



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SLEDOVÁNÍ VLIVU TEPLoty NA NABÍJECÍ A VYBÍJECÍ CHARAKTERISTIKY LITHIUM-IONTOVÝCH BATERIÍ

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE CHARGING AND DISCHARGING CHARACTERISTICS OF
LITHIUM-ION BATTERIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Eva Doleželová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Libich, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Studentka: Bc. Eva Doleželová

ID: 177313

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Sledování vlivu teploty na nabíjecí a vybíjecí charakteristiky lithium-iontových baterií

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku lithium-iontových baterií. Věnujte pozornost zejména komerčním lithium-iontovým bateriím a elektrodovým materiálům. Prostudujte základní operační principy, charakteristiky a vývojové směry v oblasti lithium-iontových baterií.

Proměřte parametry vybraných typů komerčních lithium-iontových baterií za běžných podmínek. Měření opakujte za zvýšené teploty a pozorujte vliv teploty na vybrané charakteristiky lithium-iontových baterií. Získané výsledky porovnejte a analyzujte. Zhodnoťte vliv zvýšené teploty na vybrané charakteristiky lithium-iontových baterií jak z krátkodobého, tak z dlouhodobého hlediska.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jiří Libich, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je seznámit se s problematikou lithium-iontových baterií (Li-ion). Dále se věnuje zejména vybraným komerčním lithium-iontovým bateriím. Součástí diplomové práce bylo také prostudovat základní operační principy, používané materiály, charakteristiky a vývojové směry v oblasti lithium-iontových baterií. V praktické části diplomové práce proběhlo měření klíčových parametrů vybraných typů komerčně dostupných lithium-iontových baterií za běžných teplotních podmínek. Měření bylo opakováno za zvýšené teploty, úkolem bylo pozorovat vliv teploty na vybrané charakteristiky lithium-iontových baterií. Práce obsahuje zhodnocení vlivu zvýšené teploty na vybrané charakteristiky lithium-iontových baterií jak z krátkodobého, tak z dlouhodobého hlediska.

Klíčová slova

Li-Ion baterie, Degradací vlivy, Cyklování, Normální teplota, Zvýšená teplota, Proudová zátěž, Impedanční spektroskopie

Abstract

This thesis deals with operation principles of lithium-ion batteries, its degradation principles, capacity fade, materials used, formats, main characteristics, development, uses and mid to high temperature behaviour. The thesis aims to study aging characteristics of commercially available lithium-ion batteries. In the practical part of the thesis, the key parameters of selected types of commercially available lithium-ion batteries were measured under normal temperature conditions. The measurement was repeated at an elevated temperature. Results were analysed and effects of different temperatures on the selected characteristics were concluded both verbally and graphically. A conclusion evaluates short-term and long-term impacts of ambient temperature on rate capability, ageing, capacity fade and longevity.

Keywords

Li-Ion batteries, Battery Degradation, Normal temperature, High temperature, Discharge Rate Capability Testing, Electrochemical impedance spectroscopy, Charge and Discharge cycling

Bibliografická citace

DOLEŽELOVÁ, Eva. *Sledování vlivu teploty na nabíjecí a vybíjecí charakteristiky lithium-iontových baterií* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142328>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Libich.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Bc. Eva Doleželová
VUT ID studenta: 177313
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Sledování vlivu teploty na nabíjecí a vybíjecí charakteristiky lithium-iontových baterií

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25.května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jirímu Libichovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Martinu Šedinovi za pomoc během měření diplomové práce a také bych chtěla poděkovat panu Ing. Petru Procházkovi, Ph.D. a týmu z výkonové elektroniky za možnost naměření zátěžových testů. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat panu Aleši Ondrovčíkovi a firmě Aku Energy s.r.o. za poskytnutí technického zázemí a za poskytnuté vzorky. A také bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu, kterou mi poskytli během studia a za důvěru, kterou ve mně vložili. A také bych chtěla poděkovat své mamince, bez které bych diplomovou práci nedokončila a která ve mně nikdy nepřestala věřit.

V Brně dne: 25.května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	13
SEZNAM GRAFŮ	14
SEZNAM TABULEK	16
ÚVOD	17
1. HISTORIE ELEKTROCHEMICKÝCH ZDROJŮ	18
1.1 OBECNÝ POPIS ELEKTROCHEMICKÝCH ZDROJŮ	18
1.2 PRIMÁRNÍ BATERIE	19
1.3 SEKUNDÁRNÍ BATERIE	20
2. SEKUNDÁRNÍ ELEKTROCHEMICKÉ ZDROJE	21
2.1 POROVNÁNÍ SEKUNDÁRNÍCH ELEKTROCHEMICKÝCH BATERÍ.....	21
2.2 POUŽÍVANÉ SEKUNDÁRNÍ BATERIE A JEJICH TECHNOLOGIE	22
2.2.1 Olověné baterie.....	22
2.2.2 Ni-Cd baterie	22
2.2.3 Ni-MH baterie.....	23
2.2.4 Li-Ion baterie.....	23
2.3 BUDOUCÍ VÝVOJ BATERÍ	24
2.3.1 Baterie lithium-síra.....	24
2.3.2 Baterie na bázi kov-vzduch.....	24
3. LI-ION BATERIE	25
3.1 HISTORIE LI-ION BATERÍ.....	25
3.1.1 Varianty Li-Ion baterí.....	25
3.1.2 Parametry různých typů lithium iontových baterí	30
3.2 PRINCIP FUNKCE LI-ION BATERÍ	31
3.3 MECHANICKÉ PŘEVODNÍ LI-ION BATERÍ.....	31
3.3.1 Zapouzdření Li-Ion baterí.....	31
3.3.2 Válcové baterie	32
3.3.3 Prismatické baterie	33
3.3.4 Knoflíkové baterie.....	33
3.3.5 Sáčkové baterie – Pouch cell.....	34
3.4 KOMPONENTY A KONSTRUKCE LI-ION BATERÍ.....	35
3.4.1 Kladná elektroda – katoda	36
3.4.2 Záporná elektroda – anoda	37
3.4.3 Separátory	38
3.4.4 Elektrolyty	38
3.4.5 Rozpouštědla.....	40
3.5 VÝHODY A NEVÝHODY LI-ION BATERÍ	42
3.6 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI LI-ION BATERÍ.....	42
3.6.1 Charakteristické průběhy Li-Ion baterí	43
3.6.2 Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)	44

3.7	DEGRADAČNÍ VLIVY LI-ION BATERÍ	45
3.7.1	<i>Tvorba pasivační vrstvy anody – SEI</i>	45
3.7.2	<i>Ztráta množství aktivních lithiových iontů</i>	46
3.7.3	<i>Ztráta aktivního materiálu elektrod</i>	46
3.7.4	<i>Ztráta elektrolytu a nárůst odporu</i>	46
3.7.5	<i>Degradační vlivy v závislosti na teplotě</i>	46
3.7.6	<i>Vliv vysokých teplot na degradaci a bezpečnost</i>	47
3.7.7	<i>Degradační vlivy za zvýšených teplot</i>	47
3.7.8	<i>Další faktory ovlivňující degradační vlivy</i>	48
3.8	PÉČE O LI-ION BATERIE.....	48
3.9	POUŽITÍ A APLIKACE LI-ION BATERÍ	49
3.9.1	<i>Použití v přenosných zařízeních</i>	49
3.9.2	<i>Použití v mobilních aplikacích</i>	49
3.9.3	<i>Trakční aplikace a elektromobily</i>	49
3.9.4	<i>Prostředky osobní mobility</i>	50
3.9.5	<i>Použití ve stacionárních aplikacích</i>	50
3.9.6	<i>Nepřerušitelné zdroje napájení – UPS</i>	50
3.9.7	<i>Uložiště energie</i>	50
3.10	OCHRANNÉ A BEZPEČNOSTNÍ PRVKY LI-ION BATERÍ.....	51
3.10.1	<i>BMS systém</i>	51
3.10.2	<i>Konstrukční bezpečnostní prvky Li-ion baterií</i>	51
3.11	VÝVOJOVÉ SMĚRY V OBLASTI LI-ION BATERÍ.....	51
4.	PRAKTICKÁ ČÁST	53
4.1	NÁVRH ŘEŠENÍ.....	53
4.2	POSTUP ŘEŠENÍ	53
4.3	PROCEDURA GCPL.....	55
4.4	VÝPOČET KAPACITY PRO JEDNOTLIVÉ BATERIE POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ.....	56
5.	POPIS POUŽITÝCH KOMPONENT V PRAKTICKÉ ČÁSTI	57
5.1	GOOWEI.....	58
5.2	LG MH1.....	60
5.3	LFP.....	63
5.4	LTO.....	65
5.5	BioLOGIC BCS-815	68
5.6	TEPLOTNÍ KOMORA	69
6.	PRVNÍ SADA BATERÍ – MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK A ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT	70
	PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK	70
6.1	GOOWEI 18650	71
6.2	LG MH1.....	73
6.3	LiFePO ₄ – LFP-26650-3300	75
6.4	LTO 1865-13	77
6.5	TABULKOVÉ ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK	79
	PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT	80
6.6	GOOWEI 18650	81

6.7	LG MH1	83
6.8	LiFePO ₄ – LFP-26650-3300	85
6.9	LTO 1865-13	87
6.10	TABULKOVÉ ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT	89
6.1	RATE CAPABILITY TEST – PROUDOVÁ ZÁTĚŽ NORMÁLNÍ TEPLOTNÍ PODMÍNKY A ZVÝŠENÁ TEPLOTA – PRVNÍ SADA	91
6.1.1	<i>Goowei normální teplotní podmínky a zvýšené teploty - První sada</i>	91
6.1.2	<i>LG MH1 normální teplotní podmínky a zvýšené teploty - První sada</i>	92
6.1.3	<i>LFP normální teplotní podmínky a zvýšené teploty - První sada</i>	94
6.1.4	<i>LTO normální teplotní podmínky a zvýšené teploty - První sada</i>	95
ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ – PRVNÍ SADA BATERÍ		97
7. DRUHÁ SADA BATERÍ – MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK A ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT		99
PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOT		99
7.1	GOOWEI 18650	100
7.2	LG MH1	102
7.3	LiFePO ₄ – LFP-26650-3300	104
7.4	LTO 1865-13	106
7.5	TABULKOVÉ ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK	108
PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT		109
7.6	GOOWEI 18650	110
7.7	LG MH1	112
7.8	LiFePO ₄ - LFP-26650-3300	114
7.9	LTO 1865-13	116
7.10	TABULKOVÉ ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK	118
7.1	RATE CAPABILITY TEST – PROUDOVÁ ZÁTĚŽ – NORMÁLNÍ TEPLOTNÍ PODMÍNKY A ZVÝŠENÁ TEPLOTA -DRUHÁ SADA	120
7.1.1	<i>Goowei normální teplotní podmínky a zvýšená teplota – druhá sada</i>	120
7.1.2	<i>LG MH1 normální teplotní podmínky a zvýšená teplota – druhá sada</i>	121
7.1.3	<i>LFP normální teplotní podmínky a zvýšená teplota - druhá sada</i>	123
7.1.4	<i>LTO normální teplotní podmínky a zvýšená teplota – druhá sada</i>	124
7.2	ZÁVISLOST KAPACITY NA PROVEDENÉM CYKLU – PRVNÍ A DRUHÁ SADA BATERÍ	126
7.3	ZÁVISLOST KAPACITY NA PROVEDENÉM CYKLU DLE TYPU BATERIE	127
ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ – DRUHÁ SADA BATERÍ		129
8. ČLÁNEK LG MH1 – IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE – ZVÝŠENÉ TEPLoty LG MH1 131		
8.1	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ – LG MH1 – EIS	134
9. EKONOMICKÉ ASPEKTY – ZHODNOCENÍ Z KRÁTKODOBÉHO A DLOUHODOBÉHO HLEDISKA		135
9.1	POROVNÁNÍ CENY ZA DODANOU ENERGII ZA STANOVENÝCH PODMÍNEK VÝŠE A ZHODNOCENÍ ..	136
10. ZÁVĚR		137
LITERATURA		138

SEZNAM PŘÍLOH..... 144

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

Li-Ion – Lithno-Iontové baterie
Ni-MH – Nikl-metalhydridové baterie
Ni-Cd – Nikl-Kadmiové baterie
MnO₂/Zn – Oxid mangančitý / zinek
NH₄Cl – Chlorid amonný
ZnCl₂ – Chlorid zinečnatý
Ag₂O/Zn – Oxid stříbrný / zinek
O₂/Zn – Kyslík / zinek
NiOOH/Zn – Hydroperoxid nikelnatý
Na-Ion – Sodný iont
LiWO₂ – Lithium wolfram oxid
Li₆Fe₂O₃ – Oxid lithnato železnatý
Li₉MoSe₆ – Selenan Lithnomolybdenitý
Li⁺ - Kladný lithiový ion
Ti – Titan
Wo – Wolfram
Nb – Niob
Vn – Vanad
Mo – Molybden
LiCoO₂ – Oxid lithno-kolbatitý
Li_xMn₂O₄ – Oxid lithno-manganitý
LiNiO₂ – Oxid lithno-nikelnatý
LiV₂O₅ – Oxid lithno-vanaditý
LiPF₆ – Lithium hexafluorofosfát
Li-Pol – Lithium-polymerové baterie
LiFe – Baterie lithium-železo-fosfát
LTO – Baterie lithium-titan-oxid
UPS – Nepřerušitelný zdroj napájení
PbO₂ – Oxid olovičitý
LiCoO₂ – Oxid lithno-kobaltitý
LiFePO₄ – Fosforečnan lithno-železnatý
LiMn₂O₄ – Oxid lithno-manganitý
Li₂S – Síran lithnatý
CID – Automatický přerušovač nabíjení
LiFeYPO₄ – Fosforečnan lithno-železnatý
Li₄Ti₅O₁₂ – Oxid lithno-titanitý
H₂SO₄ – Kyselina sírová

KOH – Hydroxid draselný
Li – Lithium
Na – Sodík
K – Draslík
Rb – Rubidium
Cs – Cesium
Ag – Stříbro
PET – Polyethylentereftalát
SEI – Pasivační vrstva na rozhraní anody
Li-HV – Lithiové baterie pro vysoké napětí
BMS – Systém managementu baterie
ESS – Uložiště elektrické energie
OZE – Obnovitelné zdroje elektrické energie
EIS – Elektrochemická impedanční spektroskopie
LAN – Lokální síť
ZT – Zvýšená teplota
NT – Normální teploty
1S – První sada baterií
2S – Druhá sada baterií
LFP – Lithium-železo-fosfát
NP – Normální podmínky
GCPL – Galvanické cyklování s napěťovou limitací
*.mps – Soubor nastavení BCS-815
Is – Proud baterií
Im – Ukončovací proud
Em – Napěťový limit
tM – Doba potenciostatického režimu
Wi-Fi – Bezdrátová komunikační technologie
BLE – Nízkopříkonová technologie bezdrátové komunikace
PTC – Kladný teplotní součinitel odporu
CID – Zařízení pro přerušení proudu
NCR (LiNiCoAlO₂) – Materiál na bázi lithium-nikl-kobalt-hliník
INR (LiNiMnCoO₂) – Materiál na bázi lithium-nikl-mangan-kobalt
LFP (LiFePO₄) – Materiál lithium-železo-fosfát
LTO (Li₄Ti₅O₁₂) – Materiál lithium-titan-oxid
LIR2032 – Označení nabíjecí knoflíkové baterie
CP1254 – Označení nabíjecí knoflíkové baterie VARTA
CR2032 – Označení nenabíjecí knoflíkové baterie
LiTFSI – Lithium-bis(trifluormetansulfonyl)imid
LCO – Materiál lithium-kobalt-oxid

NMC – Materiál nikl-mangan-kobalt-oxid
 NCA – Materiál nikl-kobalt-hliník-oxid
 LMO – Materiál lithium-mangan-oxid
 PP – Polypropylen
 PE – Polyethylen
 PC – Propylen karbonát
 EC – Ethylen karbonát
 DMC – Dimethyl karbonát
 DEC – Diethyl Karbonát
 EMC – Ethylmethyl karbonát
 LiNiCoO₂ – Katodový materiál na bázi lithia-niklu-kobaltu
 Li/Li⁺ - Elektrochemický potenciál atomu a iontu lithia
 EC/DMC – Směs ethylen karbonát/dimethyl karbonát
 PAN – Polyakrylonitril
 PMMA – Poly-methylmetakrylát
 PVDF – Poly(vinylidenfluorid)
 LiF – Fluorid lithný
 LiCl – Chlorid lithný
 LiBF₄ - Lithium tetrafluorborát
 LiFSI – Lithium-bis-(fluorsulfonyl)imid
 LiAsF₆ – Hexa fluorarseničnan lithný
 LiClO₄ – Chloristan lithný
 MgAl₂O₄ – Materiál se spinelovou strukturou
 Li₂Mn₂O₄ – Materiál na bázi lithia-manganu-oxidu
 MnO₂ – Oxid manganičitý
 LiMn_{1/3}Ni_{1/3}Co_{1/3}O₂ – katodový materiál

Symboly:

U	napětí	[V]
I	proud	[A]
C, Q	kapacita	[Ah]
E	energie	[Wh]
m	váha	[kg]/ [g]
V	objem	[dm ³]
$E_{density,kg}$	měrná energie vzhledem ke hmotnosti	[Wh/kg]
$E_{density,dm^3}$	měrná energie vzhledem k objemu	[Wh/dm ³]
$E_{density,l}$	měrná energie vzhledem k objemu	[Wh/l]
$P_{density}$	měrný výkon	[W/kg]
I_{IC}	jmenovitý proud	[CA]
t_{ch}	doba nabíjení	[h]

U_{nom}	nominální napětí	[V]
I_{kon}	ukončovací proud	[A]
DoD	hloubka vybíjení	[%]
T	teplota	[°C]
C_{nom}	nominální kapacita	[Ah]
$E_{density,kg}$	gravimetrická hustota energie	[Wh/kg]
$E_{density,l}$	objemová hustota energie	[Wh/l]
R_i	vnitřní odpor DC	[Ω]
U_{max}	nabíjecí napětí	[V]
U_{min}	vybíjecí napětí	[V]
I_{vyb}	vybíjecí proud	[A]
I_{nab}	nabíjecí proud	[A]
$Cena$	cena	[Kč]
P	příkon	[W]
$Fanspeed$	rychlost ventilátoru	[%]
t	čas	[h]
T/min	tempo	[°/minuta]
avg	průměr	[mm]
$U_{měř}$	rozsah napětí	[V]
U_{res}	rozlišení napětí	[uV]
$I_{měř}$	rozsah proudu	[mA], [A]
I_{res}	rozlišení proudu	[uA]
t_{res}	časové rozlišení	[ms]
$I_{bankmax}$	proud při paralelizaci osmi kanálů	[A]
Z^*	impedance Z^*	[Ω]
Z	impedance Z	[Ω]
C_{min}	minimální kapacita	[Ah]
E_{nom}	nominální energie	[Wh]
$I_{nab,max}$	maximální nabíjecí proud	[A]
$I_{vyb,max}$	maximální vybíjecí proud	[A]
d, l	rozměry	[mm]
$T_{nab,max}$	dovolená provozní teplota při nabíjení	[°C]
$T_{vyb,max}$	dovolená provozní teplota při vybíjení	[°C]
$C_{density,kg}$	měrná kapacita	[Ah/kg]
$C_{density,l}$	měrná kapacita	[Ah/dm ³]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Porovnání primárních a sekundárních baterií v závislosti na měrné hmotnostní kapacitě [4]..	20
Obrázek 2 Struktura válcové baterie [38]	28
Obrázek 3 Válcový typ baterie 18650 [8]	32
Obrázek 4 Prismatický typ baterie [40]	33
Obrázek 5 Knoflíkový typ baterie [19]	34
Obrázek 6 Sáčkový typ baterie [8].....	35
Obrázek 7 Interkalace iontů lithia v Li-Ion baterii [9].....	35
Obrázek 8 Průběh proudu a napětí [17]	43
Obrázek 9 Vybíjecí křivka Li-Ion baterie [17].....	44
Obrázek 10 Baterie Goowei 18650 [24]	58
Obrázek 11 Baterie LG MH1 [25].....	61
Obrázek 12 Baterie LFP-26650-3300 [27].....	63
Obrázek 13 Baterie LTO 1865-13 [31].....	66
Obrázek 14 Měřicí zařízení BioLogic BCS-815 [28]	68
Obrázek 15 Teplotní komora Venticell 22 ECO	69
Obrázek 16 EIS LG MH1 před měřením, po RC a po 200 cyklech	131
Obrázek 17 EIS LG MH1 po 200 cyklech	132
Obrázek 18 EIS LG MH1 před měřením (nová baterie).....	133

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu Goowei NT 1S	71
Graf 2 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus Goowei NT 1S	71
Graf 3 Závislost nábojové efektivity baterie Goowei na provedeném cyklu - 1. sada NT	72
Graf 4 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LG MH1 NT 1S	73
Graf 5 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LG MH1 NT 1S	73
Graf 6 Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 1. sada NT	74
Graf 7 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LFP NT 1S	75
Graf 8 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LFP NT 1S	75
Graf 9 Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 1. sada NT	76
Graf 10 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LTO NT 1S	77
Graf 11 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LTO NT 1S	77
Graf 12 Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada NT	78
Graf 13 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu Goowei ZT 1S	81
Graf 14 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus Goowei ZT 1S	81
Graf 15 Závislost nábojové efektivity baterie Goowei na provedeném cyklu - 1. sada ZT	82
Graf 16 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LG MH1 ZT 1S	83
Graf 17 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LG MH1 ZT 1S	83
Graf 18 Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 1. sada ZT	84
Graf 19 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LFP ZT 1S	85
Graf 20 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LFP ZT 1S	85
Graf 21 Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 1. sada ZT	86
Graf 22 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LTO ZT 1S	87
Graf 23 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LTO ZT 1S	87
Graf 24 Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada ZT	88
Graf 25 Závislost nábojové efektivity na provedeném cyklu 1S	90
Graf 26 Závislost napětí na vybíjecím proudu Goowei NT ZT 1S	91
Graf 27 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie Goowei na provedeném cyklu - 1. sada NT	91
Graf 28 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie Goowei na provedeném cyklu - 1. sada ZT	92
Graf 29 Závislost napětí na vybíjecím proudu LG MH1 NT ZT 1S	92
Graf 30 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 1. sada NT ..	93
Graf 31 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 1. sada ZT ..	93
Graf 32 Závislost napětí na vybíjecím proudu LFP NT ZT 1S	94
Graf 33 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LFP na provedeném cyklu - 1. sada NT	94
Graf 34 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LFP na provedeném cyklu - 1. sada ZT	95
Graf 35 Závislost napětí na vybíjecím proudu LTO NT ZT 1S	95
Graf 36 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada NT	96
Graf 37 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada ZT	96
Graf 38 Závislost kapacity a teploty Goowei NT 2S	100
Graf 39 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus Goowei NT 2S	100
Graf 40 Závislost nábojové efektivity baterie Goowei na provedeném cyklu - 2. sada NT	101
Graf 41 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LG MH1 NT 2S	102
Graf 42 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LG MH1 NT 2S	102
Graf 43 Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 2. sada NT	103
Graf 44 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LFP NT 2S	104
Graf 45 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LFP NT 2S	104
Graf 46 Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 2. sada NT	105

Graf 47	Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LTO NT 2S.....	106
Graf 48	Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LTO NT 2S.....	106
Graf 49	Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 2. sada NT.....	107
Graf 50	Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu Goowei ZT 2S.....	110
Graf 51	Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus Goowei ZT 2S.....	110
Graf 52	Závislost nábojové efektivity baterie Goowei na provedeném cyklu - 2. sada ZT.....	111
Graf 53	Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LG MH1 ZT 2S.....	112
Graf 54	Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LG MH1 ZT 2S.....	112
Graf 55	Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 2. sada ZT.....	113
Graf 56	Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LFP ZT 2S.....	114
Graf 57	Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LFP ZT 2S.....	114
Graf 58	Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 2. sada ZT.....	115
Graf 59	Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LTO ZT 2S.....	116
Graf 60	Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LTO ZT 2S.....	116
Graf 61	Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 2. sada ZT.....	117
Graf 62	Závislost nábojové efektivity na provedeném cyklu 2S.....	119
Graf 63	Závislost napětí na vybíjecím proudu Goowei NT ZT 2S.....	120
Graf 64	Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie Goowei na provedeném cyklu - 2. sada NT...	120
Graf 65	Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie Goowei na provedeném cyklu - 2. sada ZT...	121
Graf 66	Závislost napětí na vybíjecím proudu LG MH1 NT ZT 2S.....	121
Graf 67	Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 2. sada NT	122
Graf 68	Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 2. sada ZT.	122
Graf 69	Závislost napětí na vybíjecím proudu LFP NT ZT 2S.....	123
Graf 70	Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LFP na provedeném cyklu - 2. sada NT.....	123
Graf 71	Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LFP na provedeném cyklu - 2. sada ZT.....	124
Graf 72	Závislost napětí na vybíjecím proudu LTO NT ZT 2S.....	124
Graf 73	Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LTO na provedeném cyklu - 2. sada NT.....	125
Graf 74	Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LTO na provedeném cyklu - 2. sada ZT.....	125
Graf 75	Závislost kapacity na provedeném cyklu – všechny baterie NT ZT 1S 2S.....	126
Graf 76	Závislost kapacity na provedeném cyklu Goowei NT ZT 1S 2S.....	127
Graf 77	Závislost kapacity na provedeném cyklu LG MH1 NT ZT 1S 2S.....	127
Graf 78	Závislost kapacity na provedeném cyklu LFP NT ZT 1S 2S.....	128
Graf 79	Závislost kapacity na provedeném cyklu LTO NT ZT 1S 2S.....	128
Graf 80	Předpokládaná cena za dodanou energii dle baterie.....	136

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání sekundárních elektrochemických baterií [30]	21
Tabulka 2 Parametry různých typů Li-Ion baterií [25], [27], [31], [39]	30
Tabulka 3 Nastavení parametrů Goowei a LG MH1 - 200 cyklů NT+ZT.....	53
Tabulka 4 Nastavení parametrů LFP - 200 cyklů NT+ZT	54
Tabulka 5 Nastavení parametrů LTO - 200 cyklů NT+ZT	54
Tabulka 6 Nastavení parametrů Goowei a LG MH1 - 5 cyklů NT+ZT	54
Tabulka 7 Nastavení parametrů LFP - 5 cyklů NT+ZT	55
Tabulka 8 Nastavení parametrů LTO - 5 cyklů NT+ZT	55
Tabulka 9 Testovací režimy	57
Tabulka 10 Základní parametry baterie Goowei 18650 [25]	58
Tabulka 11 Závislost kapacity na teplotě [25].....	59
Tabulka 12 Testy bezpečnosti baterie Goowei 18650 [25].....	59
Tabulka 13 Základní parametry baterie LG MH1 [25].....	60
Tabulka 14 Závislost kapacity na teplotě [25].....	61
Tabulka 15 Testy bezpečnosti baterie LG MH1 [25]	62
Tabulka 16 Základní parametry baterie LFP-26650-3300 [26].....	63
Tabulka 17 Testy bezpečnosti baterie LFP [26].....	64
Tabulka 18 Základní parametry baterie LTO 1865-13 [31].....	65
Tabulka 19 Závislost kapacity na teplotě [31].....	66
Tabulka 20 Testy bezpečnosti baterie LTO 1865-13 [31]	67
Tabulka 21 Parametry měřicího zařízení BioLogic BCS-815 [28]	68
Tabulka 22 Parametry teplotní komory Venticell 22 ECO [29].....	69
Tabulka 23 Pokles kapacity za normálních teplotních podmínek – 1S	79
Tabulka 24 Průměrná nábojová účinnost za normálních teplotních podmínek – 1S.....	79
Tabulka 25 Pokles kapacity za zvýšených teplot - 1S	89
Tabulka 26 Průměrná nábojová účinnost za zvýšených teplot - 1S	89
Tabulka 27 Pokles kapacity za normálních teplotních podmínek - 2S	108
Tabulka 28 Průměrná nábojová účinnost za normálních teplotních podmínek - 2S	108
Tabulka 29 Pokles kapacity za zvýšených teplotních podmínek - 2S	118
Tabulka 30 Průměrná nábojová účinnost za zvýšených teplotních podmínek - 2S	118
Tabulka 31 Naměřené hodnoty z EIS LG MH1	134
Tabulka 32 Ekonomické zhodnocení provozu vybraných typů baterií.....	135

ÚVOD

Díky rozvoji moderních technologií jako jsou notebooky, mobilní telefony a další přenosné elektronice, se zvyšují požadavky na baterie, které jsou v těchto zařízeních obsaženy. Stále více však bývají baterie využívány nejenom v elektronice ale také v automobilovém průmyslu a v systémech pro ukládání elektrické energie. Lithium – iontové, zkráceně Li-Ion baterie jsou dnes součástí většiny zařízení, které běžně užíváme. Na trhu se poprvé objevily v roce 1991, kdy je představila firma SONY a téměř okamžitě jimi nahradila Ni-MH baterie, které byly do té doby používané například v mobilních telefonech. V dnešní době se na vývoji a zlepšení lithium – iontových baterií podílejí firmy a výzkumné ústavy po celém světě a stále dochází k pomalé eliminaci nedostatků a zlepšování parametrů těchto baterií. Snaha o zvýšení kapacity a životnosti lithium-iontových baterií je v současné době jedním z nejprobíranějších témat na skoro všech diskusních fórech a ve vědeckých člancích. Dalším tématem, které souvisí s problematikou lithium-iontových baterií je jejich výroba a recyklace, která zatím moc šetrná k životnímu prostředí není [1].

