 15 A)
- Napěťový rozsah: do 1000 V

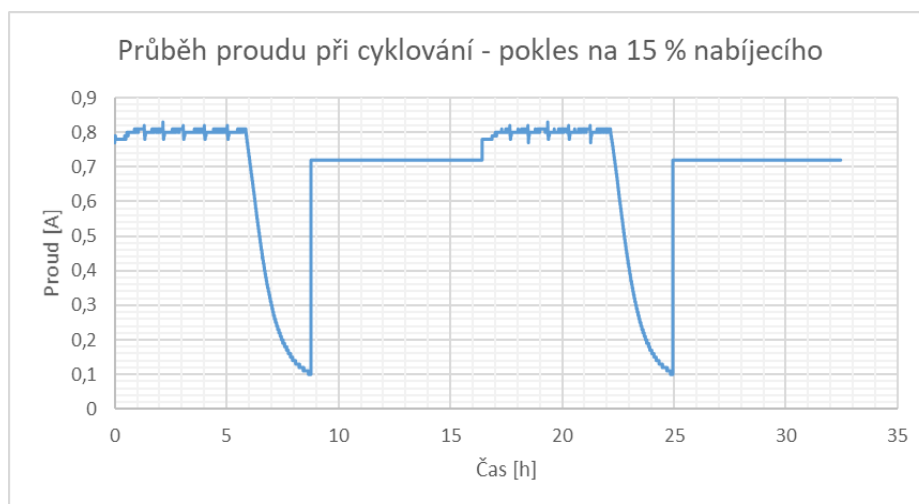
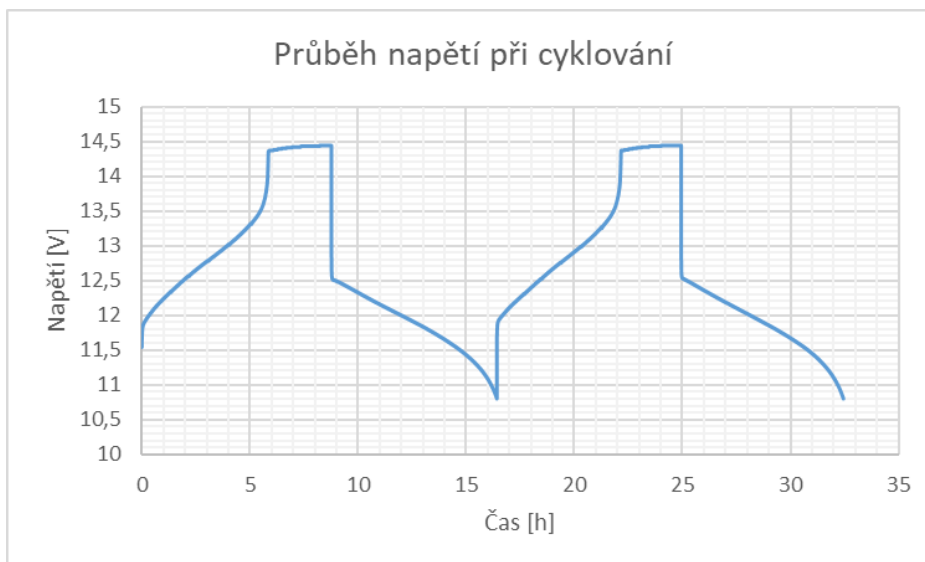
Proudový bočník Agilent 34330A:

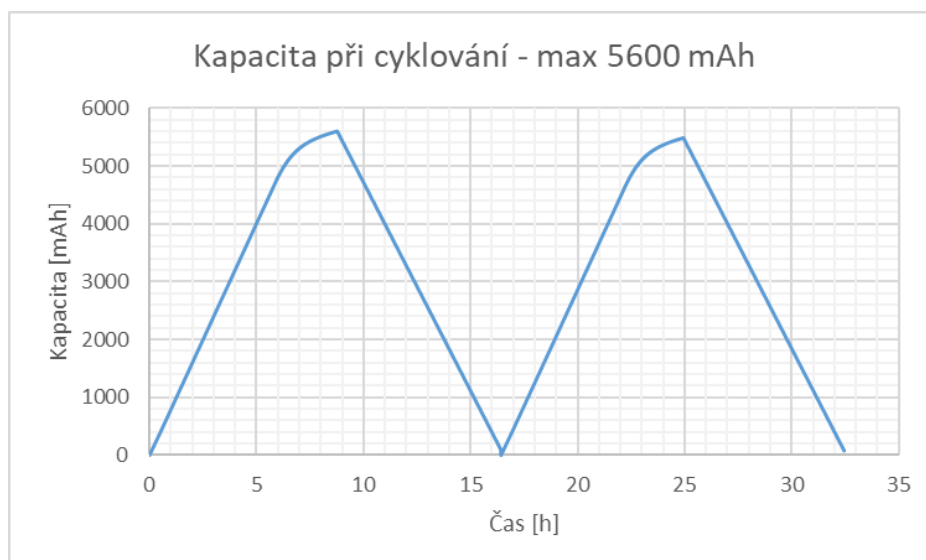
- Proudový rozsah: do 15 A

- Převodní konstanta: 1 mV/A
- Přesnost: $\pm 0,3 \%$ (do 1kHz)