Dnešní svět si však bez lithium-iontových baterií nelze ani představit. Problematikou Li – Ion baterií se zabývá i tato diplomová práce, jejíž téma je sledování vlivu teploty na nabíjecí a vybíjecí charakteristiky lithium-iontových baterií. První kapitola práce je věnována historii elektrochemických zdrojů s bližším zaměřením na vývoj primárních a sekundárních článků. Druhá kapitola popisuje sekundární elektrochemické zdroje. Třetí kapitola se věnuje lithium-iontovým bateriím a je dále rozčleněna na historii Li-Ion baterií, princip funkce Li-Ion baterií, mechanické provedení, komponenty a konstrukce Li-Ion baterií, výhody a nevýhody Li-Ion, charakteristické vlastnosti Li-Ion, degradační mechanismy, péče o Li-Ion baterie, použití a aplikace Li-Ion baterií, ochranné a bezpečnostní prvky a vývojové směry v oblasti Li-Ion baterií. Třetí kapitola je věnována závěru teoretické práce, která obsahuje i vlastní zhodnocení využití Li-Ion baterií. Čtvrtá kapitola se zabývá návrhem a konkrétním postupem měření a popisuje také proceduru GCPL. Pátá kapitola pojednává o jednotlivých komponentách použitých v praktické části. Šestá kapitola se věnuje výsledkům z měření první sady baterií za normálních teplotních podmínek a za zvýšených teplot. Sedmá kapitola se věnuje výsledkům z měření druhé sady baterií za normálních teplotních podmínek a za zvýšených teplot. Osmá kapitola se zabývá měřením impedanční spektroskopie na baterii LG MH1. Devátá kapitola popisuje zátěžové testy provedené na osmi stejných typech baterií LG MH1 za normálních, nízkých a vysokých teplot. Desátá kapitola se věnuje ekonomickému zhodnocení a využití měřených baterií z krátkodobého a dlouhodobého hlediska. Jedenáctá kapitola je závěr diplomové práce.

1. HISTORIE ELEKTROCHEMICKÝCH ZDROJŮ

Počátky elektrochemických zdrojů sahají až do roku 1791. V tomto roce se podařilo italskému vědci Luigi Galvanimu zpozorovat vliv spojení dvou různých kovů v prostředí elektrolytu, které vyvolalo stahy žabích svalů [2]. V roce 1800 sestrojil italský vědec Alessandro Volta Voltův sloup, což je první chemický zdroj proudu. Jednalo se tak o prototyp prvního primárního článku, tak jak ho známe dnes. Francouzský vědec Gaston Planté navázal v roce 1859 na výzkum Alessandra Volty a spojením dvou olověných desek sestrojil elektrody, které vložil do roztoku kyseliny sírové a vytvořil tak olověnou baterii. Šlo tak o první sekundární baterii, kterou bylo možné nabíjet. Švéd Waldemar Jungner v roce 1899 sestrojil a patentoval první nikl – kadmiovou (Ni-Cd) baterii. Baterii na bázi Nikl-Železo patentoval Američan Thomas Alva Edison v roce 1901 [3].

1.1 Obecný popis elektrochemických zdrojů

Elektrochemický článek je zařízení, které se skládá z katody, anody, separátoru, elektrolytu, popřípadě vývodů. Anoda je elektroda, která podléhá oxidační reakci a dodává do vnějšího obvodu elektrony. Katoda tyto elektrony přijímá a dochází na ní k redukci nějaké chemické sloučeniny. Elektrolyt elektrody propojuje tak, aby umožnil přechod nabitých částic nikoliv však elektronů. Separátor není nutný pro funkci elektrochemického článku, pokud jsou elektrody fyzicky separovány určitou vzdáleností. Pojem baterie vznikl pro popis několika dohromady navzájem spojených článků. S příchodem lithium iontových baterií, které mají vysoké jmenovité napětí schopné napájet řadu zařízení, lze používat pojem baterie i pro samostatný článek. S vývojem elektrochemických zdrojů energie se vytvořil systém pro jejich charakterizaci. Klíčové jsou následující parametry [32]:

- Napětí [V] – udává elektromotorický potenciál mezi vývody baterie, je závislý na konkrétním uspořádání baterie a jejím chemickém složení.
- Kapacita [Ah] – jedná se o množství náboje, které je schopný daný zdroj dodat, nebo přijmout než dojde k úplnému vybití, respektive nabití.
- Energie [Wh] – tato veličina udává celkové množství práce, jež je schopen vykonat elektrický proud v externím elektrickém obvodu. Závisí na napětí a kapacitě baterie.
- Váha [kg] – veličina udávající hmotnost baterie. Silně se odvíjí od chemického systému, kapacity baterie a podobně.
- Objem [dm³] – udává kolik prostoru daná baterie zabere.
- Měrná kapacita [Ah/kg, Ah/dm³] – jedná se o jednotku, kolik náboje může baterie dodat vzhledem ke své hmotnosti, respektive objemu.
- Měrná energie vzhledem ke hmotnosti [Wh/kg] – udává kolik energie baterie obsahuje vůči své hmotnosti.

- Měrná energie vzhledem k objemu [Wh/dm^3] – vyjadřuje kolik energie se nachází v baterii vzhledem k objemu.
- Měrný výkon [W/kg] – jednotka udávající kolik výkonu je baterie schopná dodat v rámci stanovených provozních podmínek vzhledem ke své váze.
- Proud [A] – jedná se o množství náboje procházejícího baterií za určitý čas.
- Jmenovitý proud [CA] – jedná se o velikost proudu vzhledem ke kapacitě baterie a času za který projde náboj rovný kapacitě baterie elektrickým obvodem. Baterie o kapacitě 20 Ah bude teoreticky proudem 1C vybita přesně za hodinu proudem 20 A. Proud 2C způsobí vybití dané baterie za 30 minut proudem 40 A. Proud udávaný tímto způsobem je vždy nutně vztáhnout k jiné veličině, například ke zmíněné kapacitě.

Výpočet teoretické kapacity baterie zohledňuje elektrochemické vlastnosti použitých elektrod, jejich hustotu, jejich množství, elektrochemický potenciál vůči vodíku, množství elektrolytu a jeho hustotu. Výpočet vychází z Faradayova zákona.

Dosažitelná kapacita je vždy nižší než teoretická, protože všechny reaktanty nejsou dokonale spotřebovány. Zároveň je nutné vzít v úvahu zapouzdření článku, váhu separátoru, přívodů a jiných komponent, které se nepodílejí na chemické reakci [32].

1.2 Primární baterie

Primární baterie nelze opakovaně dobíjet a po jejich vybití jsou likvidovány bez možnosti dalšího použití. Vyrábějí se jako ploché knoflíkové anebo válcové baterie. U těchto baterií je elektrolyt zasáknut v separátoru, z pravidla se tak jedná o takzvané suché baterie. Mezi výhody primárních baterií patří vysoká hustota energie, nízká cena a dlouhá životnost dosahující až deseti let u některých typů. Primární baterie se používají v hodinkách, přenosných elektrických zařízeních, dětských hračkách a v mnoha dalších zařízeních. Zinkové baterie jsou nejtypičtějším zástupcem primárních druhů baterií a dále se dělí podle chemických vlastností, pracovního napěťového potenciálu a gravimetrické hustoty energie na [4]:

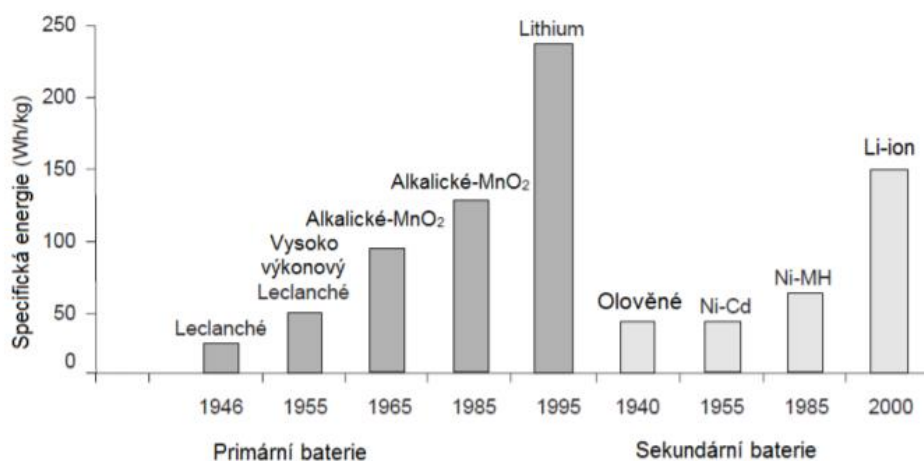
- Leclanchéova baterie – MnO_2/Zn s mírně kyselým elektrolytem s převahou NH_4Cl [5]
- Zinkochloridová baterie – MnO_2/Zn s mírně kyselým elektrolytem s převahou ZnCl_2 [5]
- Alkalická baterie – MnO_2/Zn s alkalickým elektrolytem [5]
- $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Zn}$ [5]
- O_2/Zn s mírně kyselým elektrolytem [5]
- O_2/Zn s alkalickým elektrolytem [5]
- NiOOH/Zn [5]

Nejstarším primární baterií je Leclanchéova baterie, kterou v roce 1866 objevil francouzský vědec Georges Leclanché. V pozdějších letech byla objevena zinkochloridová baterie, která představuje vylepšený typ této baterie. Vylepšení spočívá ve využití jiného chemického složení elektrolytu. Zásadním vývojovým milníkem pak

představují alkalické baterie, které poskytují nižší vnitřní odpor a vyšší měrnou kapacitu. Jejich objev se datuje do roku 1959. V roce 1970 pak došlo k objevu primárních lithiových baterií, které mají ještě vyšší měrnou hustotu energie a delší skladovatelnost než alkalické baterie [4].

1.3 Sekundární baterie

Sekundární baterie lze oproti primárním bateriím opakovaně dobít i v případě jejich úplného vybití. Dochází k přijetí elektrické energie vnějším zdrojem, která je poté nahromaděna v elektrodách ve formě chemické energie. V elektrodách dochází k chemickým změnám v průběhu nabíjení a vybíjení baterie. Tyto chemické změny probíhají jak u sekundárních baterií, tak u primárních baterií. Rozdíl je pouze v tom, že u sekundárních baterií mohou tyto reakce probíhat v obou směrech. Olověná baterie je nejstarší zástupce sekundárních baterií. Byla objevena francouzským fyzikem Gastonem Plantém v roce 1895. Sekundární baterie jsou dnes využívány v řadě aplikací. Lze je najít v mobilních telefonech, počítačích, startovacích bateriích, vozidlech se spalovacím motorem, ale také jako pohon elektrických a hybridních vozidel anebo také ve stacionárních bateriích, které slouží k uskladnění přebytečné energie dodávané do elektrizační soustavy. Mezi hlavní představitele sekundárních baterií se řadí olověné baterie, nikl-kadmiové baterie, nikl-metalhydridové baterie a lithium iontové baterie. V dalších letech se očekává zdokonalení výroby Li-Ion baterií díky suchému procesu nanášení aktivních hmot elektrod na proudové sběrače, tato technologie byla demonstrována firmou MAXWELL. Usilovně se také pracuje na zdokonalení odolnosti elektrolytů a zvyšování napětí. Zajímavou alternativou Li-Ion baterií jsou také baterie lithium-síra, lithium-vzduch a baterie na bázi Na-Ion. Na Obrázek 1 je vidět vývoj primárních a sekundárních baterií v čase [4].



Obrázek 1 Porovnání primárních a sekundárních baterií v závislosti na měrné hmotnostní kapacitě [4]

2. SEKUNDÁRNÍ ELEKTROCHEMICKÉ ZDROJE

Kapitola se zabývá popisem a porovnáním sekundárních elektrochemických baterií z hlediska chemického systému, charakteristických vlastností, výhod a nevýhod. V první části jsou rozebírány olověné baterie, nikl-kadmiové baterie a nikl-metal hydridové baterie. Další část kapitoly je věnována lithium iontovým bateriím z pohledu různých typů, konstrukce, užití a vlastností.

2.1 Porovnání sekundárních elektrochemických baterií

Tabulka 1 Porovnání sekundárních elektrochemických baterií [30]

Vlastnost	Olověné baterie	Ni-Cd baterie	Ni-MH baterie	Li-Ion Kobalt	Li-Ion Mangan	Li-Ion Fosfát
Energetická hustota [Wh/kg]	30-50	45-80	60-120	150-250	100-150	90-120
Objemová hustota energie [Wh/l]	75-105	110-140	300-420	450-750	300-450	270-360
Vnitřní odpor	Velmi nízký	Velmi nízký	Nízký	Střední	Nízký	Velmi nízký
Doba nabíjení [h]	8-16	1-2	2-4	2-4	1-2	1-2
Nominální napětí [V]	2	1,2	1,2	3,6	3,7	3,2-3,3
Toxicita	Velmi vysoká	Velmi vysoká	Nízká	Nízká	Nízká	Nízká
Komerzializace	1900	1950	1990	1991	1996	1999
Cena	Nízká	Střední	Střední	Vysoká	Vysoká	Vysoká
Omezení využití	Krátká životnost	Dostupnost Legislativa	Spotřební zařízení	Cena	Cena	Cena
Výhody	Spolehlivost	Pracovní teploty, životnost	Žádný paměťový efekt	Vysoká hustota energie	Bezpečnost	Bezpečnost
Nevýhody	Hmotnost	Dostupnost	Životnost	Stabilita	Životnost	Hmotnost

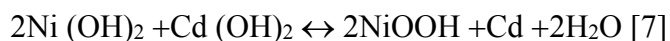
2.2 Používané sekundární baterie a jejich technologie

2.2.1 Olověné baterie

Olověná baterie je jednou z nejběžnějších zástupců sekundárních baterií, které jsou používané přes 100 let. Jejich spolehlivost, cenová dostupnost a co se týče instalovaného výkonu představují cca 60 % prodeje baterií. Olověné baterie se využívají především v automobilovém průmyslu, jako zálohový zdroj energie pro počítače (UPS) a další systémy. Díky své větší hmotnosti nejsou tolik využívány v přenosných spotřebičích. Nevýhodou olověných baterií je přítomnost olova, které není ekologicky šetrné. Výhodou však je jejich nízká cena, díky které jsou stále využívány. Olověné baterie je nutné skladovat v nabitém stavu. Jestliže dojde k jeho uskladnění v nenabitém stavu, způsobilo by to sulfataci elektrod, což je proces, který může vést až ke zničení baterie. Při skladování je doporučeno alespoň 1x ročně olověné baterie nabít, se zvyšující okolní teplotou se tento interval zkracuje. Další nevýhodou je zhoršení elektrických vlastností při nízkých a vysokých teplotách. Pro záporné elektrody je využito porézní olovo a pro kladné elektrody je využit oxid olovičitý (PbO_2). Destilovanou vodou zředěná kyselina sírová je elektrolytem v olověných bateriích. S hustotou klesá při vybíjení baterie i elektrická vodivost. $1,24 \text{ g/cm}^3$ až $1,28 \text{ g/cm}^3$ je odpovídající hustota kyseliny u nabitě baterie. Při nabíjení a vybíjení olověné baterie probíhají oxidačně redukční děje, které lze popsat rovnicí: $\text{PbO}_2 + \text{Pb} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \leftrightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [7]

2.2.2 Ni-Cd baterie

Ni-Cd baterie mají tu výhodu, že jejich poměr hmotnosti ku kapacitě v porovnání s jinými bateriemi je velmi příznivý, a proto jsou stále používány. Hlavní výhodou nikl – kadmiových baterií je jejich vysoká spolehlivost, schopnost dodat vysoké proudy, možnost rychlého nabíjení a vybíjení, značný rozsah pracovních teplot během vybíjení baterie ($-40 \text{ }^\circ\text{C}$ až $70 \text{ }^\circ\text{C}$), malá změna napětí v průběhu vybíjení a výborné mechanické vlastnosti. Nikl – Kadmiové baterie lze skladovat bez zhoršení elektrických vlastností ve vybitém stavu libovolnou dobu. Jakmile ale nejsou v nabitém stavu využívány, dojde k jejich vybití za cca 3 měsíce. Mezi nevýhody nikl – kadmiových baterií patří paměťový efekt, což je nutnost nabíjení baterie ve vybitém stavu, aby se zamezilo poklesu kapacity. Další nevýhodou Ni-Cd baterií je značná ekologická zátěž, neboť tyto baterie obsahují těžké kovy (kadmium). Menší měrná energetická hustota, která je vztažena na hmotnost či objem baterie je další nevýhoda Ni-Cd baterií. Pro zápornou elektrodu je použit hydroxid kadmiový a pro kladnou elektrodu je použit hydroxid nikelnatý. U Ni-Cd baterií je elektrolytem vodný roztok hydroxidu draselného. Při nabíjení a vybíjení Ni-Cd baterie probíhají oxidačně redukční děje, které lze popsat rovnicí:



2.2.3 Ni-MH baterie

Na Ni-Cd baterie navazují typologicky Ni-MH baterie. Oproti Ni-Cd bateriím mají Ni - MH baterie řadu výhod. Ni-MH baterie disponují větší kapacitou, menší ekologickou zátěží pro životní prostředí, nepodléhají paměťovému efektu a neobsahují těžký kov kadmium, který je značně jedovatý. Baterie Ni-MH lze nabíjet i v případě, že nejsou zcela vybité. Uplatnění nacházejí především tam, kde byly dříve využívány Ni-Cd baterie se zvýšenou měrnou energií. Ni-MH baterie jsou skladovány v nabitěm stavu, avšak jednou za 6 měsíců je nutné je dobít na 50 % jmenovité kapacity. Ni-Cd a Ni-MH baterie mají stejnou hodnotu jmenovitého napětí, které je 1,2 V. Do nevýhod Ni-MH baterií lze řadit například menší míra cyklické odolnosti, vyšší samovybití, vyšší hodnota vnitřní impedance a také vyšší cena, neboť i samotná výroba Ni-MH baterií je značně náročná a také je třeba vzít v potaz dostupnost surovin potřebných k výrobě. Pro kladnou elektrodu Ni-MH baterií je využito stejného složení a konstrukce aktivní hmoty tak jako je tomu u kladné elektrody Ni-Cd baterií. Pro zápornou elektrodu, která je z kovové mřížky, na které je nanášena elektrochemicky aktivní látka. Při nabíjení a vybití Ni - MH baterie probíhají oxidačně redukční děje, které lze popsat rovnicí:



2.2.4 Li-Ion baterie

Baterie typu Li-Ion jsou dnes jedny z nejpoužívanějších zdrojů energie ve spotřební elektronice a v přenosných zařízeních. Li-Ion baterie jsou dodávány v provedeních, mezi které patří válcové, prismatické, sáčkové a knoflíkové provedení. Značnou výhodou Li - Ion baterií je vysoké napětí těchto baterií, které dosahuje hodnot 3,8 V a značná měrná energie, jejíž hodnota se pohybuje průměrně okolo 150 Wh/kg. Baterie typu Li - Ion lze opakovaně nabíjet. Pro kladnou elektrodu je použit materiál, který obsahuje ionty lithia. Pro zápornou elektrodu je použit uhlík (grafit) porézního typu. Jako u všech typů baterií, u Li-ion baterií teče proud iontů od anody ke katodě při jeho vybití. Proces, který probíhá uvnitř lithium iontové baterie je pohyb kladných iontů přes elektrolyt a oddělovací membránu mezi elektrodami do uhlíkové, nebo jiné aktivní hmoty elektrody. Proud, který je dodáván při nabíjení baterie, má opačný směr než při běžném provozu – při vybití. Anoda baterie musí být připojena ve vnějším obvodu k záporné svorce a katoda musí být připojena z nabíjecího obvodu na kladný pól. Během dobíjecího procesu probíhá téměř inertní vratná změna, díky které se lithiové ionty uvolní z katody a jsou přemístěny na anodu. Li-Ion baterie lze dnes nalézt například v mobilních telefonech, notebookech, v přenosných přístrojích, ve vojenské elektronice (v radiích, detektorech min a termálních zbraních), v letadlech, kosmických lodích, družicích, a v elektrických nebo hybridních a elektrických vozidlech. Baterie typu Li-Ion mají nízké samočinné vybití (2 % až 8 % měsíčně), životnost přesahující 1000 cyklů, značný rozsah teplot při nabíjení baterie 0 °C až 45 °C a při vybití baterie - 20 °C až 65 °C. Tyto vlastnosti umožňují využití Li-Ion baterií v nejrůznějších aplikacích. Výrobci baterií nabízejí značné množství velikostí a tvarů Li - Ion baterií. Oproti Ni-Cd a Ni-MH bateriím pracují jednotlivé baterie Li - Ion v rozsahu hodnot napětí od 2,5 V do 4,2 V.

Je to zhruba třikrát větší hodnota napětí než u Ni-Cd a Ni-MH baterie. Li-Ion baterie disponují také značnou hodnotou měrné kapacity. Aby byla zajištěna voděodolnost, využívají se uzavřené nádoby a bezvodé elektrolyty. Pro anodu je nejpoužívanějším materiálem grafit. Pro katodu je nejčastěji využit: Oxid lithia kobaltu (LiCoO_2), který je znám jako kobaltan lithný, lithium železo fosfát (LiFePO_4) nebo také materiál se spinelovou strukturou (LiMn_2O_4) a další materiály. Kapacita, napětí, životnost a bezpečnost se mohou s volbou materiálu pro anodu, katodu a elektrolyt měnit [7].

2.3 Budoucí vývoj baterií

Již dnes hrají elektrochemické baterie nezastupitelnou roli a tento trend bude v budoucnu pokračovat. To zajišťuje prostředky pro výzkum nových typů baterií. Lze identifikovat dva hlavní směry vývoje a to [33]:

- Snahy vylepšit stávající chemické systémy. Cíle výzkumu jsou zaměřeny na snížení ceny, zvýšení hustoty energie a výkonu, zlepšení bezpečnosti a prodloužení životnosti.
- Vyvinout zcela nové chemické systémy. Každý nový systém je vyvíjen za účelem dosáhnout určitých vlastností a tím cílit na specifické trhy a požadavky.

Doba od objevu ke komercializaci se může výrazně lišit. V laboratořích funguje spousta experimentálních elektrochemických systémů, které zatím nebyly uvedeny na trh. Často mají tyto systémy jednu či více zásadních nevýhod či limitací nebo nebyla snaha je komercializovat. Častým důvodem je vysoká cena, toxicita a krátká životnost [33].

2.3.1 Baterie lithium-síra

Tento typ baterie využívá lithium jako materiál anody a síru jako materiál katody. Elektrolytem je organická sloučenina, která je obsažená v pórech polypropylenového separátoru. Elektrolyt se skládá z lithné soli (LiTFSI) rozpuštěné v cyklických etherech a lineárních etherech. Tento systém vykazuje velice příznivou hustotu energie. Ta je dána nízkou hustotou lithia a síry. Jeho hlavní nevýhoda však spočívá v omezené životnosti. Ta je způsobena nízkou vodivostí síry a velkými objemovými změnami při vybíjení. Síra musí být povrchově modifikována nejčastěji uhlíkem. S rostoucím obsahem lithia v katodě roste mechanické namáhání, které způsobuje oddělení síry od uhlíku [34].

2.3.2 Baterie na bázi kov-vzduch

Vzduch jako zdroj kyslíku pro depolarizační reakce katody se používá u zinkových anod v bateriích pro naslouchátka a speciální použití. Taková baterie nabízí hustotu energie zhruba 600 Wh/kg. Stejného principu se snaží výzkum využít i u jiných kovů. Například u hliníku nebo lithia. V případě hliníkové anody je hlavní problém reakce s elektrolytem, u lithia se tvoří peroxid lithia, který zabraňuje toku elektrického proudu [33].

3. LI-ION BATERIE

3.1 Historie Li-Ion baterií

Baterie typu Li-Ion byly objeveny v šedesátých letech 20. století. V 70. letech 20. století se objevily pokusy, kdy byly využity sulfidy kovů za kladnou elektrodu a kovové lithium za zápornou elektrodu. Jelikož během tohoto pokusu došlo ke korozi a pasivaci elektrod, byly tyto výsledky neuspokojivé. Během nabíjení malými proudy došlo k dalším komplikacím. Jehličky, které vytvořilo lithium při nabíjení proděravěly separátor. Vnitřní zkratky a nevyzpytatelné teplotní pochody byly další komplikace, které vzešly z tohoto pokusu. V osmdesátých letech za zápornou elektrodu byly použity sloučeniny LiWO_2 , $\text{Li}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ nebo Li_9MoSe_6 jako zdroj lithiových iontů Li^+ . Za kladnou elektrodu byly použity sloučeniny Ti, Wo, Nb, Vn a Mo. Výsledky pokusů ale byly neuspokojivé především kvůli nízké kapacitě, napětí a kvůli složité výrobě. Firma SONY využila za zápornou elektrodu směs grafitu, která byla obohacena lithiem a polyolefiny. To způsobilo velký pokrok ve výrobě Li-Ion baterií. Ředitel firmy SONY Energytec Keizaburo Tozawa je považován za autora názvu Li-Ion baterií. V roce 1991 byla poprvé technologie Li - Ion použita v mobilním telefonu SONY Handyphone HP – 211. V roce 1992 se technologie Li-Ion objevila ve videokamerách. Za dalších pět let už bylo vyrobeno 193 milionů Li-Ion baterií na území Japonska [3].

3.1.1 Varianty Li-Ion baterií

Lithium iontové baterie se podle provedení a použitých elektrodových materiálů a účelu použití dělí [35], [21], [19], [6], [36]

- Podle konstrukce
 - Válcové baterie
 - Nestandardní velikosti
 - Standardní velikosti (18650, 26650...)
 - Miniaturní (3,65 x 20 mm)
 - Prismatické baterie
 - Podle materiálu pouzdra
 - Hliníkové, ocelové, speciální
 - Podle uspořádání elektrod
 - Skládané, vinuté
 - Sáčkové baterie
 - Miniaturní, malé a velkoformátové
 - Knoflíkové baterie
 - Standardní velikosti (LIR2032)
 - Nestandardní velikosti (CP1254)

- Podle materiálu
 - Kladné elektrody
 - LCO (lithium-kobalt-oxid)
 - NMC (lithium-nikl-mangan-kobalt-oxid)
 - NCA (lithium-nikl-kobalt-hliník-oxid)
 - LMO (lithium-mangan-oxid)
 - LFP (lithium-železofosfát-oxid)
 - Záporné elektrody
 - Grafit
 - LTO (lithium-titan-oxid)
 - Křemík
 - Grafen
 - Směsové
 - Separátoru
 - Podle materiálu
 - PP (polypropylen)
 - PE (polyethylen)
 - s keramickou vrstvou
 - Podle funkce
 - S tepelnou deaktivací, bez tepelné deaktivace
 - Podle tloušťky
 - Normální (25 μm), tenké (16 μm), ultratenké (12 μm)
 - Elektrolytu
 - Podle skupenství
 - Kapalný, gelový, pevný
 - Podle rozpouštědla
 - PC (propylen-karbonát)
 - EC (ethylen-karbonát)
 - DMC (dimethyl-karbonát)
 - DEC (diethyl-karbonát)
 - EMC (ethylmethyl-karbonát)
 - Podle lithné soli
 - LiPF_6 (lithium-hexafluorofosfát)
 - LiBF_4 (lithium-tetrafluorborát)
 - LiFSI (lithium-bis(trifluormetansulfonyl))
 - LiTFSI (lithium-bis-(fluorsulfonyl)imid)
- Podle použití
 - Spotřební elektronika
 - Nízké nároky na výkon (výpočetní technika)
 - Vysoké nároky na výkon (vysavače)
 - Akumulátorové nářadí

- Profesionální nářadí, hobby nářadí
- Vojenská technika
 - Torpéda, komunikační technika, naváděcí systémy
- Vesmírná a letecká technika
 - Satelity, rakety, letadla

3.1.1.1 Li-Iontové baterie (Li-Ion)

Li-Ion baterie s kapalným elektrolytem – Bývají ve formě válcových baterií se svinutými elektrodami po obvodu baterie. Dosahují jmenovitého napětí 3,6 V a nabíjecího napětí 4,2 V na baterii. Lze je nalézt ve velikosti 18 mm průměr baterie, 65 mm délka baterie. Pro případ přebití a úniku plynů jsou tyto baterie opatřeny kovovým pláštěm s tlakovou pojistkou. Li-Ion baterie s kapalným elektrolytem jsou mechanicky dobře odolné a bezpečné. Používají se pro výkonově náročné aplikace a u notebooků. Hodnota energetické hustoty se pohybuje okolo 150-200 Wh/kg [6].

3.1.1.2 Lithium-železo-fosfátové baterie (LiFe)

Lithium-železo-fosfátové baterie (LiFe) – Pokud je přidáno ytrium do materiálu kladné elektrody, pak je baterie nazývána také LiFePO_4 , nebo LiFeYPO_4 . Ytrium je v této baterii přidáno kvůli zvýšení stability struktury LiFePO_4 a také kvůli zlepšení vodivosti. Hodnota nabíjecího napětí se pohybuje okolo 3,6 V a hodnota jmenovitého napětí je 3,2 V. Hodnota energetické hustoty je však nižší oproti Li-Ion bateriím. LiFe baterie mají mnohem vyšší proudovou zatížitelnost vzhledem ke kapacitě a disponují také částečnou odolností proti hlubokému vybití. Kladná elektroda je potažena tenkou vrstvou materiálu, který propouští ionty a zabraňuje tak degradaci materiálu na katodě. Využití nacházejí mimo jiné jako náhrada za olověné baterie [6].

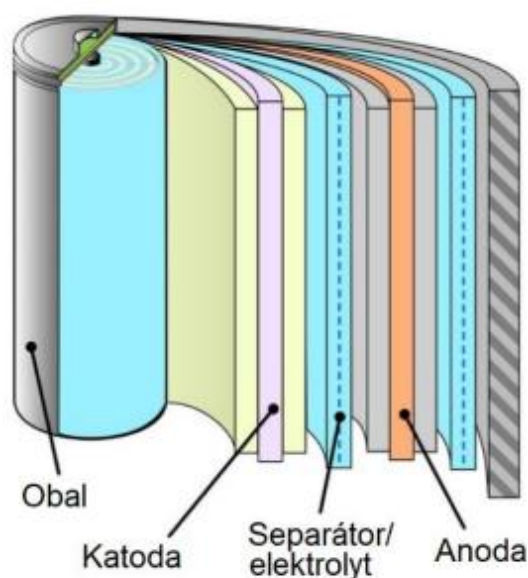
3.1.1.3 Lithium-titanové baterie (LTO)

LTO baterie dostaly jméno podle materiálu anody $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (lithium-titan-oxid). Anoda u LTO baterií je důvodem pro jejich nižší napětí. Baterie LTO lze rychle nabíjet a vybíjet, neboť vzhledem k jejich hmotnosti disponují také velkou měrnou plochou aktivních materiálů. Mezi výhody lze řadit například značnou cyklickou životnost (až 10000 cyklů) a jejich provozuschopnost za nízkých teplot. To je způsobeno absencí SEI vrstvy. Ionty, které při nabíjení interkalují do anody nemusí překonávat dodatečnou bariéru. Tím je snížena možnost pokovování anody při nabíjení v teplotách pod bodem mrazu vody. Za zmínku stojí také to, že nepodléhá stejným degradačním mechanismům jako anody na bázi uhlíku a nedochází k reakci s elektrolytem baterie. LTO struktura je odolnější. Do nevýhod patří nižší hodnota jmenovitého napětí 2,4 V a také výrazně nižší energetická hustota oproti jiným typům Li-Ion baterií [6].