6.4.2. Vzorové měření

6.4.2.1. Vzorek č. 1

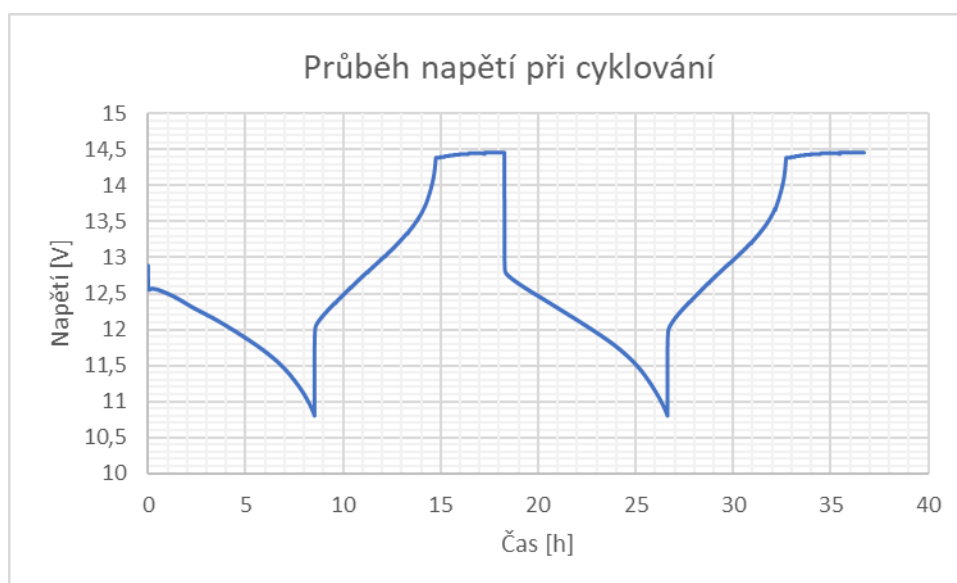


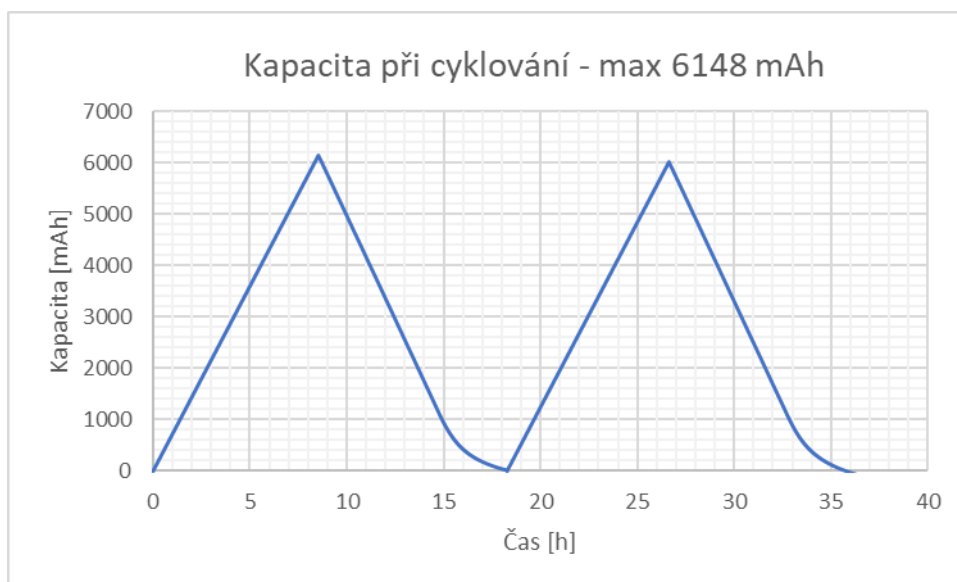
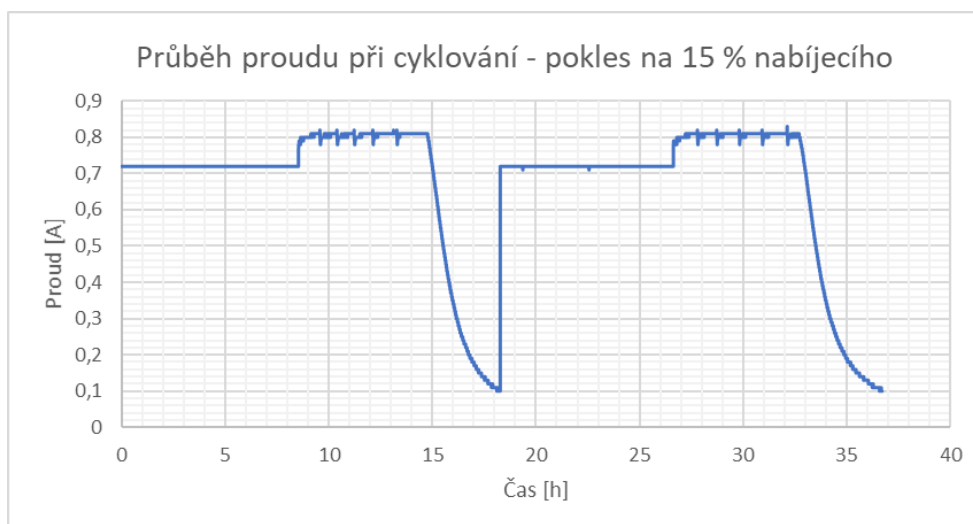


Cyklus č.	Nabíjení [mAh]	Vybíjení [mAh]	Účinnost [%]
1	5600,79	5501,94	98
2	5483,84	5402,17	99
3	5425,9	5359,47	99
4	5404,22	5331	99
5	5391,79	5305,8	98
6	5339,78	5288,24	99
7	5297,58	5218,22	99
8	5256,39	5185,96	99
9	5212,93	5141,2	99

Tabulka č. 7 – S.A.M. – Rozdíl v kapacitě po několika cyklech – test č. 1

6.4.2.2. Vzorek č. 2





Cyklus č.	Nabíjení [mAh]	Vybíjení [mAh]	Účinnost [%]
1	6129,32	6148,72	1
2	6123,42	6002,03	0,98
3	6122,9	5996,01	0,98
4	6114,1	6000,81	0,98
5	6108,11	5997	0,98
6	6083,75	6005,84	0,99
7	6032,95	5932,8	0,98

Tabulka č. 8 – S.A.M. – Rozdíl v kapacitě po několika cyklech – test č. 2

6.4.3. Nejistoty

Standardní nejistota zdroje/zátěže:

$$u_I = \frac{\sqrt{(I \cdot \frac{\delta_{11}}{100} + \delta_{12} + \delta_2)^2 + (\delta_3)^2}}{\sqrt{3}} \quad (42)$$

kde δ_{11} představuje chybu z odečtené hodnoty, δ_{12} konstantní složku chyby z odečtené hodnoty, δ_2 chybu z rozsahu a δ_3 další vlivy.

Nabíjení testované baterie proudem 0,72 A (C_{10}) po dobu 10 hodin

Zdroj:

$$u_Q = u_I \cdot t = \frac{\sqrt{\left(0,72 \cdot \frac{0,2}{100} + 0,003\right)^2 + (0,002)^2}}{\sqrt{3}} \cdot 10 = 0,0281 \text{ Ah} \quad (43)$$

Zátěž:

$$u_Q = u_I \cdot t = \frac{\sqrt{\left(0,72 \cdot \frac{0,1}{100} + 0,01\right)^2 + (0,002)^2}}{\sqrt{3}} \cdot 10 = 0,0630 \text{ Ah} \quad (44)$$

Standardní nejistota multimetru s bočníkem:

$$I = \frac{U}{k} \quad (45)$$

- U – napětí [V]
- K – převodní konstanta bočníku (1mV/A)

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{U}{k^2} \cdot u_k\right)^2 + \left(\frac{1}{k} \cdot u_v\right)^2} \quad (46)$$

- u_k – standardní nejistota proudového bočníku [V/A]
- u_U – standardní nejistota multimetru [V]

Po dosazení do předešlého vzorce:

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{U}{k^2} \cdot \frac{\delta_{11} \cdot X}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{\delta_{21} \cdot X + \frac{\delta_{22} \cdot M}{100}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (47)$$

- δ_{11} – chyba měření proudového bočníku, δ_{21} – chyba multimetru z odečtené hodnoty, δ_{22} – chyba multimetru z rozsahu, X – měřený údaj, M – rozsah

Po vyčíslení pro nabíjecí proud 0,72 A a přepočtu převodní konstanty bočníku – 0,72 mV:

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{0,00072}{(0,001)^2} \cdot \frac{0,3 \cdot 0,00072}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,001} \cdot \frac{0,0005 \cdot 0,00072 + \frac{0,0035}{100} \cdot 0,1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,00223 \text{ A} \quad (48)$$

Konečná kombinovaná nejistota je pak dána vzorcem:

$$u_{IC} = \sqrt{\frac{(I \cdot \frac{\delta_{11}}{100} + \delta_{12} + \delta_2)^2 + (\delta_3)^2 + \left(\frac{U}{k^2} \cdot \frac{\delta_{21} \cdot X}{100}\right)^2 + \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{\delta_{21} \cdot X + \frac{\delta_{22} \cdot M}{100}}{100}\right)^2}{\sqrt{3}}} \quad (49)$$

Po vyčíslení:

$$u_{IC} = \sqrt{0,00281^2 + 0,00223^2} = 0,00359 \text{ A} \quad (50)$$

$$u_Q = 0,00359 \cdot 10 = 35,9 \text{ mAh} \quad (51)$$

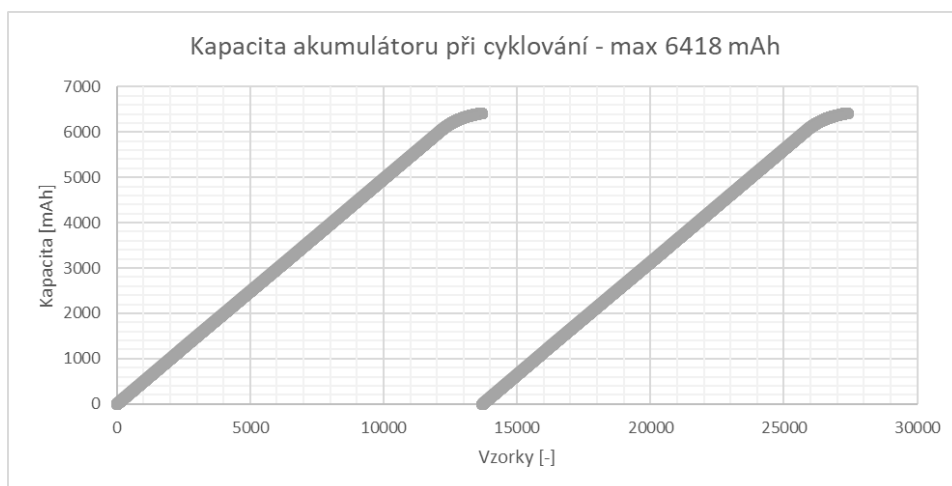
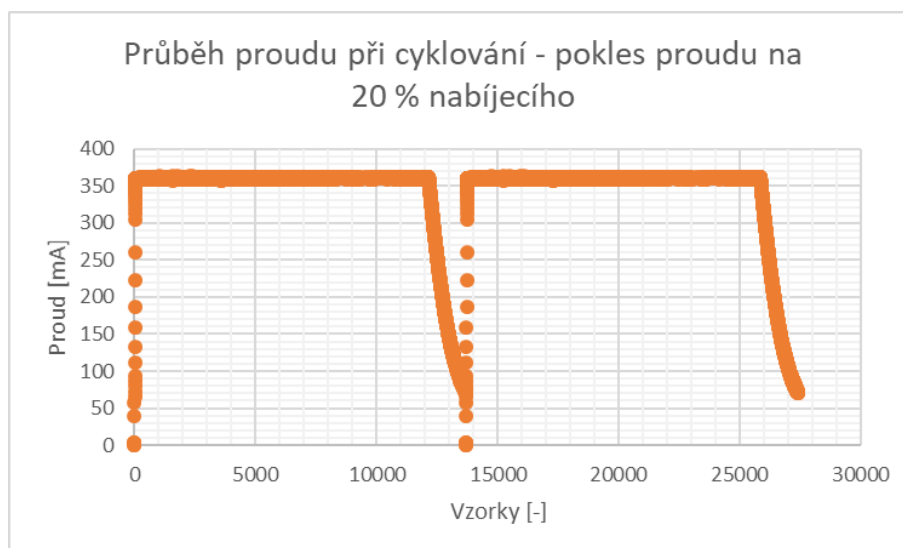
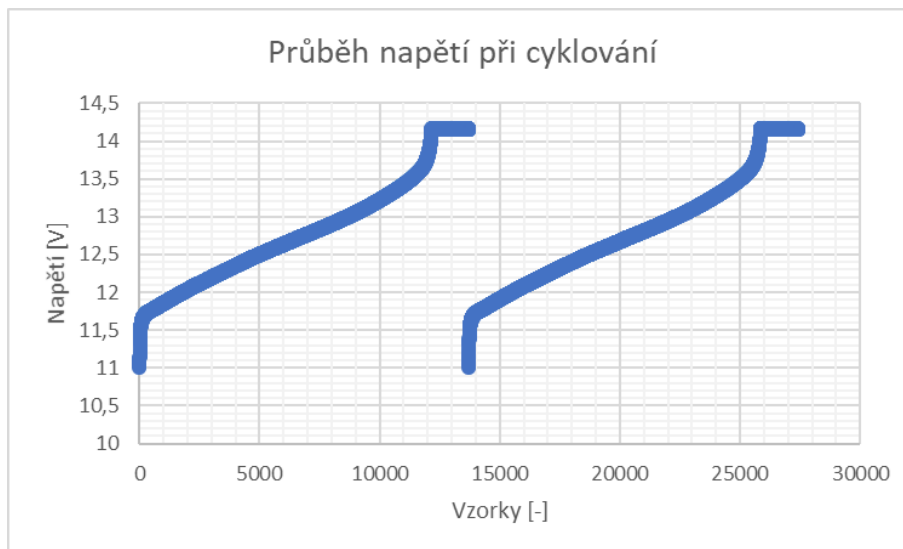
6.5. Voltcraft ALC 8500