3.1.1.4 Lithium-polymerové baterie (Li-Pol)

Jedná se o velice rozšířený typ lithiových baterií. Elektrolytem je polymerní iontově vodivá sloučenina. Obal článku tvoří hliníková fólie. Pokud však dojde k poškození struktury baterie vlivem mechanické deformace, může dojít ke zkratům. Elektrody baterie nejsou svinovány, ale jsou pokládány na sebe. Používají se v noteboocích a tabletech, kde se takovými nepravidelně tvarovanými bateriemi vyplňuje prostor uvnitř těchto zařízení. Nabíjecí napětí je 4,2 V [6]. Lithium polymerové baterie se dělí na ty, které využívají roztoku elektrolytu v polymerní membráně a ty které využívají iontově vodivý polymer. Druhý typ vykazuje nízkou iontovou vodivost za normálních teplot. Jejich výhodou je schopnost pracovat dlouhodobě ve zvýšených teplotách bez výrazné degradace. Hodí se tedy pro použití v podmínkách s trvale vysokou teplotou v rozmezí 40-100°C. Historicky tak našly využití ve stacionárních aplikacích nepřerušitelného napájení v horkých oblastech [37]. Polymerním elektrolytům se věnuje kapitola Elektrolyty.

3.1.1.5 Struktura lithium iontové baterie



Obrázek 2 Struktura válcové baterie [38]

Obrázek 2 znázorňuje typickou strukturu válcové lithium iontové baterie. Obal je tvořen kovovým válcem a víčkem. Válec a víčko jsou navzájem mechanicky spojeny zalisováním, jsou však od sebe elektricky izolovány. Víčko je připojeno ke katodě baterie, válec je spojen s anodou. Víčko obsahuje zpravidla řadu bezpečnostních prvků. Mezi tyto bezpečnostní prvky patří PTC, CID, přetlakový ventil, tyto bezpečnostní prvky jsou podrobněji popsány v kapitole Válcové baterie. Uvnitř válce se nachází smotek elektrod a separátoru, které jsou smáčeny elektrolytem. Smotek je asi 1,5m dlouhá vrstvená

struktura proudového nosiče a aktivního katodového materiálu, separátoru a anodového aktivního materiálu a proudového sběrače anody. Smotek může být navinut na nosné trubičce nebo může být samonosný. Separátory, elektrolyty a aktivní materiály elektrod jsou probírány v kapitole

Komponenty a konstrukce Li-Ion baterií. Proudový sběrač kladné elektrody je zpravidla zhotoven jako hliníková fólie a proudový sběrač záporné elektrody je zhotoven z měděné fólie. Volba rozdílných materiálů proudových sběračů souvisí s jejich korozní odolností v chemickém prostředí elektrolytu. Vnitřní struktura a mechanické provedení baterie mají zásadní vliv na vývoj a odvod tepla z baterie. Pro správnou funkci a dlouhou životnost baterie musí být zachován rovnoměrný přítlak elektrod. V případě válcového provedení jsou tyto požadavky splněny snadno, horší je však odvod tepla z baterie. U prismatických a pouch provedení je situace opačná. Nejnáchylnější na přítlak jsou pouch baterie, ty spoléhají na slisování při výrobě a na rozdíl tlaku uvnitř a vně baterie. Pokud dojde k vývinu i malého množství plynu uvnitř baterie, přítlak elektrod se může výrazně zhoršit. Tomuto procesu se říká delaminace, při kterém dochází k poklesu aktivní plochy elektrod [38].

3.1.2 Parametry různých typů lithium iontových baterií

Tato kapitola si klade za cíl srovnat různé typy lithium iontových baterií ve válcovém provedení, velikosti 18650 a 26650 z pohledu hustoty energie a dalších charakteristických vlastností. Standardizovaná velikost umožňuje objektivní zhodnocení daných parametrů.

Tabulka 2 Parametry různých typů Li-Ion baterií [25], [27], [31], [39]

Baterie	NCR18650G	LG MH1	ACL9012-3.3Ah	LTO
Výrobce	Panasonic	LG Chem	NX batteries	HuaHui
Rok uvedení	2015	2014	2012	2013
Chemický systém	NCR (LiNiCoAlO ₂)	INR (LiNiMnCoO ₂)	LFP (LiFePO ₄)	LTO (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)
Energie [Wh]	12,78	11,75	10,7	3,12
Nominální Kapacita [Ah]	3,55	3,2	3,3	1,3
Gravimetrická hustota energie [Wh/kg]	266	240	134	80
Objemová hustota energie [Wh/l]	775	712	311	189
Vnitřní odpor DC [Ω]	0,19	0,07	0,03	0,02
Nominální napětí [V]	3,6	3,67	3,2	2,4
Nabíjecí napětí [V]	4,2	4,2	3,65	2,8
Vybíjecí napětí [V]	2,5	2,5	2	1,5
Vybíjecí proud [A]	8	10	10	13
Nabíjecí proud [A]	0,3C	1C	2C	5C
Váha [g]	48	49	81	39
Cena [Kč]	299	160	157	145
Životnost [Počet cyklů]	300	500	2000	3000
Výhody	Vysoká hustota energie	Vysoká hustota energie Vysoký výkon	Dlouhá životnost	Velmi dlouhá životnost
Nevýhody	Vybíjecí proudy	Krátká životnost	Střední hustota energie	Nízká hustota energie

3.2 Princip funkce Li-Ion baterií

Oproti olověným bateriím a bateriím na bázi niklu využívají Li-Ion baterie bezvodý elektrolyt. Jako katodový aktivní materiál jsou využívány sloučeniny lithium-kobalt oxid (LiCoO_2), lithium - mangan oxid (LiMn_2O_4), lithium - nikl dioxid (LiNiO_2) a lithium - vanad oxid (LiV_2O_5). Nepolární organická rozpouštědla, LiPF_6 (lithium hexafluorofosfát) jsou sloučeniny, které se nacházejí v elektrolytu Li-Ion baterií. Záporná elektroda je vyrobena z uhlíkového materiálu – grafitu a aditiv. Lithiové ionty se během nabíjení baterie přemísťují z kladné elektrody na zápornou. U Li-Ion baterií, oproti jiným druhům, neprobíhají klasické chemické reakce. Díky tomu je tak dosaženo dlouhé doby životnosti bez značných výkonových změn ve výkonu během stárnutí baterie. Oproti jiným druhům baterií mají také Li-Ion baterie vyšší jmenovité napětí, které dosahuje hodnot až 3,6 - 3,8 V na baterii. U LiFePO_4 (lithium-železo-fosfát) baterií dosahuje jmenovité napětí hodnoty 3,2 V na baterii. U LTO (lithium-titan-oxid) je hodnota jmenovitého napětí 2,4 V na baterii. Li-Ion baterie disponují také větší energetickou hustotou, oproti jiným typům baterií, zejména kvůli vyššímu napětí [6].

Aby se zabránilo narušení těsnosti pláště u Li-Ion baterií, je třeba šetrné manipulace. Použití lithia a lithiových sloučenin způsobuje degradaci baterie, a to zejména při styku s vlhkostí anebo se vzduchem při porušení hermetičnosti. U novějších baterií je využito méně reaktivních materiálů, ale i přesto může dojít ke vzniku požáru při porušení pláště baterie anebo ke zkratu jednotlivých vrstev. Faktorem bezpečnosti se pak stává i vysoká energetická hustota, neboť se energie v baterii velice rychle přemění na teplo. Díky prudkému zahřátí důsledkem zkratu jednotlivých vrstev může dojít ke vznícení materiálu v okolí baterie. Nevýhodou také je, že baterie ztrácí kapacitu i v případě, že není aktivně nabíjena a vybíjena, jedná se o časové stárnutí. Uvnitř baterie dochází ke degradaci materiálů. Rychlost stárnutí je závislá na stavu nabití a okolní teplotě. Tento proces je u Li-Ion baterií nevratný. Se snižující se teplotou klesá výkon baterie díky zvyšujícímu se vnitřnímu odporu [6].

3.3 Mechanické provedení Li-Ion baterií

Lithium – iontové baterie jsou dnes vyráběny ve spoustě fyzických provedeních. Rozeznáváme baterie válcového, knoflíkového a hranolového tvaru. Výrobci se shodli na několika formátech u válcových baterií. U hranolových je situace složitější a nelze jednoznačně určit, který formát je nejpoužívanější [8].

3.3.1 Zapouzdření Li-Ion baterií

Lithium iontové baterie jsou obecně velmi náchylné na jakoukoliv formu vlhkosti, je tedy nezbytné, aby zapouzdření baterie bylo co nedokonalejší. V případě válcových baterií se používá poniklovaná A3 ocel. Nylonový těsnicí kroužek izoluje tělo a vršek baterie po zalisování, zajišťuje také hermetičnost spoje. Baterie jsou pak opatřeny izolační podložkou z materiálu PET na kladném kontaktu a teplem smrštitelným vinylovým obalem v celé délce [11].

3.3.2 Válcové baterie

Cylindrické neboli válcové baterie mají řadu výhod. Mezi hlavní řadíme to, že zpravidla obsahují několik bezpečnostních prvků jako je kroužek u kladné elektrody, který je vyroben z materiálu, který má pozitivní teplotní odporový koeficient (PTC). Tento prvek omezuje proud tekoucí baterií při externím zkratu baterie. Mezi další patří CID (Charge interrupt device), jedná se o speciální formu odpojovače u pozitivního terminálu baterie. Při překročení určitého tlaku uvnitř baterie dojde k přerušení cesty proudu, například při přebíjení. Toto zařízení plní ještě funkci přetlakového ventilu, pokud vnitřní tlak baterie překročí nějakou stanovenou mez (2,5 MPa), dojde k protržení hliníkové membrány. Další nespornou výhodou je, že postupem času došlo ke standardizaci velikosti baterií, a tak lze najít mnoho různých typů baterií od různých výrobců, které mají stejnou velikost. Tím, že jsou tyto baterie válcové tak dobře udržují tlak na elektrody a separátor, nedochází tak k delaminaci, což prodlužuje životnost. Mezi hlavní nevýhody patří menší objemová efektivita uspořádání [8]. Do stejného prostoru lze umístit menší počet baterií válcových než hranolových. Další nevýhoda spočívá v tom, že plocha válce o stejném objemu je menší než u hranolové baterie stejného objemu. Pokud je tedy potřeba baterii chladit, tak je nutné počítat s tím, že teplosměnná plocha je menší.

Obrázek 3 vyobrazuje válcový typ baterie 18650. Rozeznáváme tyto základní velikosti [8]:

- 18650 – Nejstarší a nejrozšířenější formát, který má 18 mm v průměru a 65 mm na výšku. Původně se objevil v polovině 90. let. Používá se stále v notebookech a elektrokolech.
- 14500 – jedná se o rozměrově shodný formát jako je AA baterie. Má 14 mm v průměru a 50 mm na délku. Díky odlišnému napětí systémů Li-Ion a alkalických baterií není jejich náhradou
- 26650 je formát větší než 18650, průměr je 26 mm, délka je shodná. Často je používán v bateriovém nářadí a v aplikacích kde jsou vyžadovány velké provozní proudy.
- 21700 představuje nejmladší válcový formát. Rozměry jsou 21 mm v průměru a 70 mm na délku.



Obrázek 3 Válcový typ baterie 18650 [8]

3.3.3 Prismatické baterie

Baterie ve tvaru hranolu jsou oblíbenou volbou ve spoustě aplikací. Jedná se o spotřební elektroniku, elektrická vozidla, uložení energie, vojenské aplikace a podobně. Obal baterie je často schránka z hliníkového plechu svařovaného pomocí laseru. Neexistuje žádný standardizovaný velikostní formát. Hlavní výhoda spočívá v tom, že je dosahováno vysoké objemové efektivity při sestavování baterií. Lze je vyrobit ve velice tenkém provedení, a tak zajistit malou tloušťku napájeného zařízení, což je důležité především ve spotřební elektronice. Díky velké ploše baterie vzhledem k objemu lze zajistit efektivní chlazení. Mezi hlavní nevýhody patří to, že pokud se zvýší tlak uvnitř baterie tak může dojít k vyboulení. Záleží na specifikaci výrobce baterie, ale určitá míra vyboulení po určitém počtu cyklů není známka závady. Na výrobu jsou zpravidla dražší než válcové baterie [8]. Obrázek 4 znázorňuje prismatickou baterii LiFePO_4 [40].



Obrázek 4 Prismatický typ baterie [40]

3.3.4 Knoflíkové baterie

Dnes hrají stále významnější roli díky miniaturizaci spotřební elektroniky. Lze je například najít v bezdrátových sluchátkách, nositelné elektronice a podobně. Neexistuje žádný standard velikostních formátů [8].

Knoflíkové baterie zpravidla nedisponují stejnými bezpečnostními prvky jako válcové či prismatické baterie. Je tomu tak proto, protože je nelze integrovat kvůli jejich fyzickým rozměrům. Těsnění a kalíšek baterie může být navržen tak, aby v případě překročení určitého tlaku uvnitř baterie došlo k jeho uvolnění a tím bylo zabráněno explozi. V dnešní době lze koupit nabíjecí typ knoflíkové baterie ve stejném provedení jako primární knoflíkovou baterii. Díky odlišnému vnitřnímu uspořádání je výsledná energetická hustota nižší než u primárních baterií. Zatímco nenabíjecí lithiová knoflíková baterie obsahuje celistvou vrstvu elektrody, anoda je tvořena lithiovým kalíškem, na který přiléhá relativně silný separátor. Katoda tvořená například diskem z MnO_2 je také relativně silná. U nabíjecí varianty se uvnitř pouzdra nachází skládaná struktura elektrodového systému charakteristická pro lithium iontové baterie. Proudové kolektory elektrod a separátor

zabírají místo, které je u primárního článku zaplněno aktivními materiály. Při porovnání primární baterie CR2032 a nabíjecí baterie LIR2032 vychází najevo, že nabíjecí baterie má napětí 3,6 V a kapacitu 70 mAh. U primární baterie je napětí 3 V a kapacita 225 mAh. Nabíjecí varianta této baterie disponuje zhruba 40% energie primární baterie. Nenabíjecí varianta nachází uplatnění všude tam, kde je potřeba dlouhá životnost a skladovatelnost [41]. Obrázek 5 zobrazuje podobu knoflíkové baterie [19].



Obrázek 5 Knoflíkový typ baterie [19]

3.3.5 Sáčkové baterie – Pouch cell

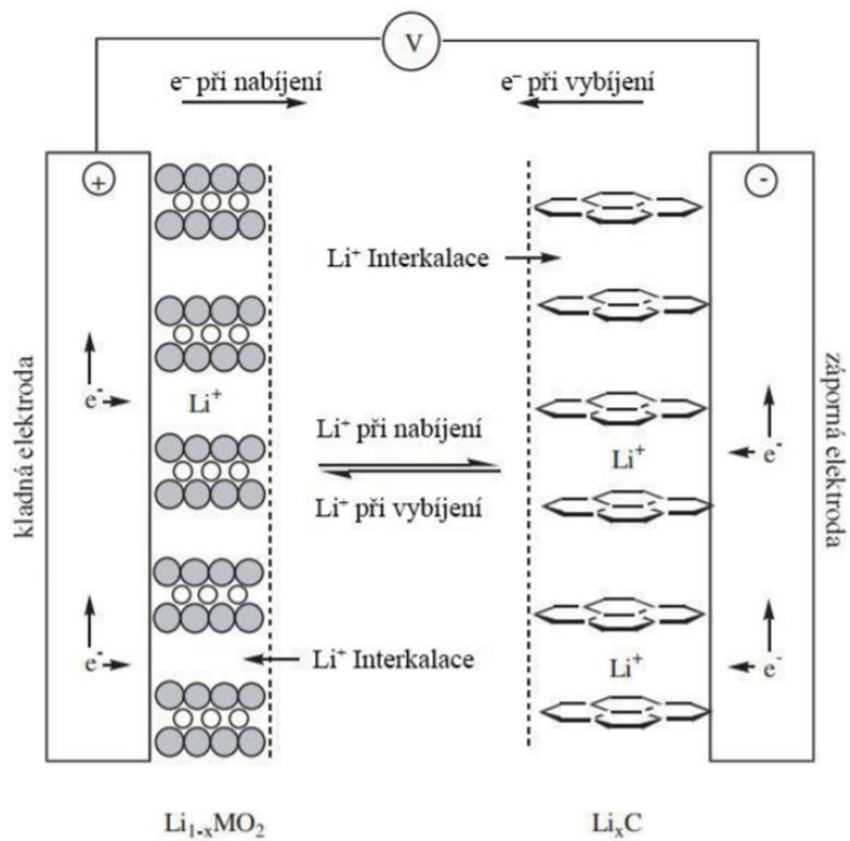
Pytlíkové, nebo taky sáčkové baterie jsou alternativou ke klasickým bateriím, které jsou zapouzdřené v pevném obalu. Poprvé přišly na trh v roce 1995 a otevřely celou řadu možností, jak je využít v nejrůznějších aplikacích. Zásadní je fakt, že je lze vyrobit tenčí a lehčí než klasické typy a dosáhnout tak vyšší měrné kapacity. Faktor plnění dosahuje vysokých hodnot, které se pohybují v rozsahu 90-95%, tato hodnota je největší v porovnání s jinými typy zapouzdření lithium iontových baterií. Musí však být zajištěn jistý přítlačný tlak a také prostor pro expanzi baterie z důvodu možného nafukování a delaminace elektrod a separátoru. Míra nafukování může být 8 až 10 objemových procent po 500 nabíjecích cyklech. Při jejich výrobě je článek zataven do folie tak, že je vytvořen přídatný prostor pro vývoj plynů při prvním nabíjecím cyklu ve výrobě. Ten je pak odstřížen a baterie je hermeticky uzavřena. Přílišné nafukování baterií může poukázat na špatnou výrobu, nedodržení technologických procesů a podobně [8]. Mezi hlavní nevýhody patří náchylnost na vlhkost, ta může způsobit kratší životnost baterie. Tento typ zapouzdření také klade zvýšené nároky při výrobě a manipulaci, nesmí se dostat do kontaktu s ostrými hranami a jinými předměty, které by mohly obalovou fólii narušit. Jedna z významných aplikací je i v automobilním průmyslu, kde se tento formát používá pro výrobu trakčních baterií elektromobilu. Jednotlivé bateriové články jsou spojeny paralelně pro dosažení větší jmenovité kapacity. Tyto základní stavební bloky baterie jsou následně spojovány sériově a umísťovány do modulu. To zajišťuje dostatečný přítlak elektrod. Modul je zpravidla vybaven systémem odvodu tepla z jednotlivých baterií směrem k teplosměnnému výměníku. Uvnitř modulu se mohou nacházet kovová žebra z dobře teplotně vodivého materiálu. Trakční baterie obsahuje tolik modulů, aby bylo dosaženo požadovaného napětí a kapacity [42].

Obrázek 6 vyobrazuje typický příklad sáčkové baterie [8]



Obrázek 6 Sáčkový typ baterie [8]

3.4 Komponenty a konstrukce Li-Ion baterií



Obrázek 7 Interkalace iontů lithia v Li-Ion baterii [9]

Li-Ion baterie jsou složeny z kladné elektrody a záporné elektrody, elektrolytu a oddělovací polymerní membrány. Pro kladnou a zápornou elektrodu využívají Li-Ion baterie materiály, které umožňují interkalaci lithiových iontů. K výměně iontů lithia (Li^+) mezi katodou a anodou dochází během nabíjení anebo vybíjení. Pohyb lithiových iontů souvisí se změnami koncentrací lithiových iontů v aktivních hmotách elektrod. Na obrázku je vidět typický elektrodový systém lithium iontové baterie. Při nabíjení se lithiové ionty dostávají na povrch kladné elektrody z aktivního materiálu. Následně putují elektrolytem přes separátor na elektrodu zápornou. Dochází tedy k deinterkalaci na katodě a interkalaci na anodě. Aby mohly tyto změny probíhat, aktivní materiál elektrod musí být pro tyto ionty přístupný. K tomu slouží již zmíněné vrstevnaté struktury. Při nabíjení se zvyšuje stupeň lithnatosti anody za pomoci následující reakce:

$\text{Li} + \text{C}_6 \leftrightarrow \text{LiC}_6$. Na katodě probíhá opačná reakce $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 \leftrightarrow \text{LiCoO}_2$ stav lithnatosti katody se snižuje. Při vybíjení probíhají chemické reakce opačně [9].

3.4.1 Kladná elektroda – katoda

Důležitou součástí Li-Ion baterií je kladná elektroda. Ta ovlivňuje cenu baterie a její vlastnosti. Katodu z LiCoO_2 měly první komerční Li-Ion baterie. Výzkum se v dnešní době soustřeďuje na oxidy kovů umožňujících velkou pohyblivost lithiových iontů. Krystalová struktura značně ovlivňuje pohyblivost iontů. Využívány jsou tři základní struktury, mezi které patří vrstevnatá struktura, spinelová struktura a olivínová struktura. Vrstevnatá struktura (LiCoO_2) podporuje pohyb iontů ve dvou směrech. Ve Spinelové struktuře (LiMn_2O_4) je pohyb iontů možný ve třech směrech. V olivínové struktuře (LiFePO_4) je pohyb možný pouze v jednom směru. Teoretická kapacita použitých materiálů je vyšší než 140 mAh/g. Hodnota napětí se pohybuje okolo 3,4 V. Reálná kapacita dosahuje hodnot od 120 do 200 mAh/g. Největší teoretickou měrnou kapacitu mají materiály s vrstevnatou strukturou, zatímco spinelová struktura má nejmenší měrnou kapacitu. Nejvyšší jmenovité napětí má však oproti jiným spinelový materiál $\text{LiMn}_3/2\text{Ni}_1/2\text{O}_4$. Ten dosahuje hodnot až 4,7 V.

Mezi další možné materiály, které jsou využity pro katodu patří: [1]

- LiNiMnCoO_2 – NMC
- LiNiCoAlO_2 – NCA

3.4.1.1 Materiál na bázi lithium-kobalt-oxid (LiCoO_2)

Materiál byl poprvé objeven v roce 1980. Poprvé byl použit ve firmě SONY v roce 1991. Tento katodový materiál disponuje vrstvenou strukturou. V kyslíkatých mezivzdušných mezích jsou obsaženy atomy kobaltu a v prostoru mezi vrstvami kyslíku jsou obsaženy atomy lithia. Během cyklování tak dochází ke snadnému uvolňování iontů lithia. Napětí materiálu je 3,88V oproti Lithiu. U materiálu LiCoO_2 je gravimetrická hustota energie okolo 550 Wh/kg. Nevýhodou tohoto materiálu je použití kobaltu. Kobalt tak zvyšuje cenu katodového materiálu a díky tomu je použit v notebookech a menších bateriích v telefonech. Tento katodový materiál má teoretickou kapacitu 274 mAh/g [4].

3.4.1.2 Materiál na bázi lithium-mangan-oxid (LiMn_2O_4)

V laboratořích Bellcore labs bylo zjištěno, že katodový materiál LiMn_2O_4 má strukturu stechiometrického spinelu (MgAl_2O_4). Teoretická kapacita materiálu je rovna 285 mAh/g. Při uvážení přiměřeného napětí materiálu, teoretická kapacita vychází na 148 mAh/g. Mezi nevýhody tohoto materiálu lze zmínit, že pokud dojde ke změně struktury na $\text{Li}_2\text{Mn}_2\text{O}_4$, dojde tak k 16 % zvětšení objemu. To má za následek ztrátu propojení jednotlivých částí elektrody a rozpad částic. Důsledkem tohoto jevu je rychlý pokles kapacity. U materiálu LiMn_2O_4 je gravimetrická hustota energie 480 Wh/kg [4].

3.4.1.3 Materiál na bázi lithium-železo-fosfát (LiFePO_4)

Goodenough popsal v roce 1997 novou třídu katodových materiálů, jejichž zástupcem je materiál LiFePO_4 (Lithno-železnatý fosfát). Materiál disponuje olivínovou strukturou. Krystalografická soustava materiálu LiFePO_4 je kosočtverečná. Materiál má mnohem vyšší kapacitu než v případě materiálů LiCoO_2 a LiMn_2O_4 . Teoretická kapacita je rovna 170 mAh/g. Napětí vůči lithiu je 3,4 V. Typický průběh vybíjecí charakteristiky je zobrazen na Obr. 19. Gravimetrická hustota energie se pohybuje v rozmezí 500 – 550 Wh/g [4].

3.4.1.4 Materiál na bázi lithium-mangan-nikl-kobalt-oxid ($\text{LiMn}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$)

Tento nejnovější katodový materiál, který spadá do druhé generace katodových materiálů, popsal v roce 2001 Ohzuku. Katodový materiál disponuje vrstvenou strukturou. Vybíjecí napětí při vybíjení je stále v rozsahu 4,3 až 3,7 V. Teoretická kapacita je rovna 280 mAh/g. Mezi hlavní výhody tohoto katodového materiálu patří vyšší kapacita, vyšší teplotní stabilita a malá reakce s elektrolyty. Gravimetrická hustota energie je 630 Wh/kg. Mezi hlavní nevýhody patří vyšší cena kobaltu a niklu a vyšší výrobní náklady tohoto materiálu [4].

3.4.2 Záporná elektroda – anoda

Nízké napětí a velká měrná kapacita jsou důležitým parametrem pro výběr ideálního materiálu pro zápornou elektrodu. Kovové lithium, které se využívá pro primární baterie tomuto požadavku odpovídá nejlépe. Kovové lithium se však nedá použít u sekundárních baterií, neboť růst dendritů, které tunelují separátorem, mohou vést až ke zkratu baterie. Existují také rizika spojená s vysokou lithiovou reaktivitou a množstvím uložené energie. Namísto lithia se občas jako elektrodové aktivní materiály využívají interkalační materiály. Uhlíkové materiály (grafit) jsou nejenom dostupné, ale také levné. Sloučenina titanu je také občas použita, ale pouze v menší míře [1].

3.4.2.1 Grafit

Poprvé byl použit lithiovaný grafit v roce 1977. Nevratná redukce elektrolytických roztoků a vzájemná interkalace rozpouštědla způsobila, že se tato elektroda nemohla elektrochemicky cyklovat. Elektrolytický roztok, který obsahuje ethylenkarbonát (EC), byl použit v konfiguraci s lithium iontovými bateriemi. Na povrchu anody se utvoří SEI

vrstva (Solide electrolyte interface). Ta vzniká vzájemným působením elektrolytu a anody. Dosahuje se tak vysoké hustoty energie a malého provozního napětí (0,1 – 0,2 V oproti Li/Li+). Teoretická kapacita je 372 mAh/g v případě interkalace jednoho atomu lithia [43].

3.4.2.2 Lithium-titan-oxid (LTO)

Jedná se o titaničitý lithný oxid, který má charakteristickou spinelovou strukturu. Používání tohoto anodového materiálu je omezeno cenou a nízkou kapacitou. Používá se v aplikacích, které nedisponují vysokou hustotou energie, a to zejména kvůli vysokému provoznímu napětí (1,5V oproti Li/Li+). Materiál dosahuje teoretické kapacity, která je rovna 175 mAh/g. U tohoto materiálu nedochází ke vzniku pevného elektrolytického rozhraní, jinak zvané SEI vrstvy. Nedochází tak ke spotřebě elektrolytu [43].

3.4.3 Separátory

Separátory jsou obecně určeny pro elektrické oddělení elektrod při zachování malého odporu vůči pohybu iontů. Rozlišujeme základní druhy na mikroporézní fólie, netkané textilie, iontoměničové membrány, gelové polymerní elektrolyty a pevné iontové vodiče. Jako separátor Li-Ion baterií bývá použita pórovitá membrána z polyetylenů či polypropylenu. Tloušťka použitého materiálu se pohybuje okolo 25 μm. Hlavním úkolem separátoru je zamezit možnému zkratu mezi katodou a anodou. Díky pórovitosti je umožněn difuzní iontový přenos iontů mezi anodou a katodou. Separátor také slouží jako tepelná pojistka v momentě, kdy membrána uzavírá póry a měkne. Tento proces nastává při teplotách okolo 130–160°C [9].

Mezi základní požadavky na separátor patří [9]:

- minimální elektrolytický odpor a dobrá elektrická nevodivost,
- dobrá mechanická a chemická odolnost vůči nečistotám a elektrodoým procesům,
- zamezení šíření částic mezi elektrodami, ať už jde o částice rozpustné nebo koloidální,
- rovnoměrnost a snadná smáčivost v elektrolytu

3.4.4 Elektrolyty

Jednou z klíčových součástí baterie je elektrolyt, jehož úkolem je vedení iontů mezi elektrodami. Elektrolyt je také důležitý pro posouzení kapacity, cyklické životnosti a bezpečnosti dané baterie. Z ekonomického, chemického a fyzikálního pohledu jsou na vlastnosti elektrolytů kladeny velmi vysoké požadavky. Elektrodový materiál a elektrolyt jsou při výrobě nejdražší součástí baterie. Elektrolytem bývá nejčastěji lithná sůl například LiPF₆, která je rozpuštěná v organickém rozpouštědle. Například používané směsi EC/DMC obsahující jeden mol LiPF₆ mají 5V široké elektrochemické okno a jsou tekuté i při teplotách -20°C. Aby bylo možné dosáhnout požadovaných vlastností pro elektrolyt, využívá se kombinovaných rozpouštědel, přičemž jedna složka bývá viskózního typu s vysokou relativní permitivitou (ethylen karbonát) a druhá složka je slabě viskózní s nízkou relativní permitivitou (dimethyl karbonát nebo ethylmethyl karbonát). Rozpouštědlové směsi disponují vlastnostmi jako jsou například dobrá iontová

vodivost a schopnost pasivovat hliníkový proudový kolektor. Materiál, který je použitý v baterii může způsobit nebezpečí tepelného rozkladu. Většina materiálů, které jsou součástí baterie jsou hořlavé. Ke vznícení elektrolytu anebo k jeho explozi může dojít při přebíjení, přehřátí anebo při mechanickém poškození baterie [10].