6.5.1. Vlastnosti přístroje

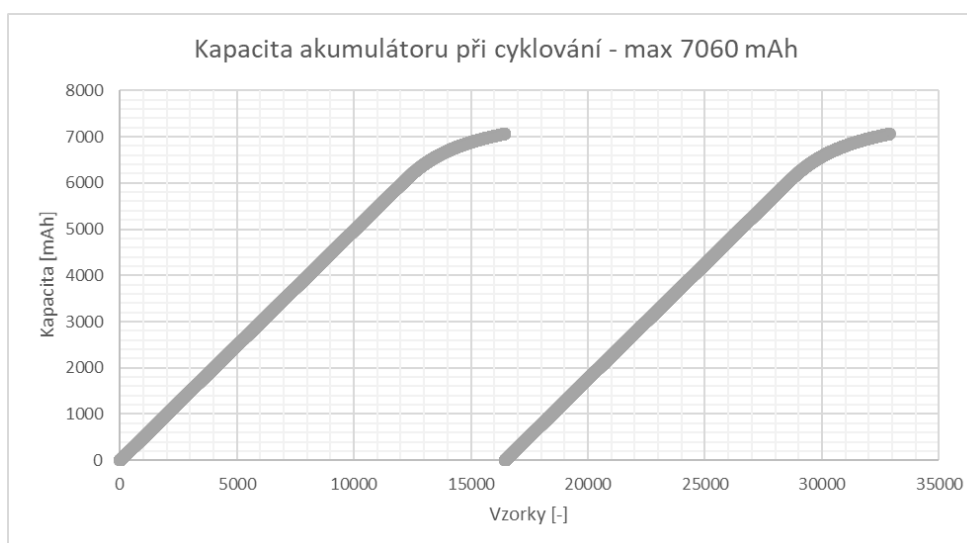
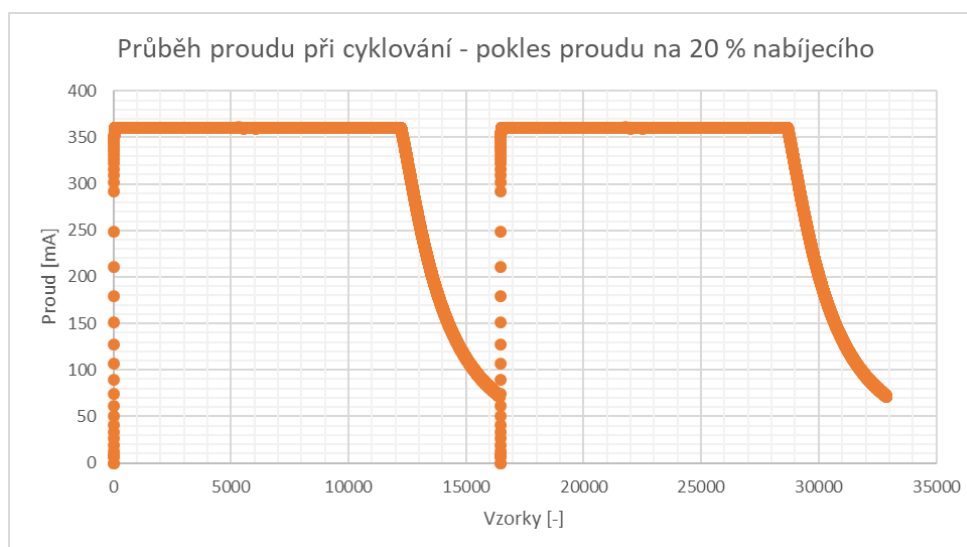
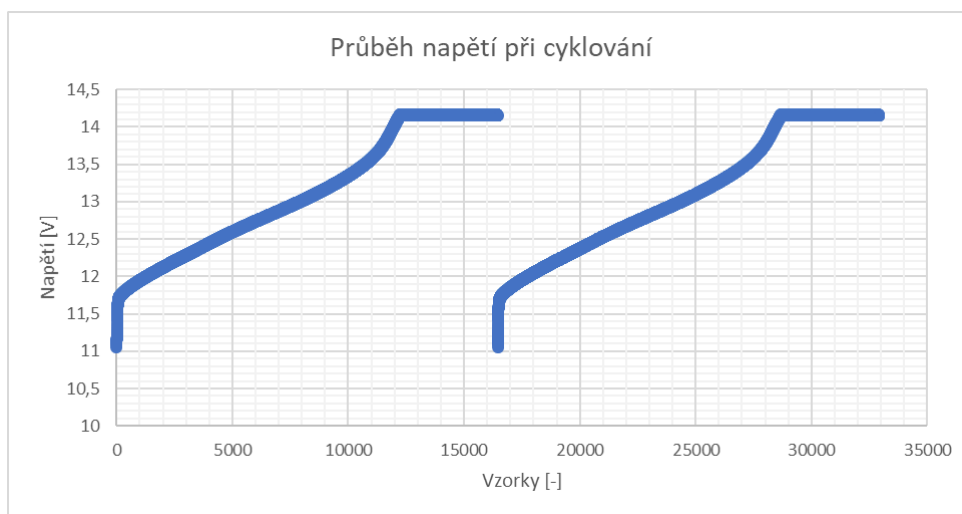
- Nabíjecí/Vybíjecí výkon: 40 VA
- Nabíjecí/Vybíjecí proud: 5000 mA
- Počet nabíjecích kanálů: 4
- Max. nabíjecí napětí 30 V na kanálech 1 a 2 (20 akumulátorů NiCd/NiMH, 12 olověných a 8 Li-Ion, Li-Pol, LiFe) a 15 V na kanálech 3 a 4 (10 akumulátorů NiCd/NiMH, 6 olověných a 4 Li-Ion, Li-Pol, LiFe)
- Provozní napětí : 230 V [24]

6.5.2. Vzorové měření

6.5.2.1. Vzorek č.1



6.5.2.2. Vzorek č.2



6.5.3. Nejistoty

Nejistota měřeného napětí - naměřená hodnota např. 12 V – měřeno na rozsahu 30 V

$$u_B = \frac{\frac{0,1}{100} \cdot 12000 + \frac{0,1}{100} \cdot 30000}{\sqrt{3}} = 24 \text{ mV} \quad (52)$$

Kombinovaná nejistota:

Předpokládám použití obdobného 12 bitového převodníku jako u AkkuMasteru C5, rozsah měření proudu je stejný – 5000 mA, nejistota tedy bude obdobná – přibližně 66,5 mA.

6.6. Porovnání výsledků

Metoda	Naměřená kapacita vzorku 1	Naměřená kapacita vzorku 2	Odchylka od nominální kapacity vz. 1	Odchylka od nominální kapacity vz. 2
AkkuMaster C5	6283 mAh	6856 mAh	12,7 %	4,8 %
Voltcraft ALC 8500	6418 mAh	7060 mAh	10,9 %	1,9 %
COMET	7283 mAh	-	39,3 %	-
S.A.M.	5600 mAh	6148	22,2 %	14,6 %

Tabulka č. 9 – Porovnání výsledků

7. Závěr

Na základě vzorových měření byl ověřen stav testovaných akumulátorů a všechny zmíněné metody se shodly v tom, který z akumulátorů disponuje vyšší kapacitou. Konečné hodnoty naměřené kapacity se však liší, což nejen ukazuje na rozdílnou přesnost a způsob měření, ale také potvrzuje i výzkum laboratoře Cadex [7], jejíž výsledky na vybraném vzorku 91 baterií, se lišily také, i když jednotlivé testy od sebe dělilo pouze pár dní a dokonce byla použita stejná metoda měření.

Největším rozdílem naměřených hodnot byl rozdíl v kapacitě přibližně 1600 mAh, což tvoří zhruba 22 % z nominální kapacity 7200 mAh. Z dostupných metod, které byly k této práci využity, se ukázala dle očekávání jako nejpřesnější metoda s multimetry a PC řízením (S.A.M.), jejíž nejistota byla menší než 0,5 % na celkové kapacitě akumulátoru. Ačkoliv skvěle zpracovaná,

vidím prozatím slabinu této metody v poměrně uživatelsky složitém rozhraní, které by jistě stálo za vylepšení. Na druhou stranu výstupy této metody jsou velice přehledné a snadné ke zpracování.

Svou přesností a použitím jsou si velice podobné metody, které používají přístrojů AkkuMaster C5 a Voltcraft ALC 8500. Nejistota měření těchto metod nepřesáhla 1 % celkové nominální kapacity. Tento údaj je však u Voltcraftu mírně zkreslený díky odhadnutému systému měření. Ačkoliv je Voltcraft zhruba dvakrát dražší, přesnost přístroje je velice obdobná jako u AkkuMasteru. Výhodou přístroje je ale připojení více akumulátorů naráz, kterou jediný přístroj AkkuMaster C5 nedisponuje.

Problém testování více akumulátorů naráz ale řeší zakoupení dalších jednotek (přístrojů AkkuMaster) a rozšíření softwaru, jehož základ vznikl v předmětu Projekt 2 a v diplomové práci byl vylepšen tak, aby bylo možné k PC připojit více AkkuMasterů a testovat tak několik akumulátorů zároveň. Ačkoliv prvotní slabina přístroje byla tedy vyřešena vlastním softwarem vytvořeným v prostředí LabVIEW, bohužel vidím jako menší nevýhodu fakt, že v průběhu měření musí PC neustále běžet, neboť celé měření a ovládání spočívá ve zmíněném softwaru a není tedy možné přístroj po nastavení od PC odpojit. Pokud tedy dojde například k výpadku proudu a PC se vypne, přístroj není sám schopen pokračovat v měření, protože nedostává příkazy pro vzdálené ovládání.

Soustavu s dataloggerem COMET sice nelze přímo srovnávat s ostatními metodami, neboť byla testována na jiném akumulátoru než ostatní, ukázala se však také poměrně přesnou. Hodnota nejistoty se pohybuje okolo 0,5 % celkové nominální kapacity testovaného akumulátoru, musíme však vzít v potaz, že testovaný akumulátor měl jinou kapacitu než u ostatních metod a test také probíhal s vyšším proudem, a tedy kratší dobu. S rostoucím časem testu by se přesnost mohla snížit, ne však nijak razantně. Testovaný akumulátor se ukázal jako velice opotřebovaný, jeho kapacita byla totiž na pouhých 60 % nominální kapacity.

Co se týká rozboru norem pro testování akumulátorů, došel jsem k závěru, že navzdory obrovskému nástupu v použití technologie lithia, normy pro tento typ poměrně zaostávají. Norem není zdaleka tolik, kolik bychom očekávali a také nepokrývají všechny aplikace. Vzhledem k velké odlišnosti mezi lithiovými a olovenými akumulátory by bylo třeba, aby přibylo norem pro některá odvětví použití akumulátorů používající lithium, neboť normy pro konvenční olovené akumulátory použít z velké části nejde právě kvůli zmíněným odlišnostem.

Při rozboru metod a systémů pro měření kapacity, které jsou stále ve fázi vývoje, a ne vždy jsou úplně přesné, nebo dostatečně rychlé, jsem zjistil, že existují některé opravdu slibné měřící metody, stále je ale třeba pracovat na jejich vývoji a zpřesnění. Měření totiž ovlivňuje nespočet

faktorů a jak bylo již zmíněno ve výzkumu laboratoře Cadex [7], i menší časové rozpětí při testování může ovlivnit výsledky v nezanedbatelné míře. To však samozřejmě vychází nejen z přesnosti metody, ale hlavně z nepředvídatelnosti chemické struktury akumulátorů.