Funkce elektrolytu v bateriích [10]:

- během používání baterie zajistit, aby se uzavřel elektrický obvod pomocí iontového kontaktu mezi elektrodami,
- zamezit vzniku zkratu mezi elektrodami,
- elektrolyt slouží jako úložiště reakčních produktů v případě elektrochemického systému, ve kterém se elektrolyt účastní elektrodových reakcí

3.4.4.1 Typy elektrolytů

Pevné a gelové elektrolyty

Hranice mezi pevným a gelovým elektrolytem není přesně definovatelná. Záleží na obsahu změkčovadel v polymerním materiálu. Mezi hlavní výhody oproti kapalným elektrolytům patří snížené nároky při výrobě a manipulaci s bateriemi během výroby. Zároveň také nehrozí únik elektrolytu z baterie v případě porušení hermetičnosti pouzdra. Tato forma elektrolytu poskytuje velkou flexibilitu mechanického provedení baterií, lze je vyrobit v jakémkoli tvaru a tloušťce. Dokáže také tolerovat objemové změny elektrod během nabíjení a vybíjení. Nespornou výhodou je lepší elektrochemická stabilita, minimální hořlavost a menší korozivita. Tím, že odpadá nutnost použít separátor, lze dosáhnout vyšší hustoty energie. Typickým zástupcem tuhého polymerního elektrolytu je poly(ethylenoxid), ve kterém je rozpuštěna lithná sůl. Další používané polymerní materiály jsou polyakrylonitril (PAN), poly-methylmetakrylát (PMMA) a poly(vinylidenfluorid) (PVDF). Tyto materiály vykazují dostatečnou iontovou vodivost až při vyšších teplotách (40-100°C). V případě gelů složených z organických rozpouštědel, lithných solí a polymerových materiálů bylo dosaženo uspokojivé vodivosti při teplotě 30 °C, nevýhodou byla objemová nestabilita [35].

Kapalné elektrolyty

Kapalné elektrolyty se primárně skládají ze směsi organických rozpouštědel a lithných solí. Další složky zajišťují vyšší stabilitu elektrolytu, širší pracovní teplotní rozsah, snižují hořlavost a určují tak i výkon a vlastnosti výsledné baterie. Významnou skupinu příměsí tvoří zpomalovače hoření na bázi fluorovaných a fosfor obsahujících molekul. Elektrolyt se zásadním způsobem podílí na bezpečnosti baterie. Proto je snaha používat rozpouštědla s vysokým bodem vzplanutí, nebo jinak omezit riziko požáru či exploze v případě selhání baterie [35].

Alternativou pro hořlavé kapalné elektrolyty se jeví použití iontových kapalin. Mezi hlavní výhody patří nízký tlak par, nehořlavost, vysoká teplotní stabilita a dobrá rozpustnost lithných solí. Potenciálové okno je širší než u konvenčních elektrolytů a činí 5,3 V vůči lithiu. Zásadním omezením je vyšší viskozita, tudíž i snížená iontová vodivost.

Nejzásadnější je však to, že netvoří dostatečně odolnou vrstvu pevného elektrolytu na anodě, což vyžaduje použití aditiv, které tvorbu této vrstvy stimulují. Příkladem takového aditiva je vinyl karbonát [35].

3.4.4.2 Lithná sůl

Rozpuštěná lithná sůl v organickém rozpouštědle zajišťuje možnost přechodu lithiových iontů mezi elektrodami. Lithné soli jsou produkty reakce lithiových sloučenin s kyselinami, ty mohou být anorganické nebo organické. Lithium tvoří také podobné sloučeniny jako jsou lithné soli s fluorem, chlorem, bromem a jódem. Existuje mnoho solí obsahujících lithium, pro použití v elektrolytech lithium iontových baterií lze použít pouze některé z nich. Důvodem je jejich omezená rozpustnost, lze uvést například LiF a LiCl [35].

Lithium hexafluorofosfát (LiPF₆)

Jedná se o nepoužívanější lithnou sůl, která nabízí přijatelné vlastnosti, hlavní nevýhodou je navlhavost, ta způsobuje hydrolyzu a následnou degradaci baterie. Podstatná je také teplotní citlivost, tepelná dekompozice nastává již při teplotě 85 °C [35].

Lithium tetrafluorborát (LiBF₄)

Tato lithná sůl vykazuje menší náchylnost k hydrolyze vodou. Vykazuje dobré pasivační účinky na proudový kolektor katody a vykazuje také lepší teplotní stabilitu. Mezi důvody, proč není více rozšířená patří horší tvorba vrstvy pevného elektrolytu a nižší iontová vodivost [35].

Lithium-bis(trifluormetansulfonyl)imid (LiTFSI)

Tento materiál vykazuje dobré vlastnosti elektrochemické i teplotní stability, rozkládá se až při 234°C. Tvoří stabilní vrstvu pevného elektrolytu a vykazuje uspokojivou iontovou vodivost. Zásadní jsou však její silné korozivní účinky na proudový sběrač katody, netvoří pasivační vrstvu tak jako jiné lithné soli. Tuto nevýhodu lze odstranit přidáním 5 mol% LiPF₆. Tato lithná sůl se hodí pro použití s iontovými kapalinami [35].

Lithium-bis-(fluorsulfonyl)imid (LiFSI)

Svémi vlastnostmi tato sůl připomíná LiTFSI včetně elektrochemické stability a tepelné odolnosti (200 °C). Vykazuje nejvyšší iontovou vodivost a nenarušuje pasivační vrstvu hliníkového proudového kolektoru. Musí však být vyrobena ve velmi čisté formě, i malá koncentrace nečistot způsobuje závažnou korozi [35].

Další potenciálně vhodné sloučeniny se komerčně nepoužívají pro svou vysokou toxicitu, respektive nebezpečnost (LiAsF₆ a LiClO₄). Použití je omezeno pouze v laboratorním měřítku [35].

3.4.5 Rozpouštědla

Do rozpouštědel se řadí látky, ve kterých lze jiné látky rozpustit, aniž by došlo k chemické reakci a které lze z látky odstranit, aniž by došlo ke změně složení rozpouštědla. Nejvíce obecně využívaným rozpouštědlem je voda. Za bezvodá rozpouštědla byla dlouho považována anorganická rozpouštědla. V rozpouštěcím procesu však nejde pouze o rozpouštění cizí látky, která je do rozpouštědla vložena, ale také o molekuly samotného

rozpouštědla. Jedná se o tzv. zahušťovací proces. Mezi protická rozpouštědla patří voda, alkoholy, amoniak a další látky, které tvoří vodíkové vazby. Pro výběr vhodného rozpouštědla je důležité [10]:

- rozsah teplot od -50 do +50 °C pro kapalné skupenství
- aby se zamezilo ztrátám nebo nebezpečí vzniku exploze je nutné zajistit nízký tlak par až do maximální pracovní teploty
- vysoká relativní permitivita
- dobrá rozpustnost pro kationy i aniony
- malá viskozita a malá molární hmotnost, aby byla zajištěna vysoká pohyblivost iontů
- chemická stálost vůči elektrodovému materiálu, dostupnost, nízká cena, snadná čistitelnost a co nejmenší toxicita

Rozpouštědla používaná v elektrolytech lithium iontových baterií musí být aprotická, aby nedocházelo k nežádoucím chemickým reakcím s lithnými soli a elektrodami. Mezi aprotická polární rozpouštědla patří acetonitril, pyridin, ethylacetát a další organická rozpouštědla, která netvoří vodíkové vazby [10].

3.4.5.1 Typy rozpouštědel používaných v lithium iontových bateriích

Předpoklad pro použití daného rozpouštědla v elektrolytu je široké elektrochemické okno. Tuto vlastnost mají organické estery kyseliny uhličitě, které mají i velkou polaritu. Klíčový požadavek je také nízká elektrická vodivost. Komerční lithium iontové baterie používají jedno nebo více rozpouštědel současně [35].

Propylen karbonát (PC)

Jedná se o první organické rozpouštědlo, které používala firma SONY ve svých bateriích v roce 1990. Mezi jeho výhody patří schopnost rozpouštět různé lithné soli, zároveň má nízkou viskozitu a velmi nízký bod tání, který je - 49°C. Největší nevýhoda je jeho dekompozice při kontaktu s anodou, to vedlo k rychlému poklesu kapacity baterie. Jeho makromolekulární charakter vedl k expanzi grafitových vrstev, což vede k rozpadu anodového materiálu [35].

Ethylen karbonát (EC)

Představuje rozpouštědlo, které má srovnatelnou viskozitu jako propylen karbonát a větší permitivitu než voda. Ve své čisté formě se nepoužíval, protože jeho bod tání je pro praktické účely příliš vysoký (36 °C). Později se však ukázalo, že v kombinaci s propylen karbonátem vytváří vrstvu pevného elektrolytu na anodě, která se vytvoří při prvním nabíjecím cyklu. Tato vrstva chrání anodu před mechanickou degradací. Tím je zajištěna minimální ztráta kapacity [35].

Diethyl Karbonát (DEC), dimethyl karbonát (DMC) a ethylmethyl karbonát (EMC)

Patří do skupiny lineárních karbonátů. Ty mají v porovnání s výše zmíněnými cyklickými karbonáty nižší viskozitu, větší iontovou vodivost, nižší bod tuhnutí. Jejich permitivita je nižší než u cyklických karbonátů [35].

3.5 Výhody a nevýhody Li-Ion baterií

Baterie typu Li-Ion se staly součástí velkého množství výrobků a poptávka po nich nadále roste. S Li-Ion baterie se lze setkat v noteboocích, mobilních telefonech, termálních zbraních, kosmických lodích, letadlech, družicích a v mnoha dalších aplikacích [7]. I přes neutuchající rozvoj a zlepšování této technologie stále nemohou stačit všem nárokům, které jsou na ně kladeny. Tyto nároky jsou často protichůdné a naráží na fyzikální limity zatím dostupných technologií. Pro mobilní aplikace je vyžadován co nejdelší čas provozu na baterii. Dochází tak k neustálému zvyšování měrných kapacit baterií na úkor životnosti. Velký důraz je kladen na zvyšování teplotní odolnosti a prodlužování životnosti.

Mezi výhody Li – Ion baterií patří [7]:

- velký rozsah teplot Li-Ion baterie (-40 °C až 60 °C),
- životnost Li – Ion baterie (500 až 2000 cyklů)
- bezúdržbovost Li-Ion baterií,
- dlouhá skladovatelnost
- nízká hodnota samovybití (zhruba 5 % za měsíc),
- nulový paměťový efekt,
- vysoký výkon,
- značná specifická energie (až 200 Wh/kg)
- vysoké napětí článku (2,5 V až 4,2 V),
- široká škála fyzického provedení

Mezi nevýhody Li – Ion baterií patří [7]:

- vysoká cena
- náročnost výroby
- degradace elektrodových materiálů při vyšších teplotách než 60 °C a při nízkých teplotách -40 °C,
- nutnost použití ochranných obvodů,
- vysoké provozní proudy urychlují degradaci baterie a snižování kapacity

3.6 Charakteristické vlastnosti Li-Ion baterií

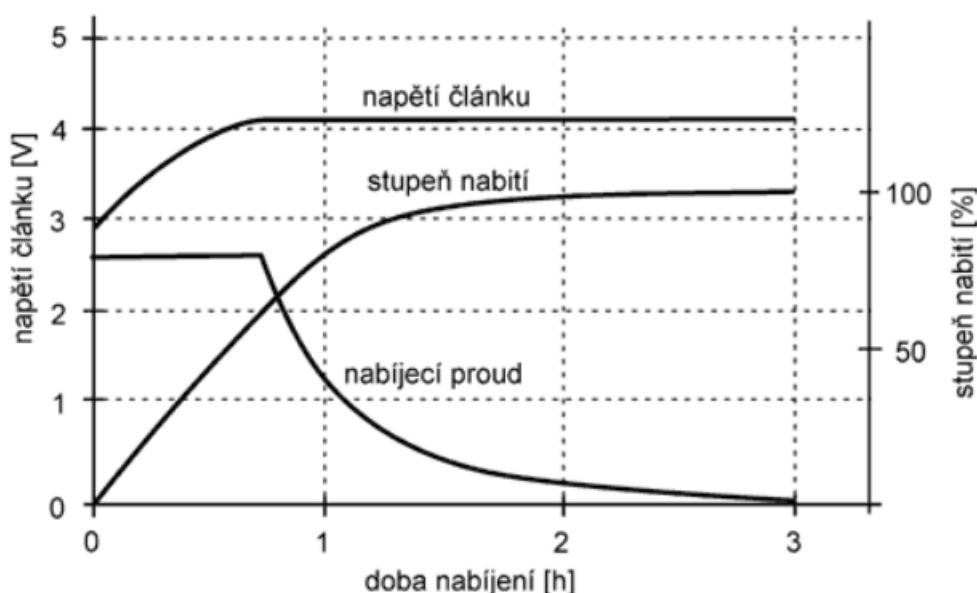
Za výhodné vlastnosti Li-Ion baterií považujeme zejména vysoké pracovní napětí baterie, které dosahuje hodnoty 3,7 V, výhodný poměr energie na jednotku hmotnosti, vysoká hustota energie, vysoký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů (více než 1500 cyklů), nízká hodnota samovybití (méně než 8 % kapacity za měsíc). U baterií typu Li-Ion nenastává paměťový efekt. U Ni-Cd baterií nastává paměťový efekt v případě, že baterie není plně vybita předtím, než je znovu nabita. Oproti Ni-MH bateriím nedochází u baterií typu Li - Ion k efektu líné baterie. Tento efekt se projevuje poklesem pracovního napětí baterie. Lithium-iontové baterie také neobsahují žádné toxické prvky, které by škodily životnímu prostředí a není nutné je opakovaně vybíjet a nabíjet. U lithium-iontových

baterií lze snadno indikovat stav nabití baterie díky výrazné změně napětí na baterii během procesu vybíjení. Jelikož jsou však Li-Ion baterie náchylné na přebíjení a podvybíjení, musí obsahovat dodatečné řídicí elektronické obvody. K trvalému poškození baterie dojde při poklesu napětí během vybíjení pod dovolenou mez. Oproti Ni-Cd bateriím mají Li-Ion vysokou minimální provozní teplotu - 20 °C. V porovnání s bateriemi Ni-Cd disponují Li-Ion velkou vnitřní rezistivitou. Limitovány jsou také maximálním vybíjecím proudem, který dosahuje přibližně dvojnásobku jmenovité kapacity (2C). V případě, že nejsou Li-Ion baterie používány, pak dochází k výraznějšímu stárnutí baterie. Možná skladovatelnost Li-Ion baterií by měla být max 6 měsíců od data výroby. Teplota při skladování by neměla být vyšší než 20°C. Baterie je třeba skladovat v částečně vybitém stavu, asi 40 % plného nabití baterie [12].

3.6.1 Charakteristické průběhy Li-Ion baterií

Lithium iontové baterie svým principem funkce vykazují jisté charakteristické vlastnosti, které se odráží v časových průbězích elektrických a jiných veličin. Interkalace iontů lithia do aktivního materiálu kladné elektrody při vybíjení a do záporné elektrody při nabíjení vytváří typické průběhy napětí a proudu v čase. Z těchto průběhů lze určit nábojovou, energetickou účinnost a vyhodnotit dílčí přírůstky náboje vzhledem k napětí a podobně [17].

Nabíjecí charakteristika

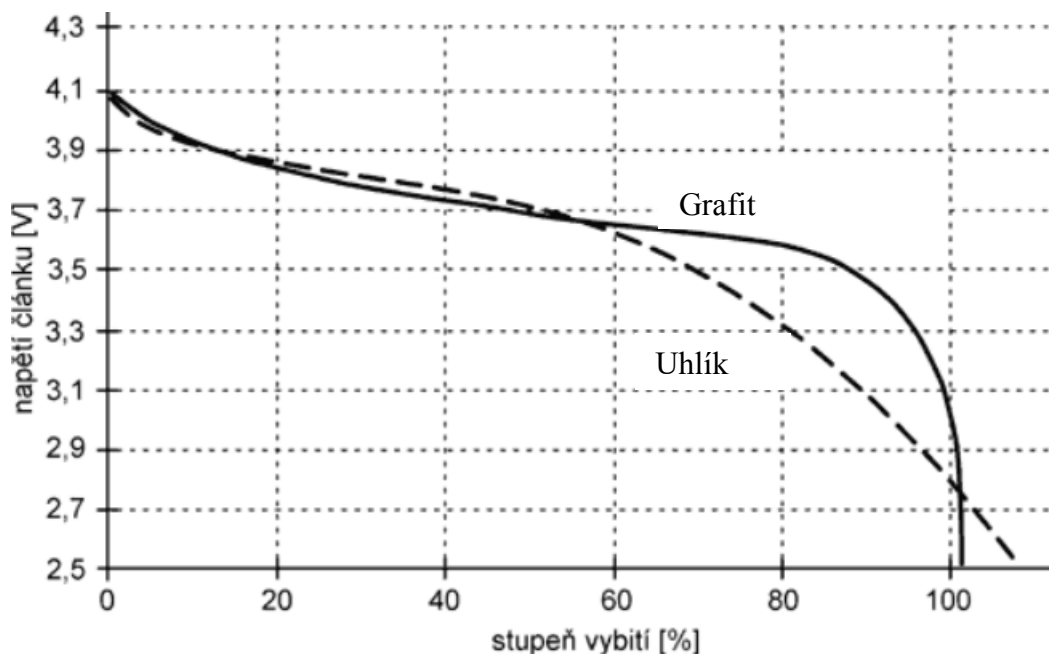


Obrázek 8 Průběh proudu a napětí [17]

Zobrazený průběh nabíjení baterie Li-Ion platí pro proud 1 C. Baterie se v první fázi nabíjí stálým proudem do té doby, dokud napětí nedosáhne konečného nabíjecího napětí. Jakmile napětí baterie dosáhne hodnoty konečného nabíjecího napětí, je pak nabita zhruba na 70 % původní kapacity [17].

Baterie je v druhé fázi nabíjena stálým napětím, nabíjecí proud se snižuje. Jakmile nabíjecí proud poklesne na stanovenou hodnotu nabíjecího proudu, lze ji považovat za nabitou. Postupně se nabíjecí proud blíží k nulové hodnotě, nabíjení je však ukončeno dříve, aby nedocházelo ke snižování životnosti baterie. Díky tomuto ošetření nedochází k přebití baterie [17].

Vybíjecí charakteristika



Obrázek 9 Vybíjecí křivka Li-Ion baterie [17]

Čárkovaná křivka na obrázku je průběh napětí v závislosti na stupni vybití pro baterii s uhlíkovou anodou. Nepřerušovaná křivka je průběh napětí v závislosti na stupni vybití pro baterii s grafitovou anodou. V první fázi je vidět relativně velký pokles napětí, který je následován širokou oblastí s malou relativní změnou napětí v závislosti na vybití. V poslední části je vidět prudký pokles napětí, ten je způsoben mimo jiné zvýšením vnitřního odporu baterie [17].

3.6.2 Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)

Jedná se o měřicí metodu experimentálního charakteru, která zkoumá reakci elektrochemického systému na budící signál a z veličin napětí a proudu závislých v čase se matematicky počítá impedance Z^* , která je komplexní. Budící signál je sinusového tvaru malé amplitudy při různých frekvencích. Toto měření probíhá v rozsahu 10^{-6} až 10^6 Hz. EIS dokáže zachytit nejenom pomalé difúzní děje ale i rychlé děje mezi které patří přenos elektrického náboje. Aby bylo možné správně změřit elektrochemickou impedanční spektroskopii, je nutné nejprve zvolit vhodnou velikost amplitudy. Odezva elektrochemického systému musí zůstat lineární a nesmí dojít k nevratným změnám v měřeném systému, budící signál nesmí baterii nabíjet ani vybit. Elektrochemická

impedanční spektroskopie je neinvazivní oproti jiným elektrochemickým analytickým metodám. Výsledek měření je impedanční spektrum měřeného elektrochemického systému. Toto spektrum je zobrazené v semilogaritmickém zobrazení jako Bodeho diagram nebo v komplexní rovině jako Nyquistův diagram. Oblast nízkých frekvencí popisuje pomalé difúzní děje lithiových iontů. Toto chování popisuje Warburgova impedance. V oblasti středních frekvencí dochází k projevům přenosu náboje, diagram popisuje kinetiku nábojů. Tato část je charakteristická tím, že začátek i konec je nejbližší reálné osy. V oblasti středně vysokých frekvencí lze touto metodou popsat jevy, které probíhají na rozhraní pevného elektrolytu. V oblasti nejvyšších frekvencí se projeví indukční charakter přívodu a elektrody ale i samotného měřicího přístroje. Tato oblast se pro analýzu nepoužívá a zpravidla se vyhodnocují naměřené body pouze v prvním kvadrantu Bodeho diagramu [44].

3.7 Degradanční vlivy Li-Ion baterií

Degradanční vlivy a procesy se přímo podílejí na změně zásadních vlastností, užitné hodnotě a životnosti lithium iontových baterií. Rychlost a stupeň degradace Li-Ion baterií je ovlivněn mnoha faktory. Každá komponenta Li-Ion baterie trpí jiným degradačním mechanismem. Nejvýrazněji se na degradaci baterií podílejí následující degradační mechanismy ztráta množství lithiových iontů, které se účastní interkalačních procesů, ztráta aktivních hmot kladné a záporné elektrody, ztráta elektrolytu, nárůst vnitřního odporu baterie. Tyto degradační mechanismy jsou popsány v následující části [1]. Faktory ovlivňující degradační vlivy jsou konstrukce baterie, konstrukce bateriové sestavy, dodržení výrobních podmínek (vlhkost, plnění baterií elektrolytem, první formovací nabíjecí cyklus a stárnutí materiálu). Další faktory souvisí s používáním baterie a provozními vlivy (vysoké teploty, nízké teploty, provozní proudy, skladování a čas strávený v plně nabitém nebo v plně vybitém stavu) [1].

3.7.1 Tvorba pasivační vrstvy anody – SEI

SEI (Solid Electrolyte Interface – Vrstva pevného elektrolytu) je vrstva tvořená elektrolytem, který je v tenké vrstvě pevný, ale pro lithiové ionty prostupný. Zbytek elektrolytu, který není v kontaktu s aktivním materiálem anody zůstává v kapalném stavu. Vytvoření pevné mezifázové vrstvy (SEI) je uskutečněno v průběhu prvního nabíjecího cyklu na povrchu anody, tento proces se nazývá formování. Vrstva SEI není vodivá pro elektrony, ale pouze pro lithiové ionty. Dochází však k absorpci lithiových iontů během tvorby SEI vrstvy, což způsobuje nevratnou ztrátu kapacity. Při návrhu a výrobě baterie je nutné počítat s úbytkem lithiových iontů z elektrochemického systému. Samotná vrstva SEI je relativně stabilní a její tloušťka se během cyklování zásadně nemění, i přesto má však zásadní vliv na vlastnosti lithium iontové baterie [1]. Jedním z hlavních důvodů nárůstu tloušťky této vrstvy je přítomnost vlhkosti. Ta způsobí vyloučení kovu z materiálu katody. Další účinek vlhkosti je praskání částic aktivního materiálu. Zvýšení impedance anody a přenosového odporu je způsobeno vznikem pasivační vrstvy na

povrchu anody, která vytváří odpor toku iontů lithia. Impedance roste s počtem cyklů, teplotou, velikostí částic anody a také s rychlostí nabíjení. Pokud je použit větší nabíjecí proud a vyšší teplota, pak se hodnota impedance zvětšuje, neboť dojde k tvorbě silnější povrchové vrstvy SEI [1].

3.7.2 Ztráta množství aktivních lithiových iontů

Tato nevratná změna je zapříčiněna tvorbou vrstvy SEI a reakcí iontů lithia s rozloženými složkami elektrolytu a s vodou, která je v elektrolytu obsažena jako nežádoucí nečistota. Lithiové ionty jsou nuceny vrstvou tunelovat, neboť vrstva SEI jim brání v průchodu. U katod existuje podobný degradační mechanismus, který při skladování baterie při vyšším napětí jak 3,96 V, způsobí oxidaci elektrolytu u katody, produkty těchto nežádoucích chemických reakcí tvoří vrstvu, která se nachází v bezprostřední blízkosti katody. Takto vzniklá vrstva je izolační a dokáže způsobit nehomogenitu toku elektrického proudu na povrchu katody. Výsledkem ztráty množství aktivních lithiových iontů je pokles kapacity bez výrazného vlivu na výkon baterie [1].

3.7.3 Ztráta aktivního materiálu elektrod

Tento degradační proces souvisí se strukturou aktivního materiálu elektrod, způsobuje totiž jeho rozpad. Příčin může být mnoho, mezi hlavní patří rozpad částic aktivní hmoty, vyloučení částice metalického kovu z katodového materiálu, expanze vrstevnaté struktury anody (grafit), ztráta vlastností pojiva aktivních materiálů, objemové změny a elektrochemická koroze proudových kolektorů. Tento proces se podílí na ztrátě kapacity baterie ale i na ztrátě výkonu. Například mechanické napětí grafitové mřížky je způsobeno cyklováním Li-Ion baterií velkým proudem. Orientace a uspořádání původní struktury snižuje mechanické napětí, které způsobuje trhliny a praskliny aktivní vrstvy [1].

3.7.4 Ztráta elektrolytu a nárůst odporu

Ztráta elektrolytu v důsledku tvorby SEI vrstvy je do jisté míry spojená s nárůstem vnitřního odporu, pokud dojde k následujícím změnám [1]:

- Povrchové a objemové změny vně i uvnitř elektrod
- Vznik rozhraní katoda-elektrolyt
- Nárůst SEI vrstvy

Jak již bylo zmíněno výše, úbytek elektrolytu nastává z důvodu tvorby SEI vrstvy, ale i z důvodu tvorby rozhraní katoda-elektrolyt. Tyto vrstvy kladou dodatečný odpor k přechodu iontů v prostředí mezi elektrodami a podílí se tak negativně na změně vlastností baterie, převážně na nárůstu vnitřního odporu [1].

3.7.5 Degradační vlivy v závislosti na teplotě

Vysoké teploty mají zásadní vliv na vlastnosti baterie, její životnost, ale i bezpečnost. Chemické reakce, respektive jejich rychlost, jsou přímo spojeny s teplotou. Za nízkých teplot dochází ke zvyšování viskozity elektrolytu a snížení iontové vodivosti, to může

způsobit nevratné změny v důsledku pokovení anody kovovým lithiem. V důsledku nerovnoměrnosti tohoto procesu může dojít ke zkratu v důsledku lithiových dendritů. Při teplotách okolo -30°C rozpouštědla komerčních elektrolytů tuhnu. To s sebou může nést nevratné poškození baterie, pokud dojde ke vzniku nehomogenit a povrchových změn v důsledku rozdílné tepelné dilatace komponent baterie [45].

3.7.6 Vliv vysokých teplot na degradaci a bezpečnost

Vysoké teploty urychlují stárnutí baterie během skladování i používání a v extrémních případech mohou vést až ke katastrofickému selhání baterie v důsledku tepelné dekompozice. Zvýšené teploty nad rámec pokojových teplot mají za následek urychlení selhání pojiv částic aktivních materiálů kladné elektrody. Teploty nad 85°C mají velice nepříznivý vliv na elektrolyty protože nastává rozklad nejčastěji používané lithné soli. Elektrolyt se rozpadá na volné reaktivní radikály, které mají tendenci dále reagovat s materiálem elektrod. Tyto reakce jsou exotermické a pokud by docházelo k dalšímu nárůstu teploty, byla by ohrožena SEI vrstvy, to se děje při teplotách nad $100-130^{\circ}\text{C}$. Následně dochází k reakci anody a elektrolytu při teplotách $110-290^{\circ}\text{C}$. Při dosažení teplot $220-400^{\circ}\text{C}$ dochází k reakci mezi anodou a separátorem. Na straně kladné elektrody se teploty tepelného rozkladu liší podle použitého katodového materiálu. Nejnižší odolnost vykazuje materiál LCO ($178-250^{\circ}\text{C}$) a LiNiCoO_2 ($175-340^{\circ}\text{C}$). Exotermická je také reakce katody a elektrolytu, která nastává při teplotách $167-300^{\circ}\text{C}$. Celkový rozpad elektrolytu nastává při teplotách $225-300^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k exotermickému charakteru všech zmíněných reakcí dochází k vytvoření pozitivní zpětné vazby. Lze říci, že čím je teplota baterie větší, tím je větší množství uvolňovaného tepla. Pokud se v bateriové sestavě nezohlední možný přenos tepla mezi moduly, nebo jednotlivými bateriemi, může dojít k zahřevání celé sestavy od jednoho vadného bateriového článku, na kterém vzrostla teplota nad úměrnou mez přebíjením, mechanickým poškozením nebo vnitřním zkratem [45].

3.7.7 Degradací vlivy za zvýšených teplot

Zvýšené teploty urychlují chemické reakce, ovlivňují elektrochemické potenciály a zvyšují kinetiku částic a iontovou vodivost elektrochemického systému. Baterie mohou být vystaveny spektru zvýšených teplot z mnoha různých důvodů. Mezi hlavní patří zvýšená okolní teplota baterie, zahřívání vlivem procházejícího proudu a nedostatečné chlazení baterie. Vývin tepla je spojen hlavně s procesem nabíjení a vybíjení. Lze rozlišit procesy, které způsobují vývin tepla na vratné a nevratné. Vratné procesy souvisejí se změnou entropie elektrochemických reakcí. Nevratné procesy souvisí s polarizačními procesy (přenos náboje), Jouleovo teplo, které vzniká průchodem náboje skrz rozhraní pevných a kapalných prostředí. Další procesy generující teplo souvisí s nehomogenitami rozložení toku nábojů a difuzí lithiových iontů [45].

Hlavní proces, který je urychlen zvýšenou teplotou je dekompozice lithné soli za přítomnosti malého množství nečistot. Za normálních teplot je tato reakce pomalá a lze ji považovat za normální součást kalendářního stárnutí. Za zvýšených teplot se stává

významnou. Zlomovou teplotou pro tento proces je 45°C, se zvyšující se teplotou dochází k urychlení. Zvýšené teploty mají vliv na SEI vrstvu a pojava aktivních materiálů. Pojiva v těchto teplotách mohou pomalu přecházet směrem k povrchu elektrody a zhoršit interkalační procesy. Účinky na SEI vrstvu zahrnují snížení množství organických sloučenin rozpouštědel a zvýšení obsahu anorganických sloučenin. To způsobuje nárůst impedance lithium iontových baterií. Zvýšené teploty sice zvyšují kapacitu baterie v krátkodobém hledisku, ale zároveň výrazně urychlují její degradaci. Obecně lze shrnout vliv zvýšené teploty v dlouhodobém hledisku degradací elektrodových materiálů, kdy je ovlivněna povrchová i objemová struktura a rozhraní mezi elektrolytem [45].

3.7.8 Další faktory ovlivňující degradační vlivy

Vlastnosti anody ovlivňuje velikost částic grafitu. Malé částice s menší difúzní délkou umožňují rychlejší nabíjení a vybíjení baterie. Při teplotě vyšší jak 60 °C způsobuje větší povrch menších částic grafitu větší náchylnost k vnitřnímu zahřívání. Elektrické propojení grafitových částic je sníženo zvýšením porozity. Póry u více porézního materiálu slouží jako reakční místa v průběhu jeho rozkladu. Zmenšením aktivního povrchu, kde dochází k reakci anody a elektrolytu, je docíleno snížením porozity v důsledku větší hustoty částic. Čím bude grafitový materiál hustší, tím bude nevratná kapacita menší. Na velikosti částic je velmi závislá teplotní stabilita grafitové anody. Při teplotě nad 120 °C se z materiálu uvolní plyny [1].

Faktory, které způsobují vytvoření lithiové vrstvy na povrchu anody na místo procesu interkalace jsou například vlastnosti elektrolytu, poměr mezi kapacitou anody a katody, pracovní teplota a rychlost nabíjení. Nepravidelná orientace krystalové struktury materiálu a nehomogenita rozložení elektrického proudu ovlivňují tvorbu kovové lithiové vrstvy. Dendrity vzniklé vytvořením lithiové vrstvy dokáží separátor propíchnout. Takto vzniklá struktura lithia a dendritů může vést až ke zkratu a teplotní nestabilitě [1].

Dalším významným faktorem ovlivňující degradaci je přítlak elektrod. Pokud není dostatečný, dochází ke ztrátě kapacity v důsledku úbytku aktivní plochy elektrod. Lithiové ionty nemohou procházet plochou, která není v kontaktu s elektrolytem. Na tento typ degradace jsou nejnáchylnější baterie typu pouch. Vysychání elektrolytu v důsledku zvětšení objemu baterie nebo porušení hermetičnosti jsou další z typických degradačních příčin [45].

3.8 Péče o Li-Ion baterie

Aby Li-Ion baterie spolehlivě a dlouho sloužily, je třeba o ně pečovat. Všechny baterie a Li-Ion nevyjímaje, podléhají přirozenému stárnutí, kterému nelze nijak zabránit. I když tomuto procesu stárnutí nelze zabránit, lze jej alespoň minimalizovat. Není vhodné baterii uskladňovat ani vybitou ale ani plně nabitou. Za ideální je považováno 50 % plného nabití. Baterii je tedy vhodné dobít na 100 % až v případě, kdy bude používána. Životnost baterie se touto manipulací může až ztrojnásobit. Baterii je vhodné skladovat v chladném místě nikoliv však v mrazu. Vysoké teploty ji také škodí [13].

3.9 Použití a aplikace Li-Ion baterií

Lithium iontové baterie jsou dnes využívány ve velmi široké škále aplikací. Díky jejich vysoké energetické hustotě a vysokému specifickému výkonu se hodí pro napájení přenosných a mobilních zařízení. Lze zmínit například nositelnou elektroniku, mobilní telefony, tablety, notebooky a pracovní stanice. Mezi mobilní aplikace pak lze zařadit trakční aplikace jako jsou například elektromobily, elektrokola a zařízení osobní mobility obecně. Díky klesající ceně Li-Ion baterií se otevírá stále větší množství stacionárních aplikací jako jsou uložení energie pro použití s obnovitelnými zdroji nebo zařízení pro stabilizaci elektrické sítě. Speciální použití je také ve vesmírné a letecké technice. Ve vesmírné technice se dlouho používaly baterie typu Nikl-Vodík [15].

3.9.1 Použití v přenosných zařízeních

Mobilní telefony, chytré hodiny, notebooky a další spotřební elektronika využívá výhradně Li-Ion baterie hlavně pro jejich vysokou energetickou hustotu. Ta se neustále zvyšuje, a to vede k prodlužování životnosti zařízení na nabití. Zvyšování měrné kapacity se děje v posledních letech různými způsoby, jeden z nich je že se zvyšuje maximální nabíjecí napětí [15].

Takové baterie označujeme jako Li-HV (Lithium– high voltage– Lithiové baterie používající vysoké napětí). Jejich maximální nabíjecí napětí běžně dosahuje 4,4 V, což je značně vyšší oproti normálním typům Li-Ion baterií, které se nabíjí na napětí 4,2 V. Vyšší nabíjecí napětí musí být podmíněno použitím speciálních elektrolytů, které mají vysokou odolnost vůči vysokým napětím. Nelze však opomenout to, že takto vysoká nabíjecí napětí mohou zkrátit životnost baterie [15].

3.9.2 Použití v mobilních aplikacích

Baterie typu Li-Ion jsou vhodné pro trakční aplikace, protože poskytují vysokou měrnou energetickou a výkonovou hustotu, a to v objemovém i hmotnostním měřítku. Pro trakční aplikace jsou vhodné typy označované jako power cell, protože mají nízký vnitřní odpor a díky tomu vysokou zatížitelnost. V zásadě všechny prostředky osobní mobility používají výhradně baterie tohoto typu. Jedná se o elektrická vozidla, elektrokola, elektrokoloběžky a podobně [15].

3.9.3 Trakční aplikace a elektromobily

Při použití v elektromobilech je kladen velký důraz na bezpečnost, a to ať už se jedná o bezpečnost za běžných provozních stavů tak i za stavu poruchy, kolize s jiným vozidlem nebo pevnou překážkou a jiných stavech. Často je proto trakční baterie konstrukčně vyrobena z ocelového, nebo hliníkového svařence. Jednotlivé baterie jsou umístěny modulech, které jsou od sebe zpravidla oddělené [15].

3.9.4 Prostředky osobní mobility

Prostředky osobní mobility jako jsou elektrické koloběžky, kola, jednokolky a podobně mívají baterii o kapacitě řádově sto až tisíc watthodin. Bezpečnost je zajištěna hlavně systémem BMS, který se stará o eliminaci nedovolených stavů baterie. Chlazení těchto baterií je zpravidla pasivní. Existují případy, kdy elektrická koloběžka nebo elektrokolo začalo samovolně hořet díky tomu, že se baterie dostala do stavu teplotní dekompozice. Často se mohlo jednat o selhání ochranné elektroniky, nebo absenci, nebo selhání teplotních monitorovacích prostředků systému BMS [14].

3.9.5 Použití ve stacionárních aplikacích

Především klesající cena, relativně dlouhá životnost a vysoká efektivita zajistila to, že se tento typ baterií prosadil i v aplikacích jako jsou uložení elektrické energie (domácí i průmyslová), zařízení pro balancování elektrizační soustavy a zdroje nepřerušitelného napájení. U stacionárních aplikací není tak podstatné, jaká je objemová a hmotnostní energetická hustota, protože baterii není potřeba přemísťovat [15].

3.9.6 Nepřerušitelné zdroje napájení – UPS

UPS je zkratka pro Uninterruptible Power Supply – nepřerušitelný zdroj napájení. Ve zdrojích nepřerušitelného napájení Li-Ion baterie nahrazují olověné baterie díky klesající ceně a vyšší účinnosti při vyšších nabíjecích a vybíjecích proudech. Často lze provádět náhradu původních olověných baterií za lithiové baterie s železo – fosfátovou katodou (LFP). Při spojení čtyřech LFP baterií do série se nabíjecí i vybíjecí napětí blíží těm, které má spojení šesti olověných baterií v sérii. LFP baterie musí být opatřena systémem managementu baterie (BMS), aby byly zajištěny optimální provozní podmínky. Lze tedy nahradit 12 V olověnou baterii za Li-Ion LFP s nominálním napětím 12,8 V. Samozřejmě je nutné vynechat vyrovnávací nabíjecí fázi, protože napětí nad 3,6 V na baterii je pro LFP neprospěšné. Řada výrobců nabízí LFP monobloky určené pro UPS aplikace různých kapacit a formátů. Olověné baterie mají v UPS aplikacích pětiletou nebo desetiletou životnost. Li-Ion baterie představují alternativu, která potenciálně nabízí delší životnost [15].

3.9.7 Uložení energie

Uložení elektrické energie (Energy Storage Systems – ESS) jsou dnes populární doplněk k obnovitelným zdrojům elektrické energie – OZE, jsou ve své podstatě nestabilní ve smyslu toho, že zpravidla nedokážou dodávat stálý výkon po celou dobu sledovaného období. Proto je snaha je spojit s uložením elektrické energie, aby bylo možné zajistit dodávku energie i v době, kdy nesvíti slunce na fotovoltaické panely, nebo nefouká vítr, který by poháněl větrné elektrárny. Velká výhoda je, že tyto ESS systémy mohou sloužit i jako prostředky k vyrovnání potřeby a dodávky v elektrické síti, pokud jsou připojeny do řídicí sítě. Vyrábí se ve variantách určených pro použití v domácnosti a rodinnými domy a ve variantách pro průmyslové použití [16].

3.10 Ochranné a bezpečnostní prvky Li-Ion baterií

3.10.1 BMS systém

BMS je Systém managementu baterie (Battery Management System), který chrání baterii před nebezpečnými stavy, které by mohly ohrozit bezpečnost baterie. Jedná se o elektronický obvod, který monitoruje napětí jednotlivých článků v baterii a nedovolí překročení stanovených napěťových limitů. Zároveň obvod monitoruje teploty v baterii a proudy, které jí tečou. V případě, že dojde k překročení některé ze sledovaných veličin, dojde k odpojení celé baterie od zátěže nebo nabíječky. Odpojení se může uskutečnit pomocí rozepnutí mechanického kontaktu nebo polovodičového prvku. Tímto způsobem je zajištěna bezpečnost baterie i v případě, že dojde k poruše mimo baterii [46].

Tento systém je často vybaven mechanismy pro monitorování stavu nabití, zdraví a provozního stavu baterie. V určitých případech lze zaznamenávat i doplňkové informace jako je celkové množství nabitě a vybité elektrické energie, počet cyklů, stáří baterie, průměrná teplota, průměrné proudy a podobně. Slouží také jako nástroj diagnostiky lithium iontových baterií [46].

BMS může být integrován do baterie bez možnosti komunikace s napájeným zařízením, nebo s ním může komunikovat pomocí vyhrazené sběrnice, nebo pomocí jiného rozhraní například po Wi-Fi nebo BLE [46].

Používá se kdekoli jsou použity lithium iontové baterie pro jejich ochranu. Například ve spotřební elektronice, elektrických vozidlech, v úložištích energie a podobně [46].

3.10.2 Konstrukční bezpečnostní prvky Li-ion baterií

Zapouzdření lithium iontových baterií může být provedeno různými způsoby. V prizmatickém a válcovém provedení může být zakomponován PTC (kladný teplotní součinitel odporu – Positive Thermal Coefficient) prvek, který v případě vnějšího zkratu omezí protékající proud baterií. CID (Current Interrupt Device) je zařízení pro přerušování proudu tekoucího baterií v případě překročení limitního tlaku uvnitř baterie například v důsledku přebíjení. Při překročení určité hodnoty tlaku uvnitř baterie dojde k přerušování cesty proudu (při přebíjení). Zařízení plní ještě funkci přetlakového ventilu do té doby, dokud vnitřní tlak baterie nepřekročí určitou stanovenou mez (2,5 MPa). Poté dojde k protržení hliníkové membrány a uvolnění tlaku z baterie. Tím je vyloučena možnost exploze baterie [19].

3.11 Vývojové směry v oblasti Li-Ion baterií

Při příchodu Li-Ion na trh se vyráběly pouze v provedení malých válcových baterií. Dnes je situace jiná a Li-Ion baterie se vyrábí v široké škále provedení, některé speciální typy baterií mohou mít kapacitu až 10 kAh pro použití v ponorkách a podobně. Komerčně dostupné baterie mají kapacitu běžně až 280 Ah [23].

Celá výroba Li-Ion baterií se neustále zlevňuje díky vysokým objemům produkce, cena provozu LFP (lithium železo-fosfát) baterií je mnohdy srovnatelná a v určitých specifických aplikacích nižší než u olovených baterií [20].

Dnes se také používají velké pouch (sáčkové) baterie, které jsou součástí trakčních systémů. Jejich výhodou spočívá v dobrém využití dostupného objemu pro baterie, objemová hustota energie je vyšší než u použitých válcových baterií [19].

Snaha o navyšování měrné kapacity vede k novým inovativním složením elektrolytů a elektrodových materiálů. To umožňuje zvyšovat maximální nabíjecí napětí, tyto baterie jsou označovány jako LiHV (Lithium High Voltage), zvýšení kapacity je v rozsahu 10 - 15 % oproti standardním druhům. Napětí dnes dosahuje až 4,45 V. Kapacitu lze zvyšovat také vhodným složením aktivního anodového materiálu. Do grafitové elektrody se přimíchává křemík, který má oproti grafitu teoreticky až desetinásobnou měrnou kapacitu. V praxi má však pouze dvojnásobnou měrnou kapacitu oproti grafitu. Masivnímu rozšíření brání velká změna objemu při nabíjení a vybíjení. Objemové změny způsobují mechanické namáhání a selhání baterií, proto se dnes jeho zastoupení pohybuje do zhruba 20 % [21].

Zajímavou alternativou Li-Ion baterií představují baterie na bázi lithium-síra. Tento typ se zatím nedočkal jakékoliv komercializace díky problémům s krátkou životností. Provozní napětí se pohybuje v rozmezí 2,5 – 1,7 V. Jejich velkou výhodou spočívá ve velké měrné hustotě energie, která činí až 550 Wh/kg, což je zhruba dvojnásobek dnešních kapacit lithium-ion baterií. Teoretická energetická hustota dosahuje hodnot až 2600 Wh/kg. Anoda je tvořena kovovým lithiem a katoda je tvořena směsí síry a vodivého pojiva. Separátor je tvořen polypropylenem, stejně jako u baterií lithium-ion. Elektrolyt je tvořen tekutými organickými sloučeninami. Hlavním problémem baterií typu lithium-síra je jejich krátká životnost, ta je způsobena velkou objemovou roztažností materiálu elektrod a vznikem polysulfidů na katodě, který způsobuje úbytek aktivní hmoty, která se podílí na chemických reakcích. Ty jsou částečně rozpustné v elektrolytu, a tak dochází ke vzniku nežádoucích sloučenin, korozi anody, zvyšování vnitřního odporu a ztrátě kapacity [22].

Další alternativou jsou baterie na bázi lithium-vzduch, kdy anoda je tvořena lithiem a katoda vzduchovou elektrodou. Pracovní napětí se pohybuje v rozmezí 3,2-1,7 V. Teoretická energetická hustota by mohla dosahovat až 13 kWh/kg. Nevýhodou je nízká reaktivita za nízkých teplot a vysoký vnitřní odpor. V laboratorních podmínkách se podařilo dosáhnout životnosti až 50 cyklů. Vznik peroxidů lithia na anodě zvyšuje elektrický odpor. Nečistoty ve vzduchu urychlují degradaci. Princip funkce je podobný jako u baterií zinek-vzduch [18].

4. PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Návrh řešení

Navrhované řešení praktické části diplomové práce bylo proměřit parametry vybraných typů komerčních lithium-iontových baterií za běžných podmínek. Jedná se o kapacitu, účinnost, teplotní nárůst, vnitřní odpor a pokles kapacity. Měření se opakovalo za zvýšené teploty a proměřeny byly stejné parametry jako za běžných teplotních podmínek. Pozorován a zpracován byl také vliv teploty na vybrané charakteristiky lithium-iontových baterií. Všechny získané výsledky byly porovnány a zanalyzovány. Do zhodnocení byl také zaznamenán vliv zvýšené teploty na vybrané charakteristiky lithium-iontových baterií jak z krátkodobého, tak z dlouhodobého hlediska. Při měření za normálních podmínek (23 °C) a za zvýšených teplotních podmínek (45°C) byl dále experimentálně ověřen test schopnosti dodat požadovaný proud. Normální teplotní podmínky jsou označovány jako NT a zvýšené teplotní podmínky jako ZT. Na baterii LG MH1 byla před samotným začátkem měření provedena Impedanční spektroskopie, ta byla rovněž provedena po testu schopnosti dodat požadovaný proud (po 5 cyklech) a také na konci měření v termostatické komoře Venticell 22 ECO (po 200 cyklech).

4.2 Postup řešení

1. Nabodování baterií ve firmě Aku Energy s.r.o
 2. Umístění baterií do termostatické komory Venticell 22 ECO s připojením kanálů na BioLOGIC BCS-815 (Blok F a blok A – kanály F1, F2, F3, F4 a A5, A6, A7 a A8)
 3. Nastavení parametrů jednotlivých baterií dle aktuálních datových listů
- Baterie Goowei a baterie LG MH1 měly stejné nastavení parametrů

Tabulka 3 Nastavení parametrů Goowei a LG MH1 - 200 cyklů NT+ZT

Procedura	Nabíjení	Vybíjení
Proud	1,6 A	-1,6 A
Napětí	4,2 V	2,5 V
Hloubka vybíjení	-	100 %
Ukončovací proud	0,05 A	-
Počet cyklů	200 cyklů	
Maximální přípustná teplota	65 °C	

Baterie LFP

Tabulka 4 Nastavení parametrů LFP - 200 cyklů NT+ZT

Procedura	Nabíjení	Vybíjení
Proud	1,65 A	-1,65 A
Napětí	3,65 V	2,0 V
Hloubka vybíjení	-	100 %
Ukončovací proud	0,033 A	-
Počet cyklů	200 cyklů	
Maximální přípustná teplota	65 °C	

Baterie LTO

Tabulka 5 Nastavení parametrů LTO - 200 cyklů NT+ZT

Procedura	Nabíjení	Vybíjení
Proud	0,65 A	-0,65 A
Napětí	2,8 V	1,5 V
Hloubka vybíjení	-	100 %
Ukončovací proud	0,026 A	-
Počet cyklů	200 cyklů	
Maximální přípustná teplota	65 °C	

4. Spuštění měření za normálních teplotních podmínek a za zvýšených teplotních podmínek dle nastavení výše
5. Test schopnosti dodat požadovaný proud za normálních teplotních podmínek a za zvýšených teplotních podmínek

Baterie Goowei a LG MH1 měly stejné nastavení parametrů

Tabulka 6 Nastavení parametrů Goowei a LG MH1 - 5 cyklů NT+ZT

Procedura	Nabíjení	Vybíjení
Proud	1,6 A	-3,2 A (1C) / -6,4 A (2C) / -9,6 A (3C) / -12,8 A (4C)
Napětí	4,2 V	2,5 V
Hloubka vybíjení	-	100 %
Ukončovací proud	0,05 A	-
Počet cyklů	5 cyklů	
Maximální přípustná teplota	65 °C	

Baterie LFP

Tabulka 7 Nastavení parametrů LFP - 5 cyklů NT+ZT

Procedura	Nabíjení	Vybíjení
Proud	1,6 A	-3,3 A (1C) / -6,6 A (2C) / -9,9 A (3C) / -13,2 A (4C)
Napětí	4,2 V	2,5 V
Hloubka vybíjení	-	100 %
Ukončovací proud	0,05 A	-
Počet cyklů	5 cyklů	
Maximální přípustná teplota	65 °C	

Baterie LTO

Tabulka 8 Nastavení parametrů LTO - 5 cyklů NT+ZT

Procedura	Nabíjení	Vybíjení
Proud	1,6 A	-1,3 A (1C) / -2,6 A (2C) / -3,9 A (3C) / -5,2 A (4C)
Napětí	4,2 V	2,5 V
Hloubka vybíjení	-	100 %
Ukončovací proud	0,05 A	-
Počet cyklů	5 cyklů	
Maximální přípustná teplota	65 °C	

6. Impedanční spektroskopie na článku LG MH1 před začátkem měření, po testu schopnosti dodat požadovaný proud (5 cyklů) a po měření v termostatické komoře (200 cyklů)

4.3 Procedura GCPL

Procedura GCPL (Galvanic Cycling with Potential Limitation – Galvanické cyklování s napěťovou limitací). Slouží k definici parametrů použitých při měření baterií na měřícím zařízení BioLOGIC BCS-815. Nastavení procedury se ukládá do souborů s příponou mps. V této proceduře jsou obsaženy výše zmíněné parametry měření. Mezi zmíněné parametry, které lze nastavit, patří I_s (Proud baterií), I_m (Ukončovací proud), E_m (Napěťový limit), t_M (Doba potenciostatického režimu). Dále jsou zde obsaženy podpůrné parametry měření, například vzorkovací frekvence, rozsah měření, počet opakování a další [48].

4.4 Výpočet kapacity pro jednotlivé baterie použité při měření

Výpočet kapacity baterie vychází z množství náboje, který se dá vyjádřit jako proud, který tekl baterií po určitý čas [47]:

$$Q = I \cdot t \quad [Ah]; [A; h]$$

Výpočet energie baterie udává, kolik práce je schopna baterie dodat. Jedná se o součin elektromotorického napětí a kapacity baterie [47]:

$$P = U \cdot I \quad [W]; [V; A]$$

$$E = P \cdot t \quad [Wh]; [W; h]$$

$$E_{baterie} = U \cdot Q \quad [Wh]; [V; Ah]$$

Výpočet nábojové účinnosti popisuje procentní rozdíl mezi energií, která byla do baterie dodána při nabíjení a odebrána při vybíjení:

$$CE = \frac{C_{vyb}}{Q_{nab}} \cdot 100 \% \quad [\%]; \left[\frac{Ah}{Ah} \cdot 100 \right]$$

Výpočet celkového poklesu kapacity udává pokles kapacity, kterou je daná baterie schopná dodat při vybíjení v daném cyklu oproti předcházejícímu stavu. Například když byla baterie nová:

$$TCL = Q_{ini} - Q_{kon} \quad [Ah]; [Ah; Ah]$$

Relativní pokles kapacity je vztažen k počáteční kapacitě a lze ho spočítat následovně:

$$RTCL = 100\% \cdot \frac{Q_{ini} - Q_{kon}}{Q_{ini}} \quad [Ah]; [Ah; Ah]$$

Výpočet poklesu kapacity na cyklus udává ztrátu kapacity na jeden dílčí provedený cyklus. Index n udává číslo cyklu.

$$CLPC = Q_{n-1} - Q_n \quad [Ah]; [Ah; Ah]$$

Pokles kapacity na dílčí cyklus lze vyjádřit jako hodnotu vztaženou k přechozí hodnotě kapacity:

$$RCLPC = \frac{Q_{n-1} - Q_n}{Q_n} \cdot 100\% \quad [\%]; \frac{[Ah] - [Ah]}{[Ah]} \cdot 100\%$$

5. POPIS POUŽITÝCH KOMPONENT V PRAKTICKÉ ČÁSTI

V praktické části diplomové práce byly použity následující typy lithium-iontových baterií. Jednalo se o modely:

- Goowei 18650 v množství 2x
- LG MH1 v množství 2x
- LFP-26650-3300 v množství 2x
- LTO 1865-13 v množství 2x

4 typy baterií byly nejprve měřeny za normálních podmínek při teplotě 23,8 stupňů Celsia. Nabíjené baterie byly umístěny do měřicího zařízení BioLogic BCS-815 v bloku F (F1, F2, F3 a F4), kde bylo k jednotlivým bateriím připojeno teplotní čidlo. Testované baterie byly vybíjeny a nabíjeny nepřetržitě po 200 cyklů.

Dále byly 4 typy baterií měřeny za zvýšených teplot. Teplota během měření byla nastavena na 45 °C. Nabíjené baterie byly umístěny do termostatického zařízení Venticell 22 ECO. Baterie byly připojeny k cyklovači BioLogic BCS-815 v bloku A (A5, A6, A7 a A8). V termostatickém zařízení Venticell 22 ECO byly k jednotlivým bateriím připojena teplotní čidla.

Zvoleny byly následující testovací režimy:

Tabulka 9 Testovací režimy

Cyklování	Nabíjení	Vybíjení	Počet cyklů
Cyklování za pokojové teploty 23°C	0,5C	0,5C	200 cyklů
Cyklování za zvýšené teploty 45°C	0,5C	0,5 C	200 cyklů
Test schopnosti dodat požadovaný proud - pokojová teplota 23°C	0,5C	1C, 2C, 3C	5 cyklů na dané C
Test schopnosti dodat požadovaný proud - zvýšená teplota 45°C	0,5C	1C, 2C, 3C	5 cyklů na dané C

5.1 Gooweí

Jedná se o model baterie Gooweí 18650. Kapacita této baterie je 3,2 Ah. Maximální proud baterie je roven 10 A. Nominální napětí baterie se rovná 3,7 V. Měření probíhalo za normálních laboratorních podmínek při teplotě okolí 23,8 °C na začátku měření. A dále za zvýšených teplot, při kterých byla nastavena maximální přípustná teplota 65 °C [25].

Tabulka 10 Základní parametry baterie Gooweí 18650 [25]

	Parametr	Specifikace
Gooweí 18650	Maximální nabíjecí napětí	4,2 V
	Nominální napětí	3,67 V
	Nominální kapacita	3,2 Ah
	Minimální kapacita	3,1 Ah
	Nominální energie	11,75 Wh
	Maximální nabíjecí proud	3,2 A
	Maximální vybíjecí proud	10 A
	Minimální vybíjecí napětí	2,5 V
	Životnost baterie	Minimálně 500 cyklů ($C > 70\% C_{min}$)
	Hmotnostní hustota energie	240 Wh/kg
	Objemová hustota energie	712 Wh/l
	Objem	16,5 cm ³
	Váha	Maximálně 49,0 g
	Cena	160 Kč
	Rozměry	Maximálně 18,39 x 65,15 mm
	Dovolená provozní teplota při nabíjení	0 ~ 45°C
Dovolená provozní teplota při vybíjení	-20 ~ 60°C	



Obrázek 10 Baterie Gooweí 18650 [24]

Baterie Goowei je určena pro výrobu akupacků, které se nacházejí například v aku vysavačích, modelech RC, dětských hračkách nebo v elektronických cigaretách. Využití mají tyto baterie poměrně široké [24]. Přibližné uvedení na trh této baterie je 6.3.2014. Místo výroby je Korea. Dovolené skladovací teploty se pohybují v rozmezí [25]:

- 1 měsíc -20 ~ 60°C
- 3 měsíce -20 ~ 45°C
- 1 rok -20 ~ 20°C

Závislost kapacity na teplotě lze rozdělit na:

Tabulka 11 Závislost kapacity na teplotě [25]

Teplota při nabíjení	Teplota při vybíjení	Kapacita
23°C	-10 °C	70% původní kapacity
	0 °C	80% původní kapacity
	23 °C	100% původní kapacity
	60 °C	95% původní kapacity

Testy bezpečnosti baterie Goowei podle normy UL1642:

Tabulka 12 Testy bezpečnosti baterie Goowei 18650 [25]

Test	Podmínky testu	Výsledek testu
Test přebitím	1. Vybití do hodnoty 2,5 V 2. Nabíjení proudem 3C do 4,2 V 3. Nabíjecí napětí udržováno po dobu 7 hodin	Žádná exploze, žádný požár
Test zkratem	1. Standardní nabíjení 2. Kontakty spojeny vodičem o odporu 100 mΩ po dobu 1 hodiny	Žádná exploze, žádný požár
Test nadměrným vybitím	1. Vybití proudem 0,2 C do 2,5 C _{min}	Žádná exploze, žádný požár
Test zahřátím	1. Standardní nabití 2. Zahřátí v konvekční peci na teplotu 130 °C tempem 5 °C/minuta 3. Teplota je udržována po dobu 10 minut	Žádná exploze, žádný požár
Test nárazem	1. Standardní nabití 2. Podélný a příčný náraz tyčí o průměru 15,8 mm	Žádná exploze, žádný požár
Test rozdrčením	1. Standardní nabití 2. Příčné rozdrčení v testovacím zařízení	Žádná exploze, žádný požár

5.2 LG MH1

Jedná se o model baterie LG MH1. Kapacita této baterie je 3,2 Ah. Maximální proud baterie je roven 3,2 A. Nominální napětí baterie se rovná 3,67 V. Měření probíhalo za normálních laboratorních podmínek při teplotě okolí 23,8 °C na začátku měření. A dále za zvýšených teplot, při kterých byla nastavena maximální přípustná teplota 65 °C [25].

Tabulka 13 Základní parametry baterie LG MH1 [25]

	Parametr	Specifikace
LG MH1	Maximální nabíjecí napětí	4,2 V
	Nominální napětí	3,67 V
	Nominální kapacita	3,2 Ah
	Minimální kapacita	3,1 Ah
	Nominální energie	11,75 Wh
	Maximální nabíjecí proud	3,2 A
	Maximální vybíjecí proud	10 A
	Minimální vybíjecí napětí	2,5 V
	Životnost baterie	Minimálně 500 cyklů ($C > 70\%$ C_{min})
	Hmotnostní hustota energie	240 Wh/kg
	Objemová hustota energie	712 Wh/l
	Objem	16,5 cm ³
	Váha	Maximálně 49,0 g
	Cena	160 Kč
	Rozměry	Maximálně 18,39 x 65,15 mm
	Dovolená provozní teplota při nabíjení	0 ~ 45°C
	Dovolená provozní teplota při vybíjení	-20 ~ 60°C



Obrázek 11 Baterie LG MH1 [25]

Baterii LG MH1 lze upotřebit ve spotřební elektronice, ve svítilnách, v elektrokolech a v úložištích energie. Využití mají tyto baterie také poměrně široké. Přibližné uvedení na trh této baterie je 6.3.2014. Místo výroby je Korea. Dovolené skladovací teploty se pohybují v rozmezí:

- 1 měsíc -20 ~ 60°C
- 3 měsíce -20 ~ 45°C
- 1 rok -20 ~ 20°C

Závislost kapacity na teplotě lze rozdělit na:

Tabulka 14 Závislost kapacity na teplotě [25]

Teplota při nabíjení	Teplota při vybíjení	Kapacita
23°C	-10 °C	70% původní kapacity
	0 °C	80% původní kapacity
	23 °C	100% původní kapacity
	60 °C	95% původní kapacity

Testy bezpečnosti baterie LG MH1 podle normy UL1642:

Tabulka 15 Testy bezpečnosti baterie LG MH1 [25]

Test	Podmínky testu	Výsledek testu
Test přebitím	1. Vybití do hodnoty 2,5 V 2. Nabití proudem 3C do 4,2 V 3. Nabíjecí napětí udržováno po dobu 7 hodin	Žádná exploze, žádný požár
Test zkratem	1. Standartní nabíjení 2. Kontakty spojeny vodičem o odporu 100 mΩ po dobu 1 hodiny	Žádná exploze, žádný požár
Test nadměrným vybitím	1. Vybití proudem 0,2 C do 2,5 C _{min}	Žádná exploze, žádný požár
Test zahřátím	1. Standartní nabití 2. Zahřátí v konvekční peci na teplotu 130 °C tempem 5 °C/minuta 3. Teplota je udržována po dobu 10 minut	Žádná exploze, žádný požár
Test nárazem	1. Standartní nabití 2. Podélný a příčný náraz tyčí o průměru 15,8 mm	Žádná exploze, žádný požár
Test rozdrcením	1. Standartní nabití 2. Příčné rozdrcení v testovacím zařízení	Žádná exploze, žádný požár

5.3 LFP

Jedná se o model baterie LFP-26650-3300. Kapacita této baterie je 3,2 Ah. Maximální proud baterie je roven 10 A. Nominální napětí baterie se rovná 3,2 V. Měření probíhalo za normálních laboratorních podmínek při teplotě okolí 23,8 °C na začátku měření. A dále za zvýšených teplot, při kterých byla nastavena maximální přípustná teplota 65 °C [26].