Jak jsem sám zjistil při testování výše zmíněných metod, chemické procesy v akumulátoru, okolní prostředí, opotřebení baterie nastavení měřících přístrojů, a hlavně časové rozpětí testů může vést k naprosto odlišným výsledkům. Při opakování testu kapacity v krátkém čase po sobě, kdy akumulátor nemá dostatek času na zotavení se naměřená kapacita snižuje, u soustavy S.A.M. to po deseti cyklech bylo snížení až o více než 5 % nominální kapacity.

Ačkoliv technologie elektromobilů učinila během posledních několika let obrovský pokrok, a to hlavně díky společnosti Tesla Motors, do budoucna znamená bateriový pohon poměrně zásadní problém, co se týká infrastruktury a možnosti využití těchto vozů. I když totiž moderní elektromobily ujedou na jedno nabití stovky kilometrů, jejich dobíjení stále trvá poměrně dlouho oproti konvenčnímu tankování paliva. V případě dobíjení baterií by ale v budoucnu mohl také nastat poměrně velký problém, pokud většina populace na bateriový pohon přejde. Bude totiž nutná zásadní změna a rozšíření infrastruktury, nehledě na potřebný elektrický výkon, který bude třeba, chceme-li mluvit o rychlém nabíjení, v jednotkách, maximálně desítek minut.

Literatura

- [1] Summary Table of Lithium-based Batteries [online] [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries
- [2] Cycling Performance [online] [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_performance_as_a_function_of_cycling
- [3] How does the Lead Acid Battery Work? [online] [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries
- [4] Charging Lead Acid [online] [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery
- [5] Charging Lithium-ion [online] [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries
- [6] Tracking Battery Capacity and Resistance as part of Aging [online] [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_age_affects_capacity_and_resistance
- [7] How to Measure Capacity [online] [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_capacity
- [8] Fundamentals in Battery Testing [online] [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/difficulties_with_testing_batteries
- [9] Battery Rapid-test Methods [online] [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_rapid_test_methods
- [10] Battery Test Summary Table [online] [cit. 2017-10-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_914_battery_test_summary_table
- [11] Testing Lead Acid Batteries [online] [cit. 2017-10-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/testing_deep_cycle_lead_acid_batteries
- [12] Testing Lithium-based Batteries [online] [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/testing_lithium_based_batteries
- [13] What Causes Capacity Loss? [online] [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/capacity_loss

- [14] How do Lithium Batteries Work? [online] [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries
- [15] Tesla Roadster [online] [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/roadster>
- [16] Types of Lithium-ion [online] [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [17] CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.
- [18] Cetl, T.: Aplikace akumulátorů v nezávislé trakci – přednáška předmětu Nezávislé zdroje, Praha, ČVUT 2004
- [19] Battery diagnostics on-the-fly [online] [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_diagnostics_on_the_fly
- [20] M. Kmínek. “Testovací pracoviště pro měření baterií-realizace”. Diplomová práce. ČVUT FEL, 2012
- [21] Tesla Semi [online] [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/semi>
- [22] M. Hruška, „Měření účinnosti akumulátorových článků“. Bakalářská práce. ČVUT FEL, 2017.
- [23] Batteries in Industries [online] [cit. 2017-12-20] Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/batteries_for_medical_consumer_hobbyist
- [24] Modelářská nabíjecí stanice Voltcraft ALC-8500 Expert, 5 A [online] [cit. 2017-12-23] Dostupné z: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/200000-224999/200850-an-01-cs-Nabijeci_stanice_aku.pdf
- [25] Availability of Lithium [online] [cit. 2017-12-20] Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/availability_of_lithium
- [26] Tesla mega-battery in Australia activated [online] [cit. 2018-01-02] Dostupné z: <http://www.bbc.com/news/world-australia-42190358>
- [27] What is Equalizing Charge? [online] [cit. 2018-01-05] Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/equalizing_charge

Přílohy:

Vědecký článek - Ampérhodinové zkoušky bateriových systémů

Ampérhodinové zkoušky bateriových systémů

M. Jacko
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt

Akumulátory, ať už malé v mobilních telefonech s kapacitou stovek mAh, nebo velké staniční s kapacitou desítek MWh, potkáváme dnes na každém kroku. Neobejdeme se bez nich, a tak potřebujeme znát jejich parametry, abychom je mohli správně používat. Mezi nejzákladnější parametry akumulátorů patří nominální napětí, proud a také kapacita, ať už watthodinová nebo ampérhodinová. Tyto kapacity se měří dle určených norem, které stanovují konkrétní postup a k měření se využívá nespočetné množství metod a systémů. Tento článek je shrnutím diplomové práce zabývající se danou problematikou.

Klíčová slova: Ampérhodinová kapacita, akumulátory, baterie

Úvod

Diplomová práce, jejímž shrnutím je tento vědecký článek, si dává za cíl zmapovat a porovnat dvě nepoužívanější technologie akumulátorů – lithiové a olovené. Hlavním úkolem je porovnat metody a systémy používané pro měření ampérhodinové kapacity akumulátorů. Další otázkou jsou také státní normy pro tyto typy akumulátorů, jejichž postupy je nutné dodržovat, chceme-li dosáhnout relevantních výsledků měření, nebo v případě, že musí výrobce vydat prohlášení o shodě.

Měření ampérhodinové kapacity je demonstrováno na několika dostupných systémech, jejich výsledky porovnány a v neposlední řadě je také určena nejistota měření, které tyto metody dosahují.