Tabulka 16 Základní parametry baterie LFP-26650-3300 [26]

	Parametr	Specifikace
LFP-26650-3300	Maximální nabíjecí napětí	3,65 V
	Nominální napětí	3,2 V
	Nominální kapacita	3,35 Ah
	Minimální kapacita	3,3 Ah
	Nominální energie	10,7 Wh
	Maximální nabíjecí proud	6,6 A
	Maximální vybíjecí proud	10 A
	Minimální vybíjecí napětí	2,0 V
	Životnost baterie	Minimálně 2000 cyklů ($C > 80\% C_{min}$)
	Hmotnostní hustota energie	134 Wh/kg
	Objemová hustota energie	311 Wh/l
	Objem	34,5 cm ³
	Váha	Maximálně 81,0 g
	Cena	157 Kč
	Rozměry	Maximálně 26,2 x 65,0 mm
	Dovolená provozní teplota při nabíjení	-10 ~ 45°C
Dovolená provozní teplota při vybíjení	-20 ~ 60°C	



Obrázek 12 Baterie LFP-26650-3300 [27]

Baterii LiFePO₄ lze upotřebit v solárních systémech, ručních náradích, RC modelech, dětských hračkách a aku vysavačích [49]. Přibližné uvedení na trh této baterie je 26.4.2012. Místo výroby je Čína. Dovolené skladovací teploty se pohybují v rozmezí - 10 °C ~ + 35 °C [26].

Testy bezpečnosti baterie LFP:

Tabulka 17 Testy bezpečnosti baterie LFP [26]

Test	Podmínky testu	Výsledek testu
Test přebitím	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nabití proudem 3C do 10 V dokud proud neklesne na 0 2. Sledovat teplotu během testu 3. Ukončit test, pokud teplota dosáhne 70 °C 	Žádná exploze, žádný požár
Test hřebíkem	<ol style="list-style-type: none"> 1. Standartní nabíjení, hodinu vyčkat 2. Penetrace hřebíkem napříč baterií, hodinu vyčkat 3. Průměr hřebíku 2,5 - 3,5 mm 	Žádná exploze, žádný požár
Test nadměrným vybitím	<ol style="list-style-type: none"> 1. Standartní nabití 2. Vybití proudem 1C po dobu 2,5 hodiny 	Žádná exploze, žádný požár a žádné prosakování
Test zahříváním	<ol style="list-style-type: none"> 1. Standartní nabití 2. Zahřátí v konvekční peci na teplotu 130 °C 3. Teplota je udržována po dobu 30 minut 	Žádná exploze, žádný požár
Test zkratem	<ol style="list-style-type: none"> 1. Standartní nabití 2. Propojení terminálu baterie vodičem o odporu 30 mΩ, vyčkat 4 hodiny 	Žádná exploze, žádný požár
Test rozdrčením	<ol style="list-style-type: none"> 1. Standartní nabití 2. Příčné rozdrčení v testovacím zařízení silou 13 kN 3. Uvolnění a změření teploty 	Žádná exploze, žádný požár

5.4 LTO

Jedná se o model baterie LTO 1865-13. Kapacita této baterie je 1,3 Ah. Maximální proud baterie je roven 6 A. Nominální napětí baterie se rovná 2,4 V. Měření probíhalo za normálních laboratorních podmínek při teplotě okolí 23,8 °C na začátku měření. A dále za zvýšených teplot, při kterých byla nastavena maximální přípustná teplota 65 °C [31].

Tabulka 18 Základní parametry baterie LTO 1865-13 [31]

	Parametr	Specifikace
LTO 1865-13	Maximální nabíjecí napětí	2,8 V
	Nominální napětí	2,4 V
	Nominální kapacita	1,3 Ah
	Minimální kapacita	1,25 Ah
	Nominální energie	3,12 Wh
	Maximální nabíjecí proud	6 A
	Maximální vybíjecí proud	13 A
	Minimální vybíjecí napětí	1,5 V
	Životnost baterie	Minimálně 3000 cyklů ($C > 70\% C_{\min}$)
	Hmotnostní hustota energie	80 Wh/kg
	Objemová hustota energie	189 Wh/l
	Objem	16,5 cm ³
	Váha	Maximálně 39 g
	Cena	145 Kč
	Rozměry	Maximálně 65 x 19 mm
	Dovolená provozní teplota při nabíjení	0 ~ 45°C
Dovolená provozní teplota při vybíjení	-30 ~ 70°C	



Obrázek 13 Baterie LTO 1865-13 [31]

Baterii LTO 1865-13 lze upotřebit v arktických podmínkách a ve zdravotnickém odvětví. Přibližné uvedení na trh této baterie je 25.5.2013. Místo výroby je Čína. Dovolené skladovací teploty se pohybují v rozmezí $-20 \sim 45^{\circ}\text{C}$.

Závislost kapacity na teplotě lze rozdělit na:

Tabulka 19 Závislost kapacity na teplotě [31]

Teplota při nabíjení	Teplota při vybíjení	Kapacita
25 °C	-30 °C	60% původní kapacity
	-20 °C	85% původní kapacity
	25 °C	100% původní kapacity
	70 °C	95% původní kapacity

Testy bezpečnosti baterie LTO 1865-13:

Tabulka 20 Testy bezpečnosti baterie LTO 1865-13 [31]

Test	Podmínky testu	Výsledek testu
Test vibrací	1. Standartní nabití 2. Na vibračním stole použita frekvence 10-55 Hz s amplitudou 1,6 mm U frekvence se mění 1 Hz/minutu, test trvá 30 minut a testují se postupně všechny osy (x,y,z)	Žádná prosakování, žádný požár
Test zkratem	1. Standartní nabíjení 2. Kontakty spojeny vodičem o odporu 50 mΩ	Žádná exploze, žádný požár
Test nadměrným vybitím	1. Vybití proudem 1 C po dobu 2,5 hodiny	Žádná exploze, Teplota nižší než 150 °C
Test přebitím	1. Nabití proudem 2C do 9,6 V dokud proud neklesne na 0,02 C	Žádná exploze, žádný požár
Test nárazem	1. Standartní nabití 2. Příčný náraz tyčí o průměru 56 mm zatíženou závažím 10 kg	Žádná exploze, žádný požár
Test rozdrcením	1. Standartní nabití 2. Příčné rozdrcení v testovacím zařízení silou 13 kN po dobu 30 minut	Žádná exploze, žádný požár

5.5 BioLogic BCS-815

Zařízení pro cyklování baterií s možností měření EIS (Elektrochemická impedanční spektroskopie). Rozsah napětí měřicího zařízení je 0–9 V. Rozlišení měřeného napětí je 40 uV. Na zařízení lze nastavovat proud v rozsahu od 1 mA do 15 A na kanál. EIS je v rozsahu na každém kanálu 10 kHz až 10 mHz. Aktuální rozlišení přístroje je až 0,02 uA. Doba akvizice je 2 ms. Pro zálohování dat je na zařízení LAN připojení. Měřicí zařízení má dva analogové vstupy a 1 otevřený výstup [28].

Tabulka 21 Parametry měřicího zařízení BioLogic BCS-815 [28]

	Parametr	Specifikace
BCS-815	Rozsah napětí	0-9 V
	Rozlišení napětí	40 uV
	Rozsah proudu	od 1 mA do 15 A na kanál
	Rozlišení proudu	0,02 uA
	Časové rozlišení	2 ms
	Proud při paralelizaci osmi kanálů	120 A
	Příkon	1700 W



Obrázek 14 Měřicí zařízení BioLogic BCS-815 [28]

5.6 Teplotní komora

Teplotní komora Venticell 22 ECO je přesná a flexibilní laboratorní pec. Objem komory pece je 22 litrů. Klimatická komora umožňuje velkou míru nastavitelnosti teplotního profilu. Pro měření bylo využito pouze termostatické řízení teploty. Při měření byla teplota komory nastavena na hodnotu 45 stupňů Celsia. Díky ventilátoru byla zajištěna rovnoměrná teplota všech měřených článků [29].

Tabulka 22 Parametry teplotní komory Venticell 22 ECO [29]

	Parametr	Specifikace
Venticell 22 ECO	Proud	4,2 A
	Napětí	230 V
	Objem	22 l
	Rozsah teplot	od +10 °C nad okolí do 250/300 °C
	Nastavená teplota	45 ° C
	Rychlost ventilátoru	50 %
	Maximální příkon	5 W



Obrázek 15 Teplotní komora Venticell 22 ECO

6. PRVNÍ SADA BATERIÍ – MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK A ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK

Tato část diplomové práce je věnována testování lithium-iontových baterií za normálních podmínek.

Baterie prošly při měření 200 cykly, přičemž v grafech je vidět místo, kde došlo v celé budově Technické 10 k výpadku proudu a měření se na dva dny zastavilo. Poté bylo opět nastaveno a spuštěno měření na 200 cyklů. V grafických závislostech se tato skutečnost projevila jako skok k vyšším hodnotám zhruba v polovině měření (110. cyklus). Dále byly baterie podrobeny testu, zda jsou schopné dodat požadovaný proud. Baterie, které byly umístěné ve stojanu a prošly měřením za normálních teplotních podmínek, byly poté vyměněny s bateriemi umístěnými v teplotní komoře Venticell 22 ECO.

Nastavení parametrů jednotlivých baterií a použitá teplota je blíže popsána v návrhu a postupu řešení.

Měření probíhalo na první sadě baterií (označení 1S), která obsahovala:

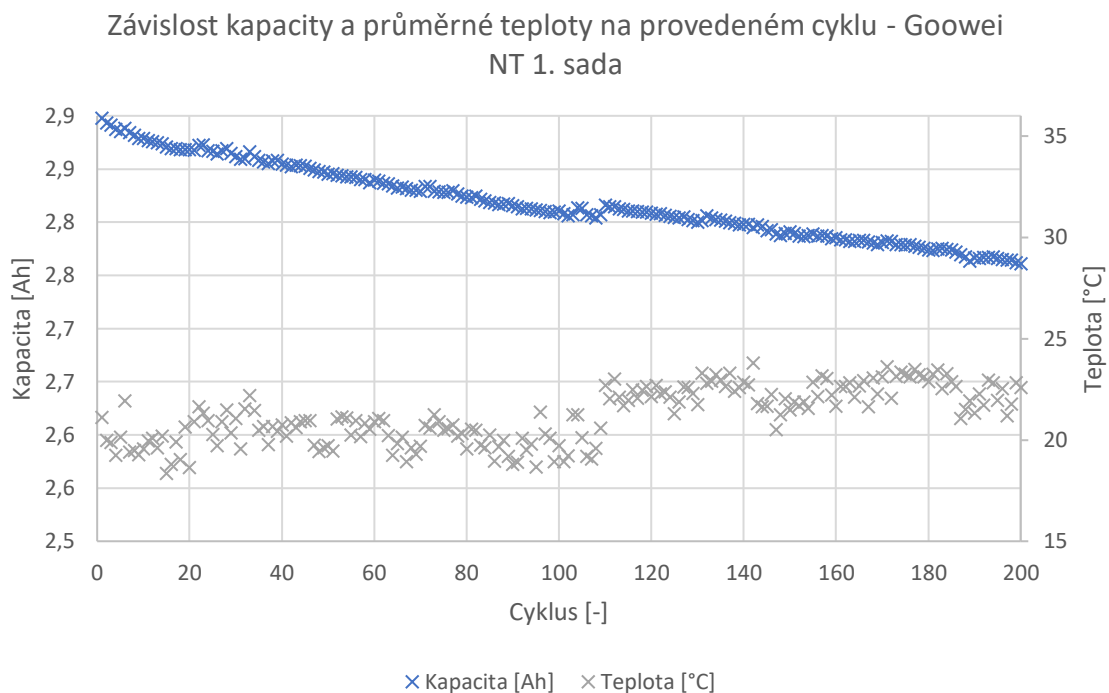
- 1x baterii Goowe
- 1x baterii LG MH1
- 1x baterii LFP-26650-3300
- 1x baterii LTO 1865-13

Sledována byla teplota, proud, napětí, kapacita a nábojová účinnost.

Tyto parametry byly poté vyjádřeny graficky a tabulkovým zhodnocením, kde je vyjádřena nominální kapacita, počáteční kapacita, konečná kapacita, rozdíl kapacity, a to jak v mAh, tak i v procentech.

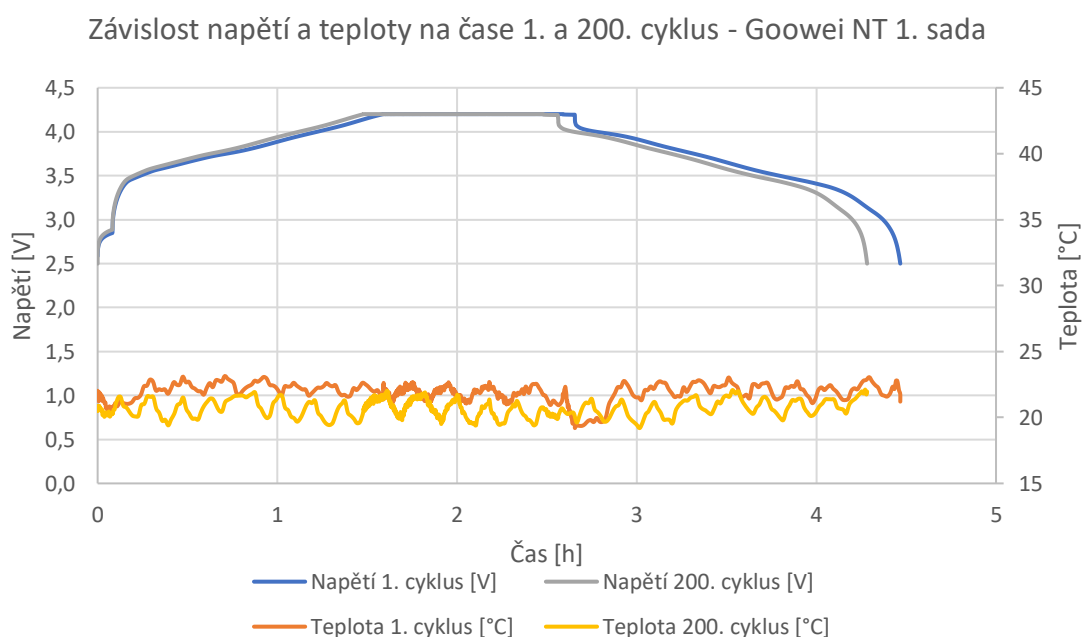
6.1 Gowei 18650

Zobrazený graf Závislosti kapacity a průměrné teploty na provedeném cyklu pro baterii Gowei 18650 za normálních teplot.



Graf 1 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu Gowei NT 1S

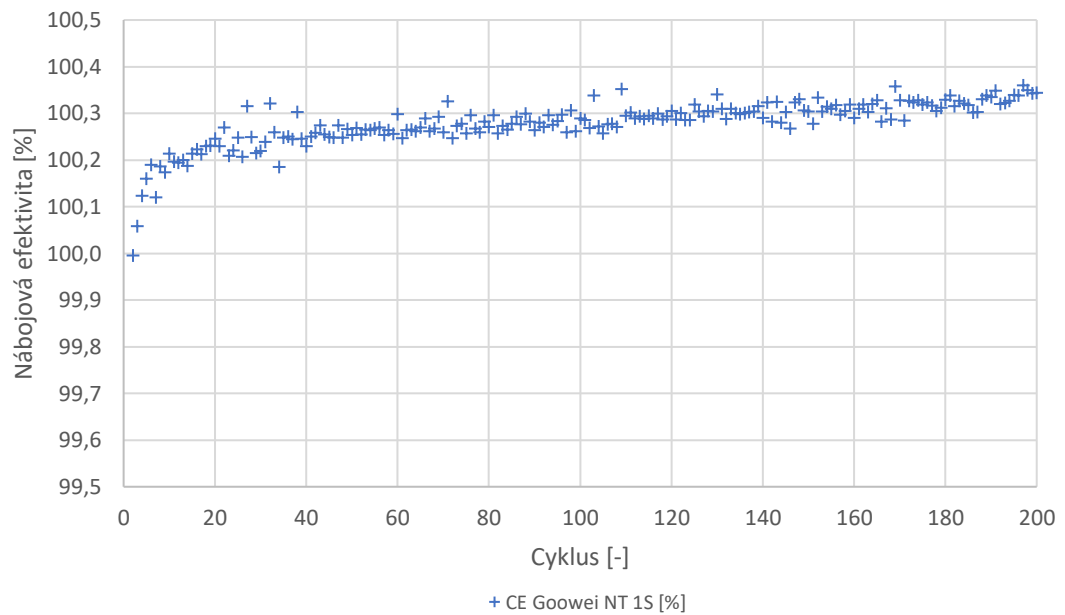
Zobrazený graf závislosti teploty a napětí baterie Gowei 18650 na čase za normálních teplot pro 1. a 200. cyklus.



Graf 2 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus Gowei NT 1S

Zobrazený graf závislosti nábojové efektivity baterie Goowe 18650 během cyklování.

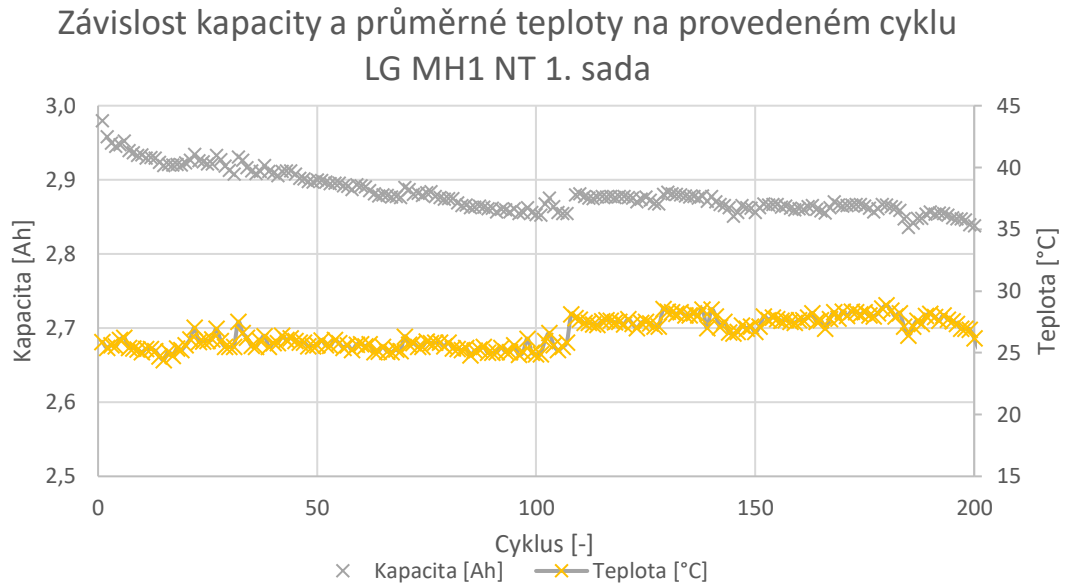
Závislost nábojové efektivity baterie Goowe na provedeném cyklu -
1. sada NT



Graf 3 Závislost nábojové efektivity baterie Goowe na provedeném cyklu - 1. sada NT

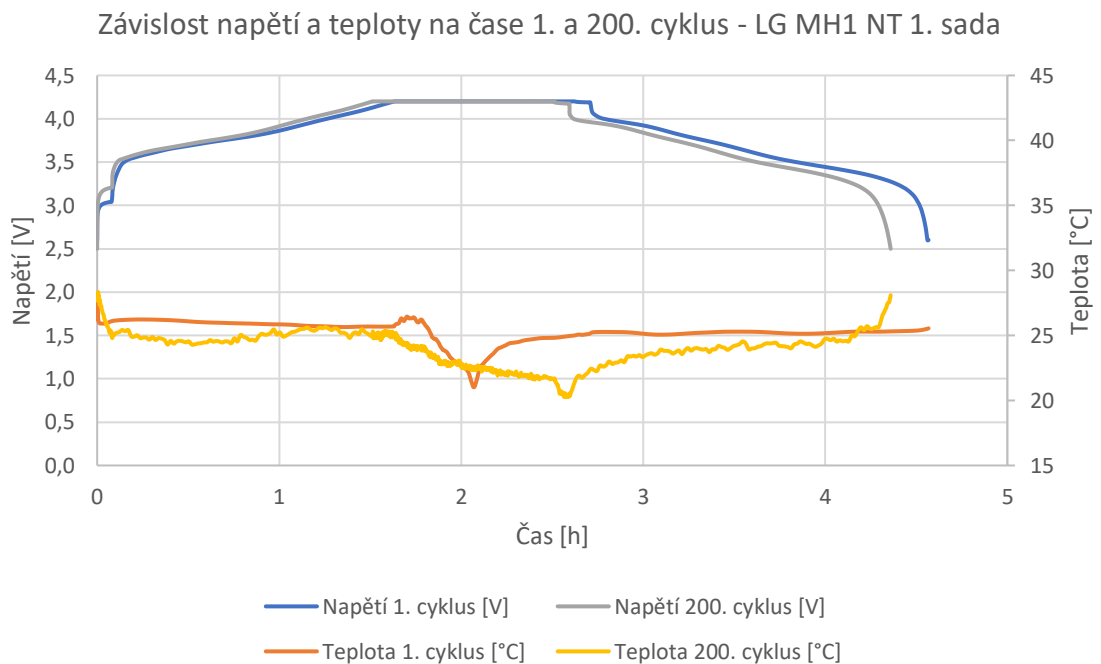
6.2 LG MH1

Zobrazený graf Závislosti kapacity a průměrné teploty na provedeném cyklu pro baterii LG MH1 za normálních teplot.



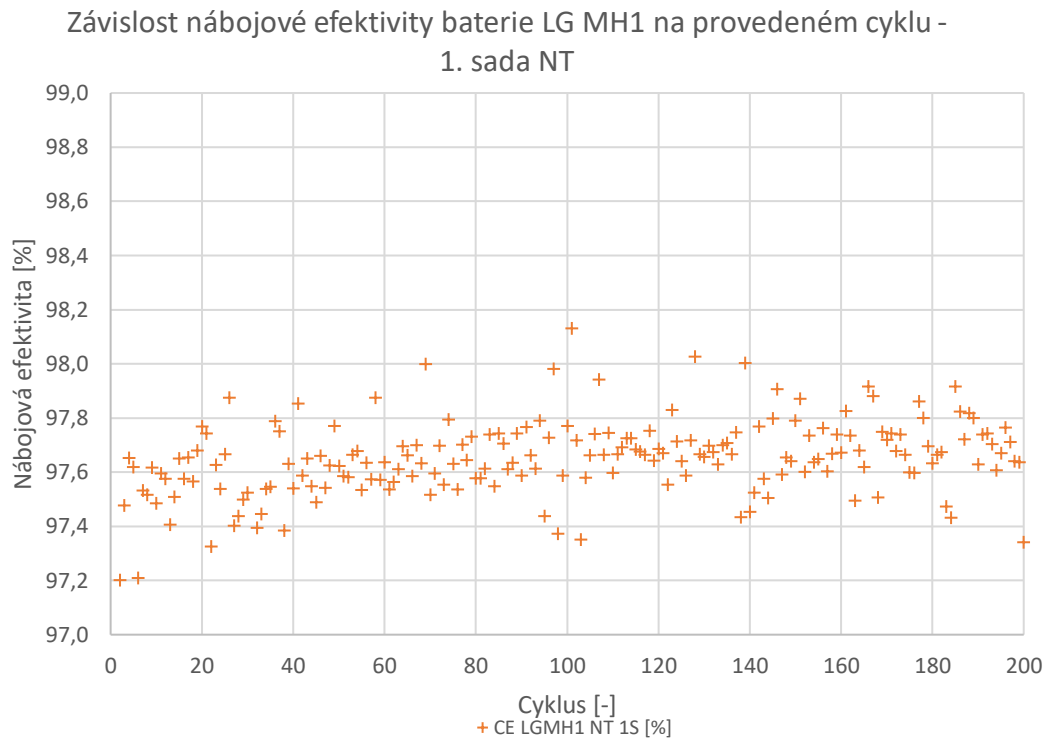
Graf 4 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LG MH1 NT 1S

Zobrazený graf závislosti teploty a napětí baterie LG MH1 na čase za normálních teplot pro 1. a 200. cyklus.



Graf 5 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LG MH1 NT 1S

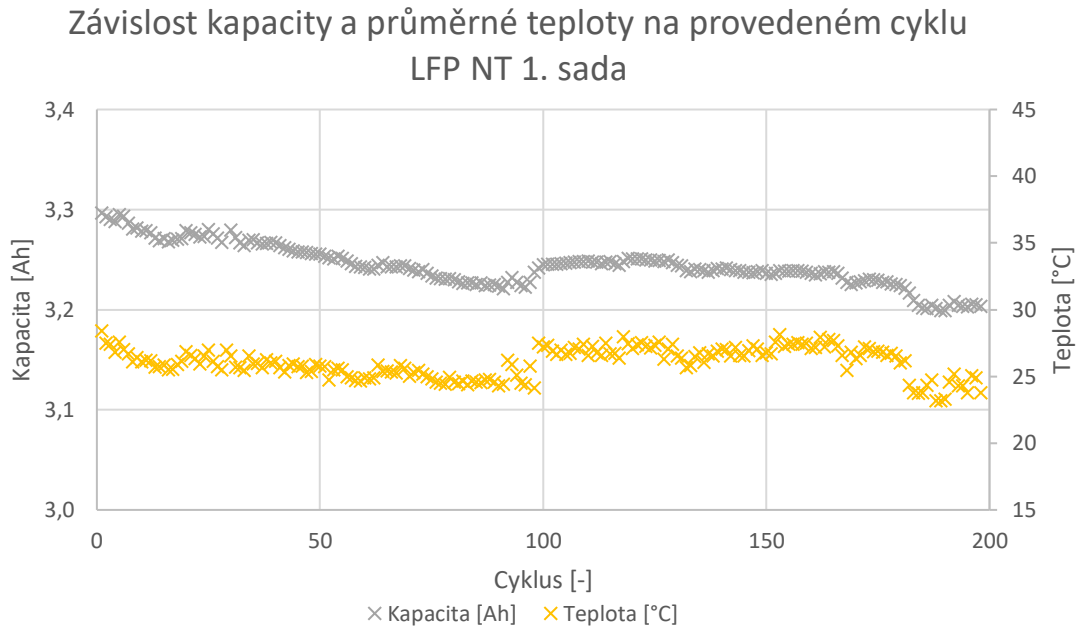
Zobrazený graf závislosti nábojové efektivity baterie LG MH1 18650 během cyklování.



Graf 6 Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 1. sada NT

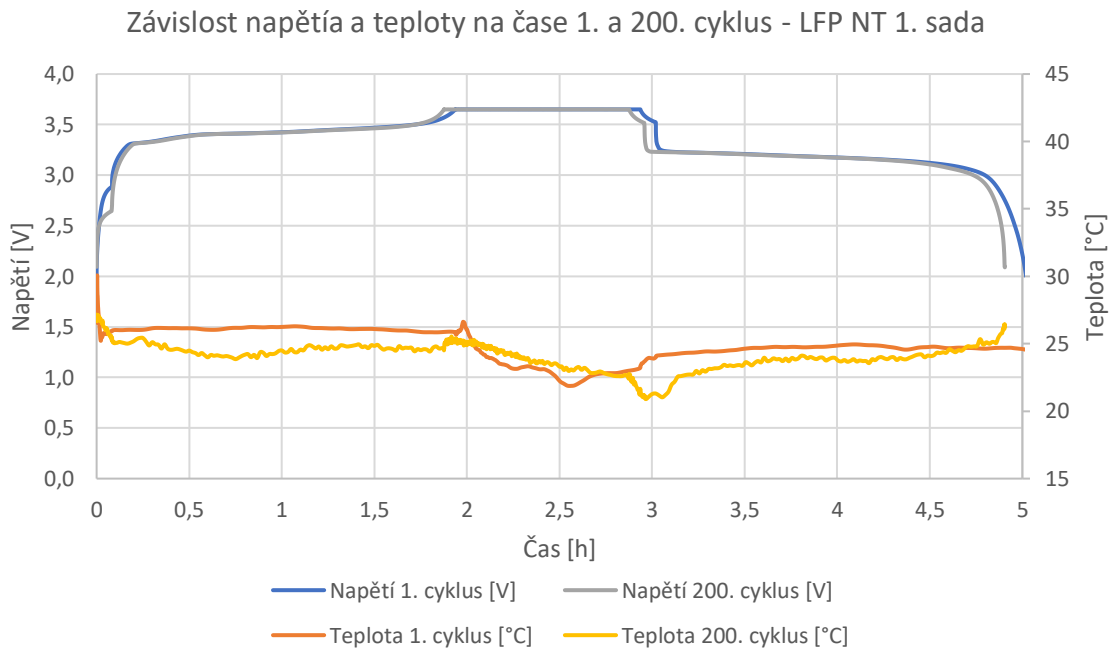
6.3 LiFePO₄ – LFP-26650-3300

Zobrazený graf Závislosti kapacity a průměrné teploty na provedeném cyklu pro baterii LFP-26650-3300 za normálních teplot.



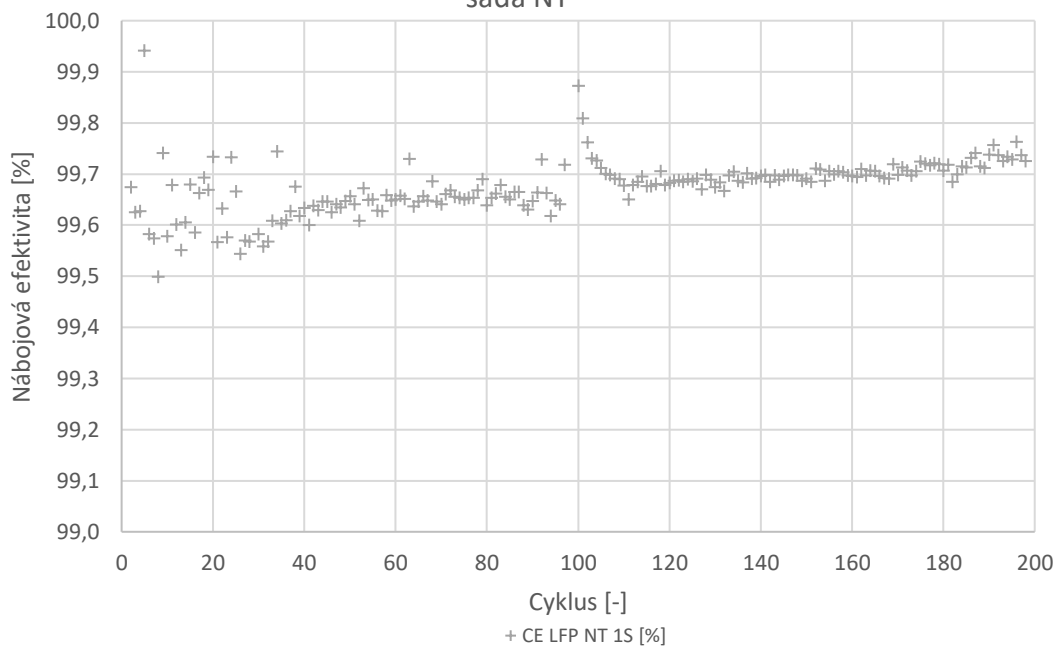
Graf 7 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LFP NT 1S

Zobrazený graf závislosti teploty a napětí baterie LFP na čase za normálních teplot pro 1. a 200. cyklus.



Graf 8 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LFP NT 1S

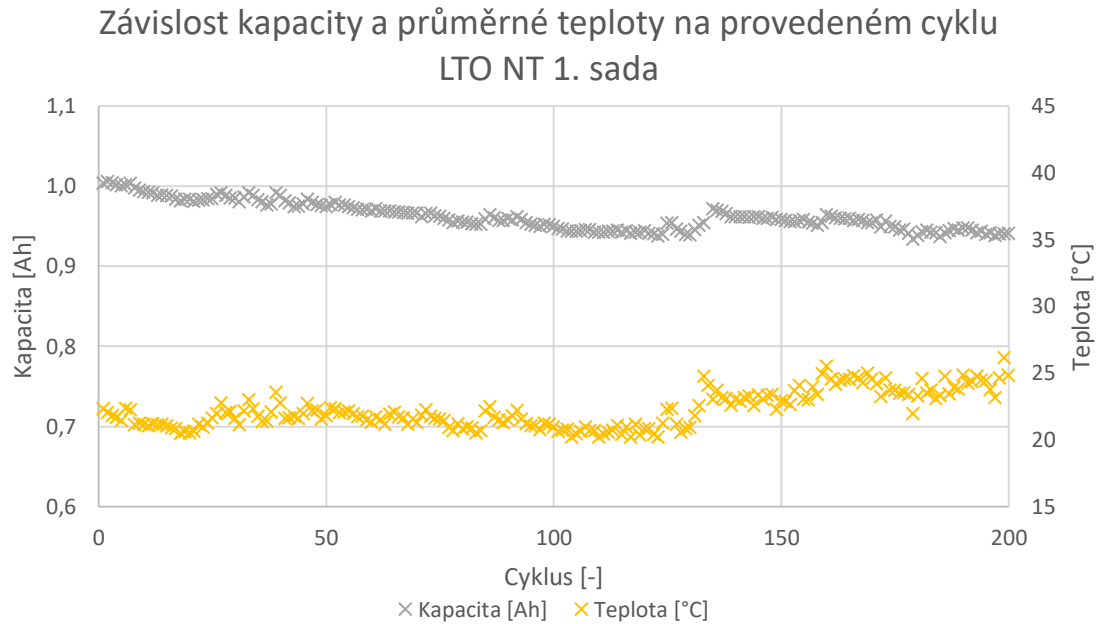
Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 1.
sada NT



Graf 9 Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 1. sada NT

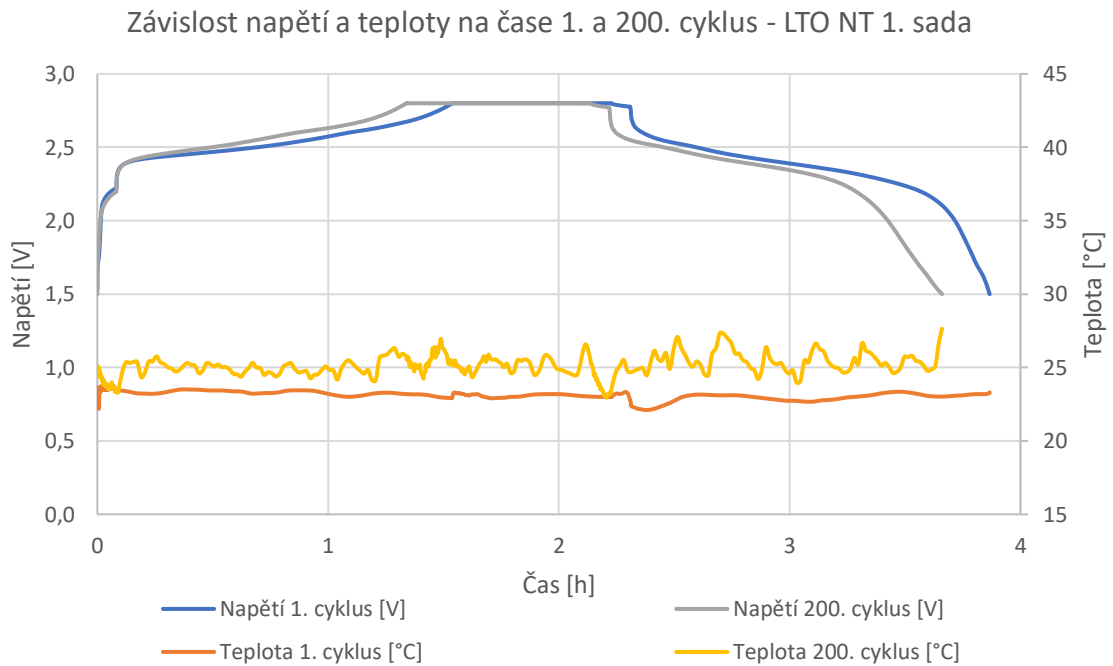
6.4 LTO 1865-13

Zobrazený graf Závislosti kapacity a průměrné teploty na provedeném cyklu pro baterii LTO 1865-13 za normálních teplot



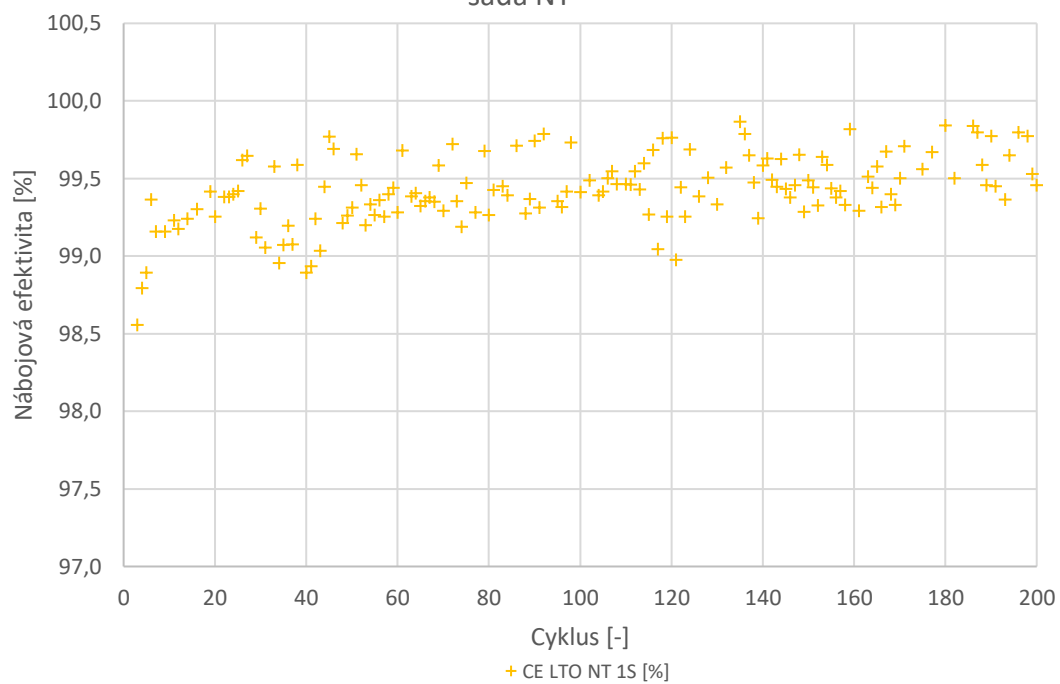
Graf 10 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LTO NT 1S

Zobrazený graf závislosti teploty a napětí baterie LTO na čase za normálních teplot pro 1. a 200. cyklus.



Graf 11 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LTO NT 1S

Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 1.
sada NT



Graf 12 Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada NT

6.5 Tabulkové zhodnocení měření za normálních teplotních podmínek

Tabulka poklesu kapacity za normálních teplotních podmínek.

Tabulka 23 Pokles kapacity za normálních teplotních podmínek – 1S

Pokles kapacity za normálních teplot – 200 cyklů				
Typ baterie	Goowei	LG MH1	LFP	LTO
Nominální kapacita [mAh]	3200	3200	3300	1300
Počáteční kapacita [mAh]	2898	2980	3297	1006
Relativní počáteční kapacita oproti nominální [%]	90,6	93,1	99,9	77,4
Konečná kapacita po 200 cyklech [mAh]	2761	2839	3203	942
Rozdíl kapacity po 200 cyklech [mAh]	137	141	94	64
Rozdíl kapacity na cyklus [mAh/cyklus]	0,685	0,705	0,470	0,320
Relativní rozdíl kapacity po 200 cyklech [%]	4,7	4,7	2,9	6,4
Relativní rozdíl kapacity na cyklus [%/cyklus]	0,0235	0,0235	0,0145	0,032
Predikce počtu cyklů (lineární pokles z počáteční kapacity na 80% počáteční kapacity) [-]	850	850	1380	625
Predikce počtu cyklů (lineární pokles měřené počáteční kapacity na 80% nominální kapacity) [-]	493	595	2053	-

Tabulka průměrné nábojové účinnosti.

Tabulka 24 Průměrná nábojová účinnost za normálních teplotních podmínek – 1S

Typ baterie	Průměrná Nábojová účinnost [%]
Goowei	100,281
LG MH1	97,649
LFP	99,675
LTO	99,449

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT

Tato část diplomové práce je věnována testování lithium-iontových baterií za zvýšených teplot.

Baterie prošly při měření 200 cykly, přičemž v grafech je vidět místo, kde došlo v celé budově Technické 10 k výpadku proudu a měření se na dva dny zastavilo. Poté bylo opět nastaveno a spuštěno měření na 200 cyklů. V grafických závislostech se tato skutečnost projevila jako skok k vyšším hodnotám zhruba v polovině měření (110. cyklus). Dále byly baterie podrobeny testu, zda jsou schopné dodat požadovaný proud. Baterie, které byly umístěny v teplotní komoře Venticell 22 ECO a prošly měřením za zvýšených teplotních podmínek, byly poté vyměněny s bateriemi měřenými za normálních teplotních podmínek.

Nastavení parametrů jednotlivých baterií je blíže popsáno v návrhu a postupu řešení.

Měření probíhalo na první sadě baterií (označení 1S), která obsahovala:

- 1x baterii Goowe
- 1x baterii LG MH1
- 1x baterii LFP-26650-3300
- 1x baterii LTO 1865-13

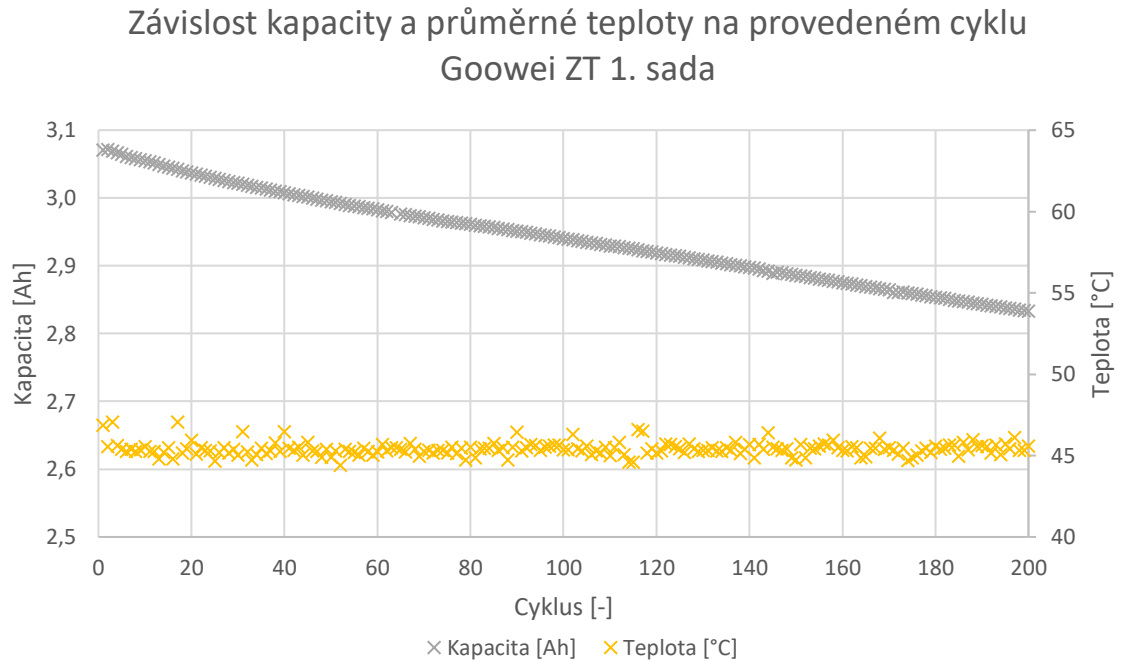
Sledována byla teplota, proud, napětí, kapacita a nábojová účinnost.

Tyto parametry byly poté vyjádřeny graficky a tabulkovým zhodnocením, kde je vyjádřena nominální kapacita, počáteční kapacita, konečná kapacita, rozdíl kapacity, a to jak v mAh, tak i v procentech.

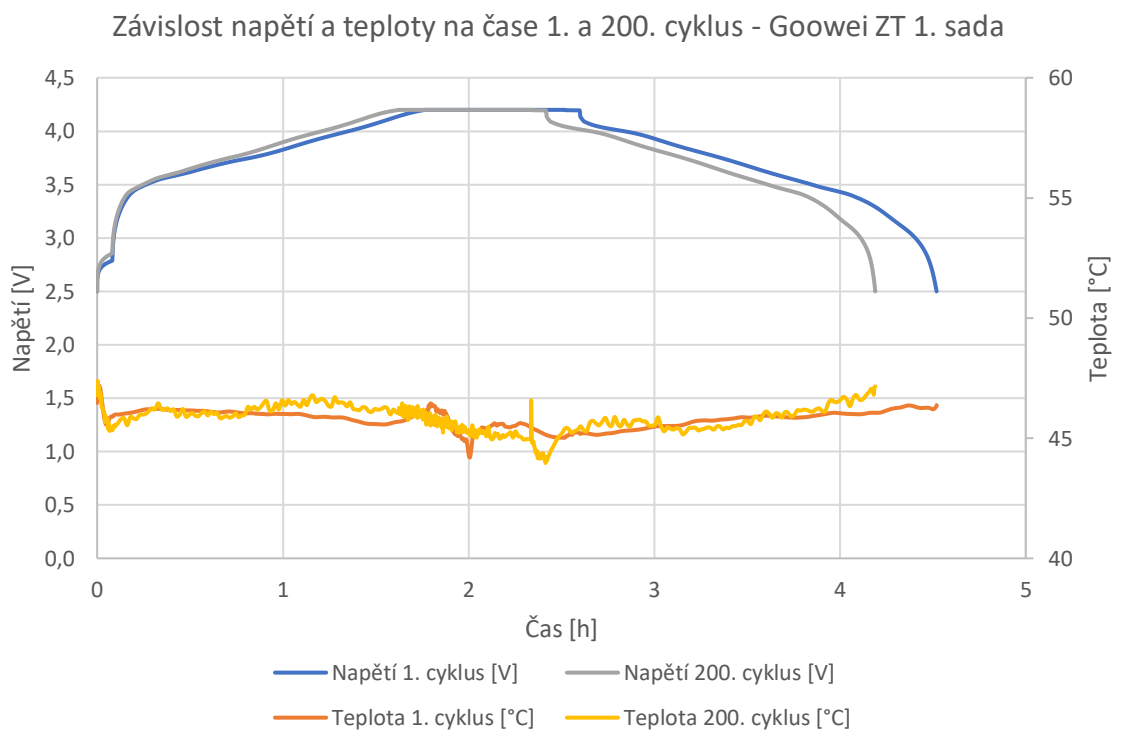
Všechny čtyři baterie byly vyhrazeny pro testování při teplotě 45 stupňů Celsia. Baterie byly umístěny do termostatického zařízení, kde byly připojeny na zařízení BioLogic BCS – 815. Na těchto bateriích byly také umístěny teplotní čidla, aby bylo možné zaznamenat teplotu na bateriích během měření. Proud použitý pro měření za zvýšených teplot byl shodný jako u měření za normálních teplot a činil 0,5 C.

6.6 Gooweí 18650

Zobrazený graf Závíslosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii Gooweí 18650 za zvýšených teplot

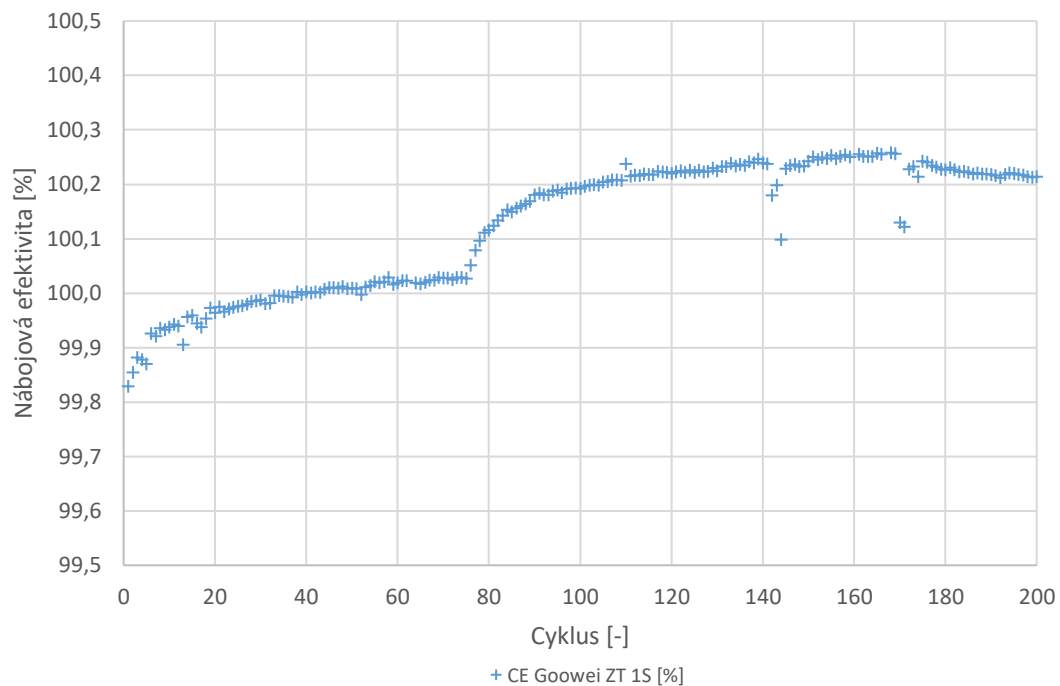


Graf 13 Závíslost kapacity a napětí na provedeném cyklu Gooweí ZT 1S



Graf 14 Závíslost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus Gooweí ZT 1S

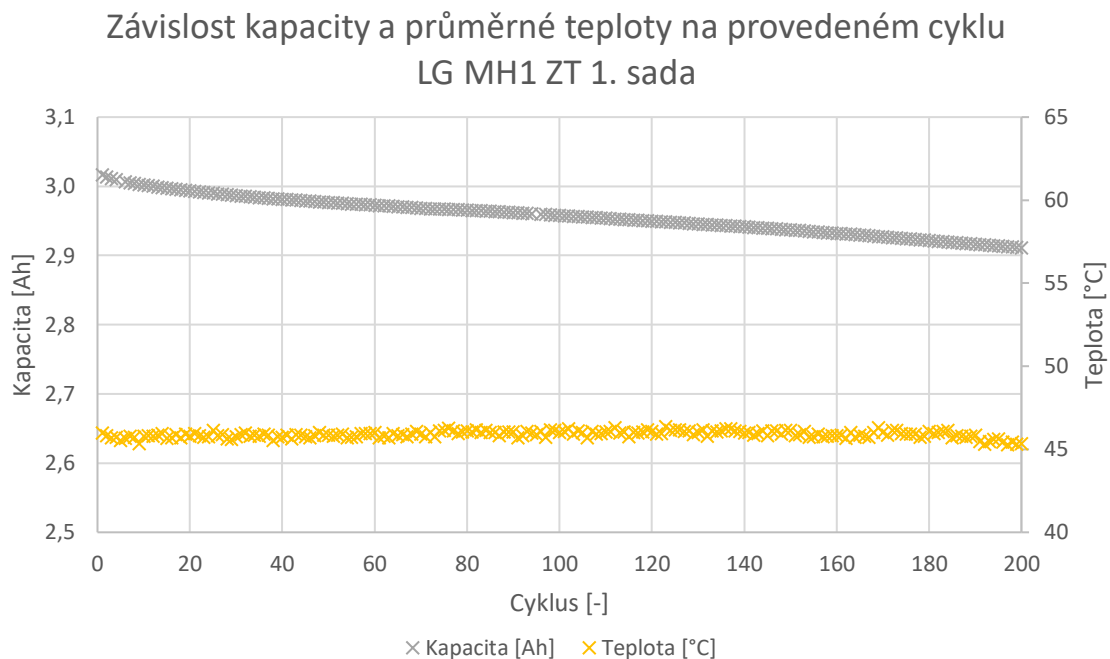
Závislost nábojové efektivity baterie Gooweí na provedeném cyklu -
1. sada ZT



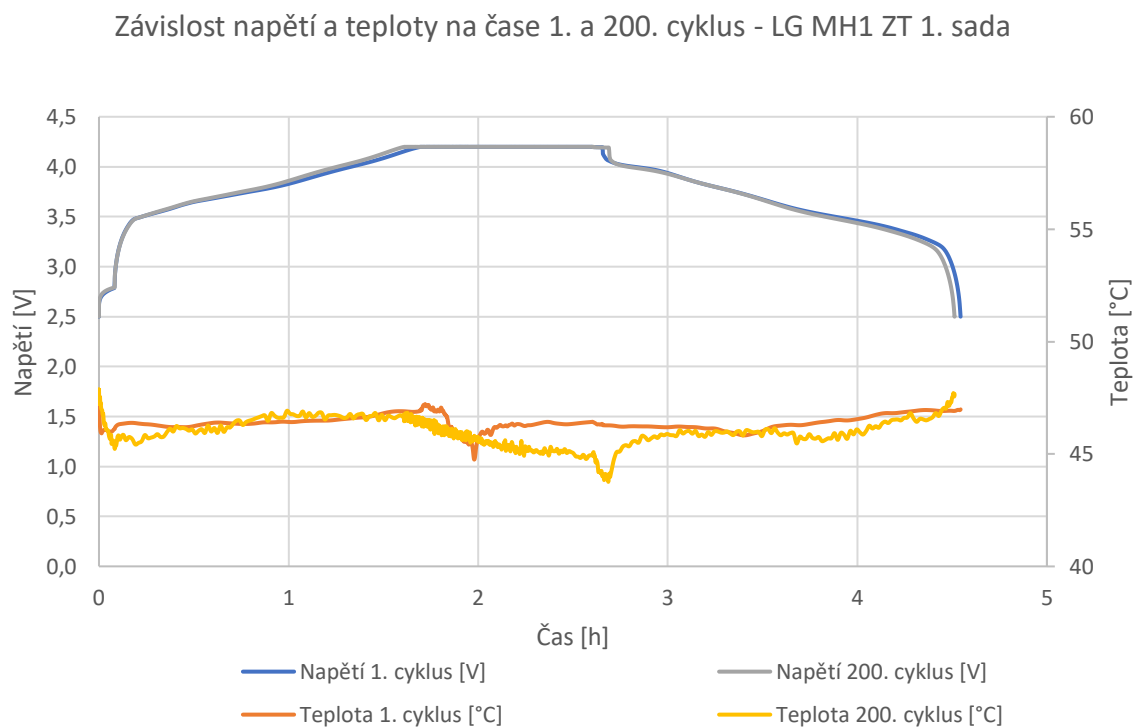
Graf 15 Závislost nábojové efektivity baterie Gooweí na provedeném cyklu - 1. sada ZT

6.7 LG MH1

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LG MH1 za zvýšených teplot

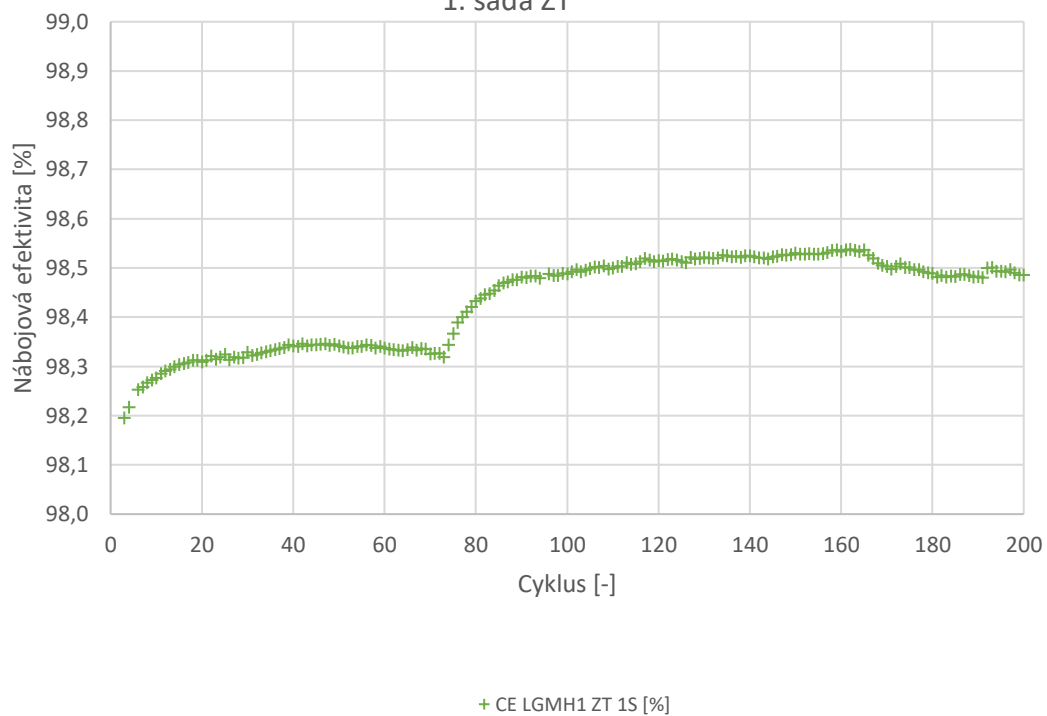


Graf 16 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LG MH1 ZT 1S



Graf 17 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LG MH1 ZT 1S

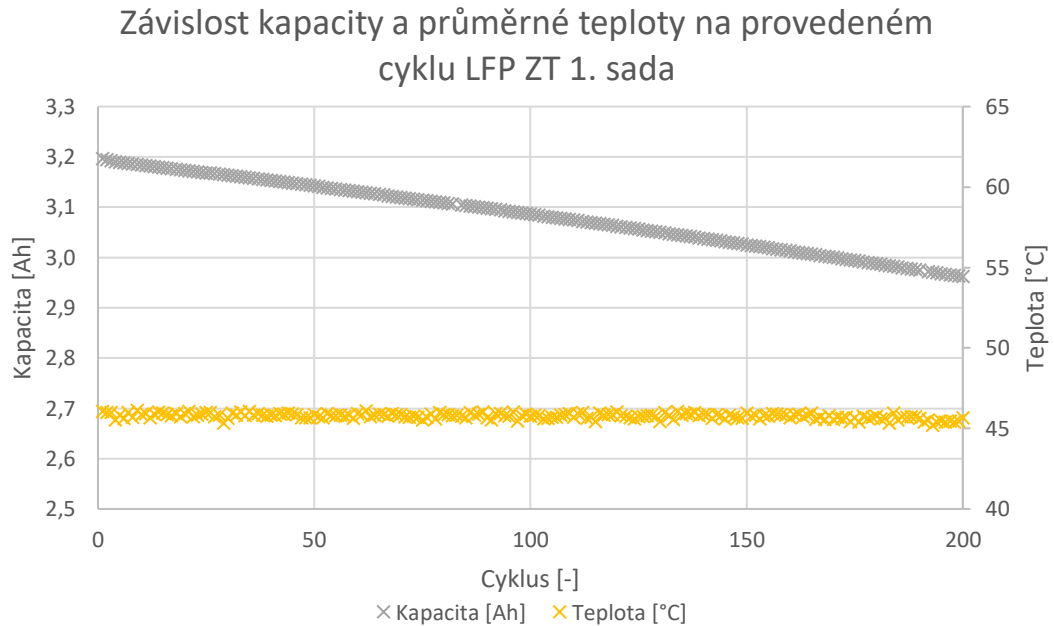
Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu -
1. sada ZT