Současný stav

V současné době se nejčastěji využívají akumulátory na bázi lithia, olova a niklu. Zatímco olovené akumulátory se dnes již pomalu stávají historií, stále se mohou pochlubit vysokou spolehlivostí, dobrými vlastnostmi při nízkých teplotách a nízkou cenou. Jejich měrná energie však dosahuje pouze zhruba 40 Wh/kg a tak se stávají pro většinu aplikací příliš těžkými. Na druhou stranu jsou stále hojně využívány pro staniční, případně trakční účely. Proud, který je olovená baterie schopna dodat, se pohybuje běžně okolo 0,1C, u staničních to mohou být jednotky C a v některých případech jako jsou startovací akumulátory, dokonce i vyšší, pouze ale na dobu několika sekund.

Na druhou stranu akumulátory na bázi lithia jsou jistě přítomností a prozatím pravděpodobně i budoucností tohoto odvětví. Jejich měrná kapacita je v některých případech i pětikrát vyšší než u akumulátorů olovených, a tak může být při stejné kapacitě o mnoho lehčí. Většina akumulátorů na bázi lithia předčí olovo i v životnosti, která je i více než 1000 cyklů a také v schopnosti dodávat trvale vysoké proudy okolo 1C, výjimečně pak až 10C. Lithium také disponuje o něco vyšším napětím na článek, které se pohybuje okolo 3,6 V. Díky nízké hmotnosti a vysokému napětí na článek se lithiové baterie v současné době používají jak pro elektromobily, tak se pomalu začínají dostávat i do oblasti staničních a záložních aplikací.

Metody a systémy

Metody používané pro měření kapacity se každým dnem vylepšují a zpřesňují. Mezi ty konvenční bychom mohli zařadit například metodu vybíjecí, nebo plný cyklus, které jsou však poměrně časově náročné. Proto je zde trend tzv. „Rapid-test“ metod, které se snaží odhadnout kapacitu za několik málo okamžiků. Tyto metody jsou založeny buď na měření vnitřního odporu akumulátoru, nebo jeho napětí. Pomocí těchto údajů však lze určit kapacitu jen přibližně.

Progresivnější metody pak využívají například elektrochemickou impedanční spektroskopii (EIS), která využívá injekce proudu několika frekvencí do akumulátoru, Nyquistův graf a elektrochemické modely. Další z metod, kterou je tzv. „Quick-sort Model Specific“ (QSMS), využívá měření odporu při použití stejnosměrného a střídavého proudu. V neposlední řadě je to pak metoda „Electrochemical Dynamic Response“ (EDR), která měří pohyb iontového proudu mezi elektrodami pomocí zátěžových impulzů. Doba zotavení se následně porovnává s uloženými modely a odhaduje se kapacita akumulátoru.

Mezi systémy pro měření můžeme zařadit určení kapacity měřením prošlého náboje, měřením napětí a korekcí vnitřního odporu, nebo použití mikroprocesoru.

Normy pro měření akumulátorů

Aby byl zákazník ochráněn před nekvalitním zbožím, které by mohlo způsobit újmu na zdraví a majetku, musí výrobce akumulátorů před dodáním zboží na trh otestovat akumulátory a vydat prohlášení o shodě. K tomuto účelu slouží státní normy.

Mezi nejdůležitější normy pro olovené akumulátory patří například ČSN EN 60254, ČSN EN 61982 a ČSN EN 60896. U lithia je to pak ČSN EN 62660, ČSN EN 61960, ČSN EN 50604, nebo ČSN EN 62620.

Vzorové měření

Pro vzorové měření bylo využito šesti-článekového oloveného akumulátoru s kapacitou 7,2 Ah (v případě metody COMET oloveného akumulátoru s kapacitou 12 Ah). Mezi systémy, které byly použity pro vzorové měření patří stanice H-Tronic AkkuMaster C5, Voltcraft ALC 8500, systém s dataloggerem COMET a systém s multimetry a PC řízení (S.A.M.)

Závěr

Jako nejpřesnější se dle očekávání ukázala metoda s multimetry a PC řízením, u které se nejistota pohybovala okolo 0,5 % na celkové nominální kapacitě akumulátoru. Metody používající stanice H-Tronic AkkuMaster C5 a Voltcraft ALC 8500 dopadly v testu velice podobně a nejistota nepřekročila 1 %. Metoda s dataloggerem COMET byla testována na jiném akumulátoru a za mírně odlišných podmínek, a protože test trval kratší dobu, ani zde nejistota nepřekročila 0,5 %. Pokud by test trval déle (stejně jako u ostatních metod), nejistota by pravděpodobně také byla okolo 1 %.

Pokud bychom vzorové měření porovnali s výzkumem laboratoře Cadex [2], docházíme ke stejnému závěru. I za použití stejné metody měření a s minimálním časovým rozdílem mezi oběma testy, se naměřená kapacita akumulátoru liší. To je pravděpodobně způsobeno nepředvídatelnými chemickými a fyzikálními procesy uvnitř akumulátoru.

Literatura

[1] M. Jacko. “Bateriové systémy – ampérhodinové zkoušky”. Diplomová práce. ČVUT FEL, 2018

[2] How to Measure Capacity [online] [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_capacity