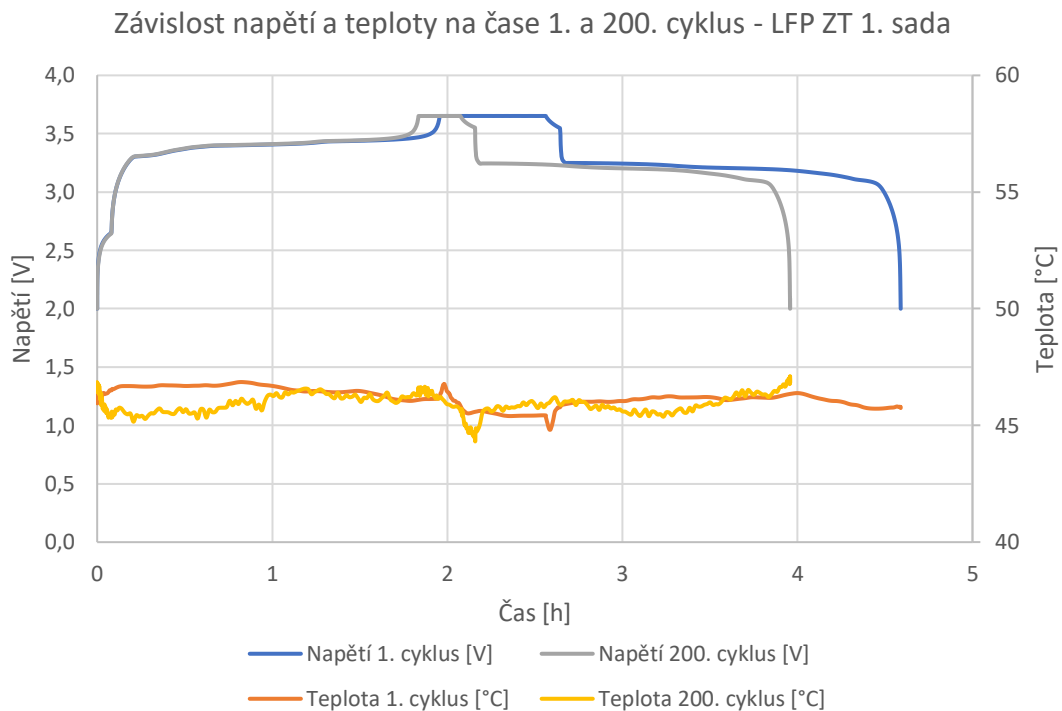
Graf 18 Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 1. sada ZT

6.8 LiFePO₄ – LFP-26650-3300

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LFP-26650-3300 za zvýšených teplot

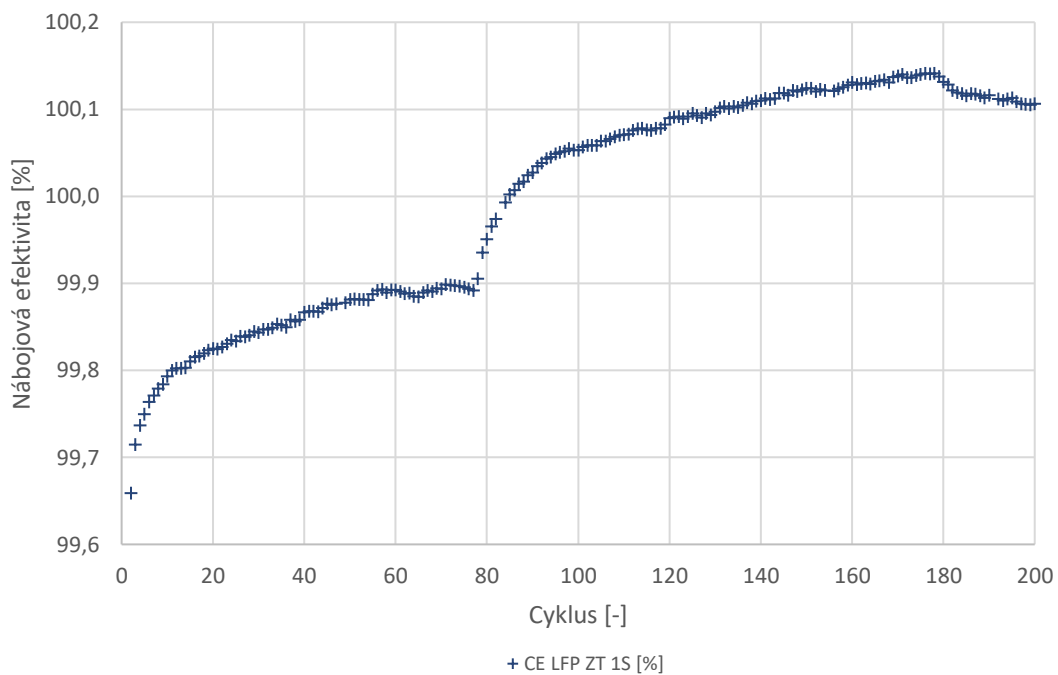


Graf 19 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LFP ZT 1S



Graf 20 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LFP ZT 1S

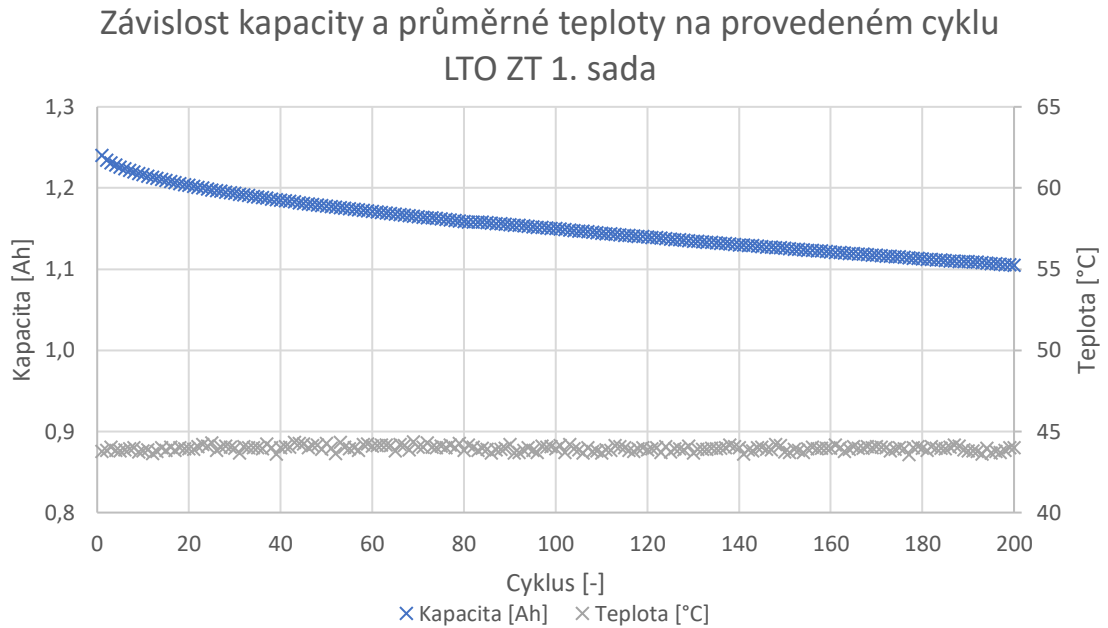
Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 1.
sada ZT



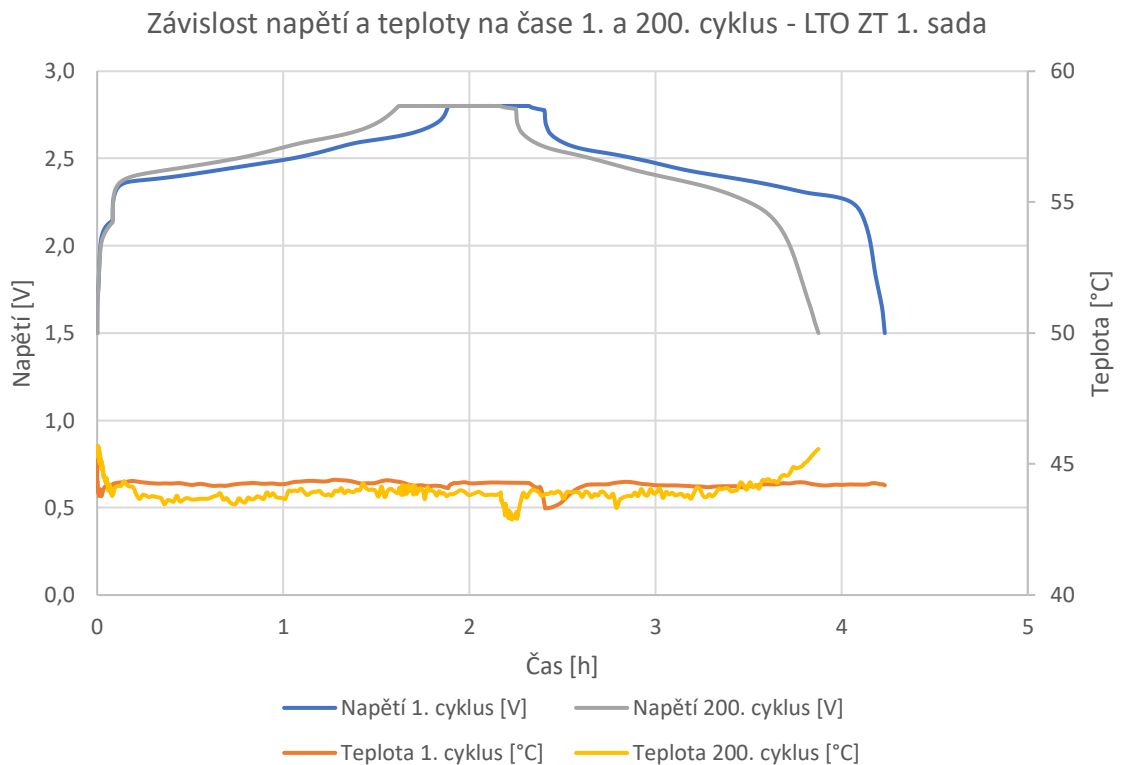
Graf 21 Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 1. sada ZT

6.9 LTO 1865-13

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LTO 1865-13 za zvýšených teplot

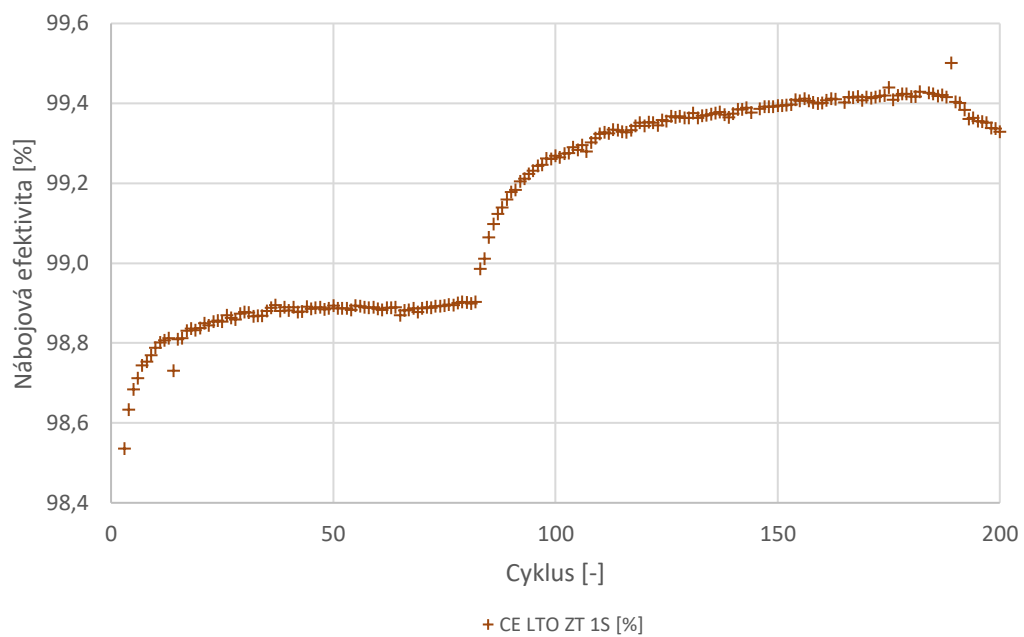


Graf 22 Závislost kapacity a napětí na provedeném cyklu LTO ZT 1S



Graf 23 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LTO ZT 1S

Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada ZT



Graf 24 Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada ZT

6.10 Tabulkové zhodnocení měření za zvýšených teplot

Tabulka poklesu kapacity za zvýšených teplot.

Tabulka 25 Pokles kapacity za zvýšených teplot - 1S

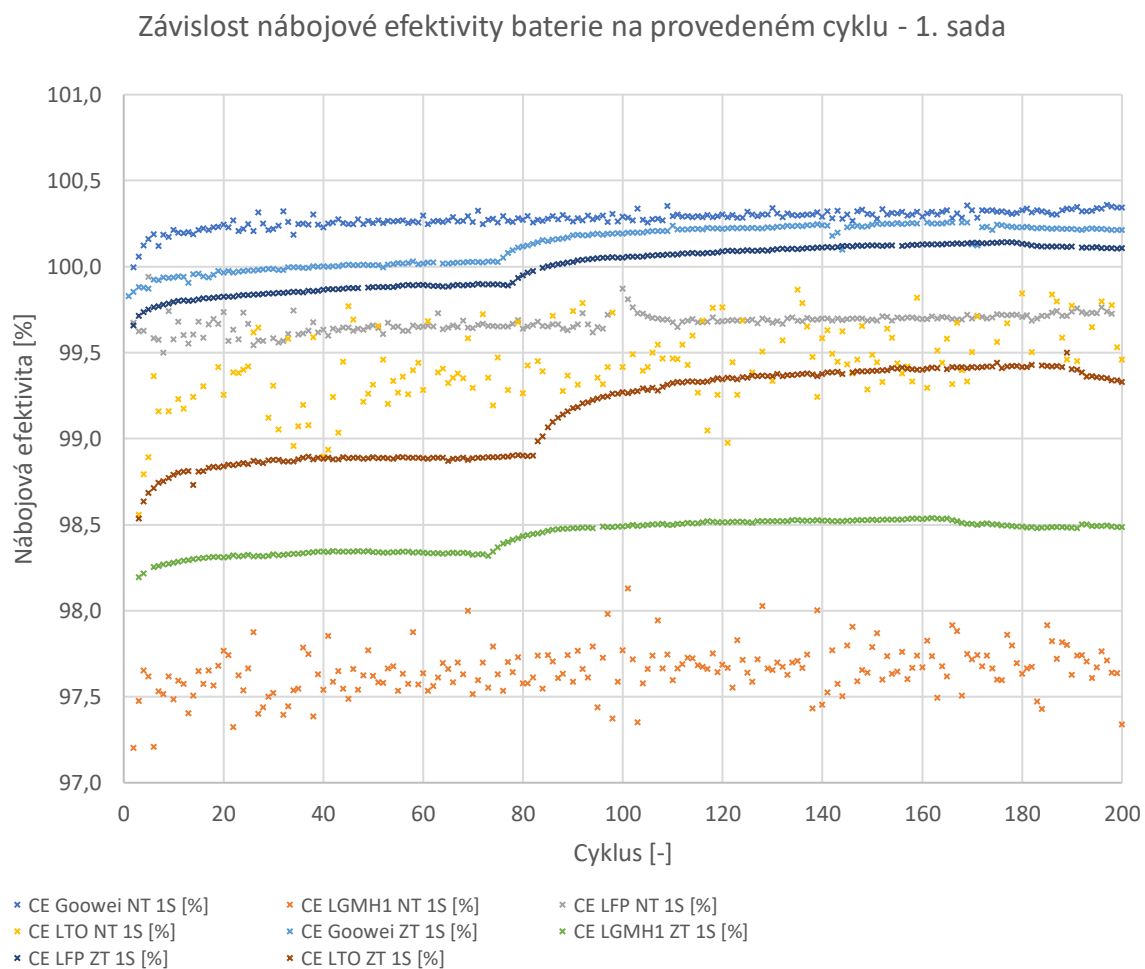
Pokles kapacity za zvýšených teplot – 200 cyklů				
Typ baterie	Goowei	LG MH1	LFP	LTO
Nominální kapacita [mAh]	3200	3200	3300	1300
Počáteční kapacita [mAh]	3071	3016	3196	1190
Relativní počáteční kapacita oproti nominální [%]	95,9	94,3	96,9	91,5
Konečná kapacita po 200 cyklech [mAh]	2833	2911	2962	1055
Rozdíl kapacity po 200 cyklech [mAh]	238	105	234	135
Rozdíl kapacity na cyklus [mAh/cyklus]	1,190	0,525	1,170	0,675
Relativní rozdíl kapacity po 200 cyklech [%]	7,7	3,5	7,3	11,3
Relativní rozdíl kapacity na cyklus [%/cyklus]	0,0387	0,0174	0,0366	0,0567
Predikce počtu cyklů (lineární pokles z počáteční kapacity na 80% počáteční kapacity) [-]	516	1149	546	353
Predikce počtu cyklů (lineární pokles měřené počáteční kapacity na 80% nominální kapacity) [-]	429	869	475	222

Tabulka průměrné nábojové účinnosti.

Tabulka 26 Průměrná nábojová účinnost za zvýšených teplot - 1S

Typ baterie	Průměrná Nábojová účinnost [%]
Goowei	100,127
LG MH1	98,428
LFP	100,013
LTO	99,127

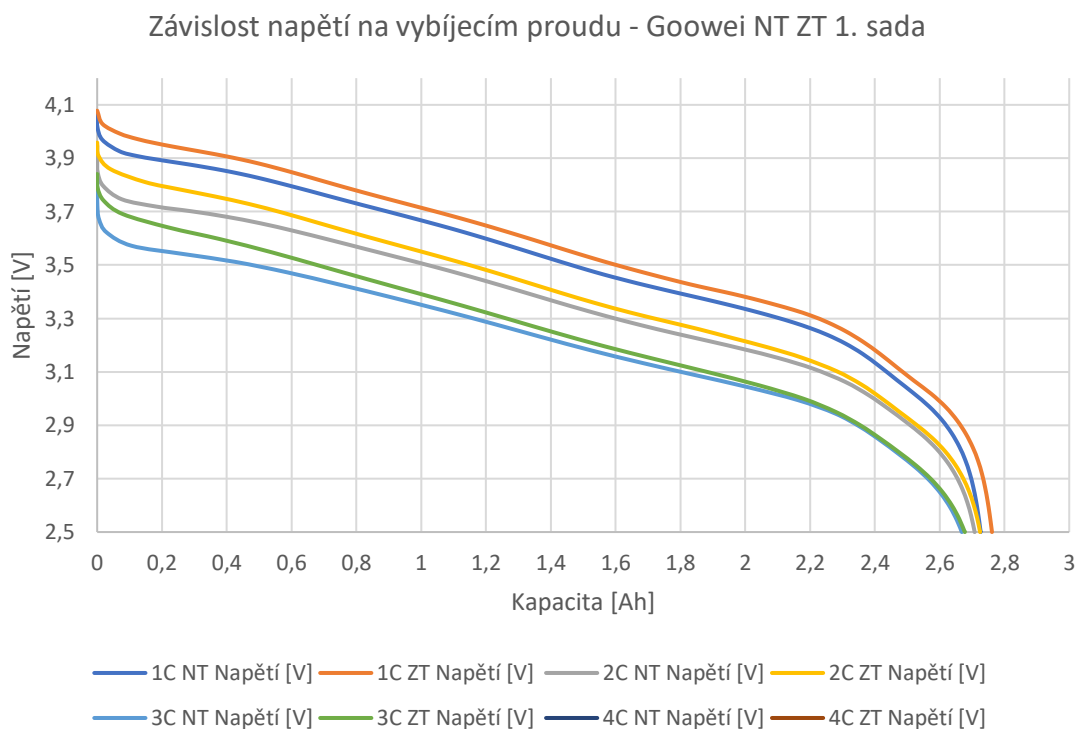
Graf závislosti nábojové efektivity baterie na provedeném cyklu – První sada.



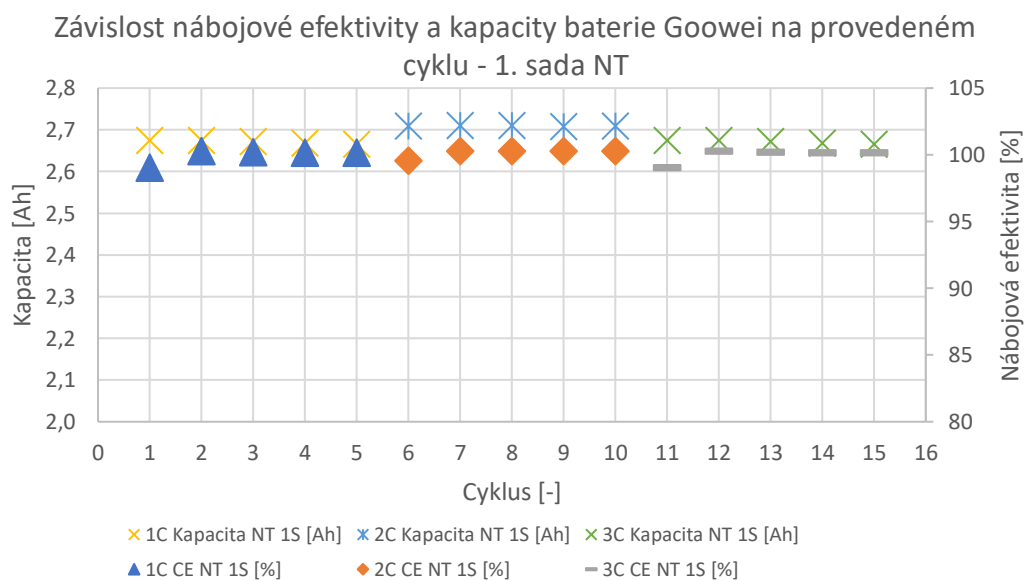
Graf 25 Závislost nábojové efektivity na provedeném cyklu 1S

6.1 Rate capability test – Proudová zátěž normální teplotní podmínky a zvýšená teplota – První sada

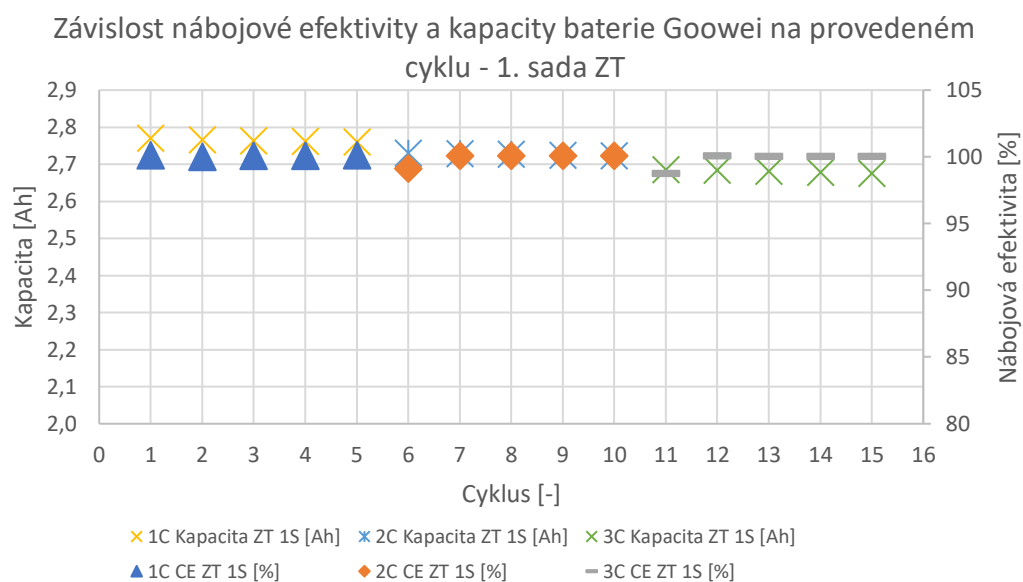
6.1.1 Goowei normální teplotní podmínky a zvýšené teploty - První sada



Graf 26 Závislost napětí na vybíjecím proudu Goowei NT ZT 1S

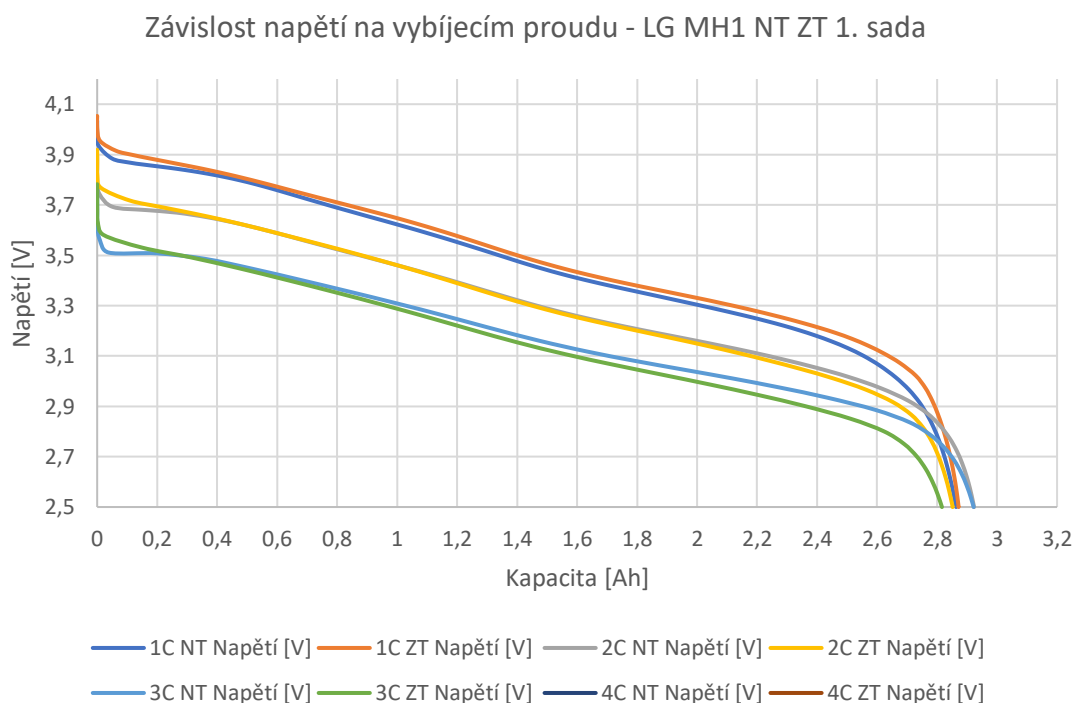


Graf 27 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie Goowei na provedeném cyklu - 1. sada NT

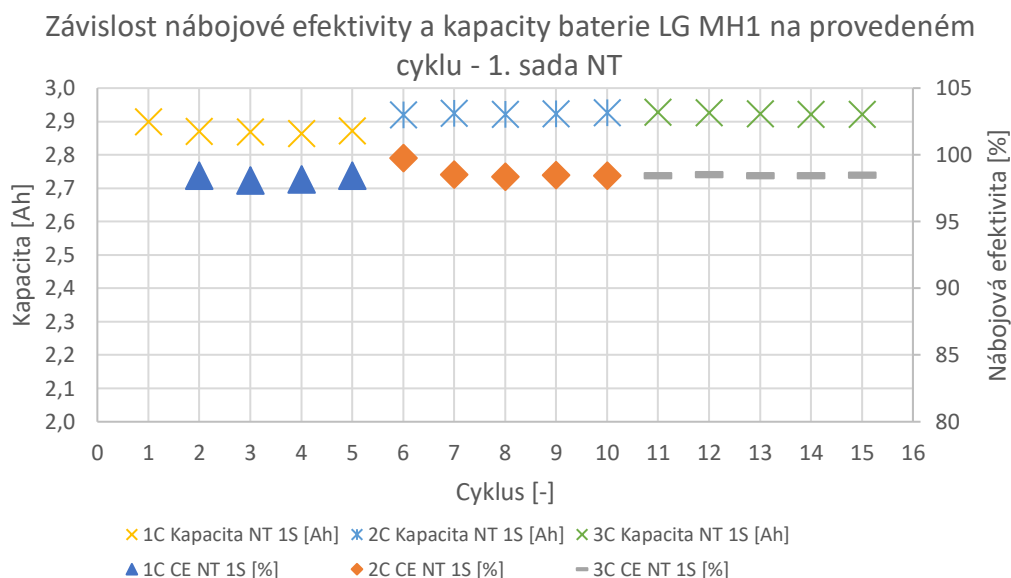


Graf 28 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie Goowei na provedeném cyklu - 1. sada ZT

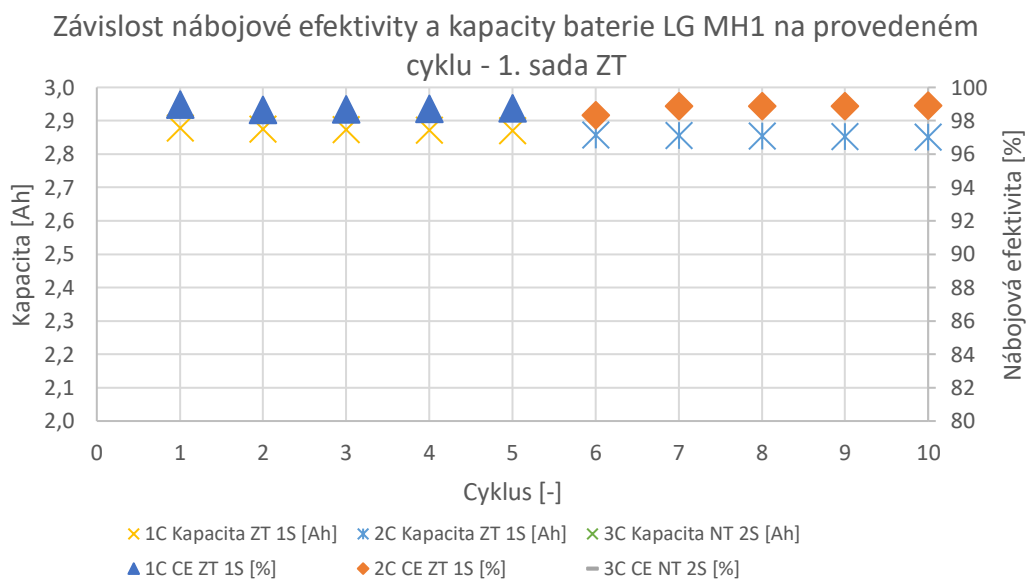
6.1.2 LG MH1 normální teplotní podmínky a zvýšené teploty - První sada



Graf 29 Závislost napětí na vybíjecím proudu LG MH1 NT ZT 1S

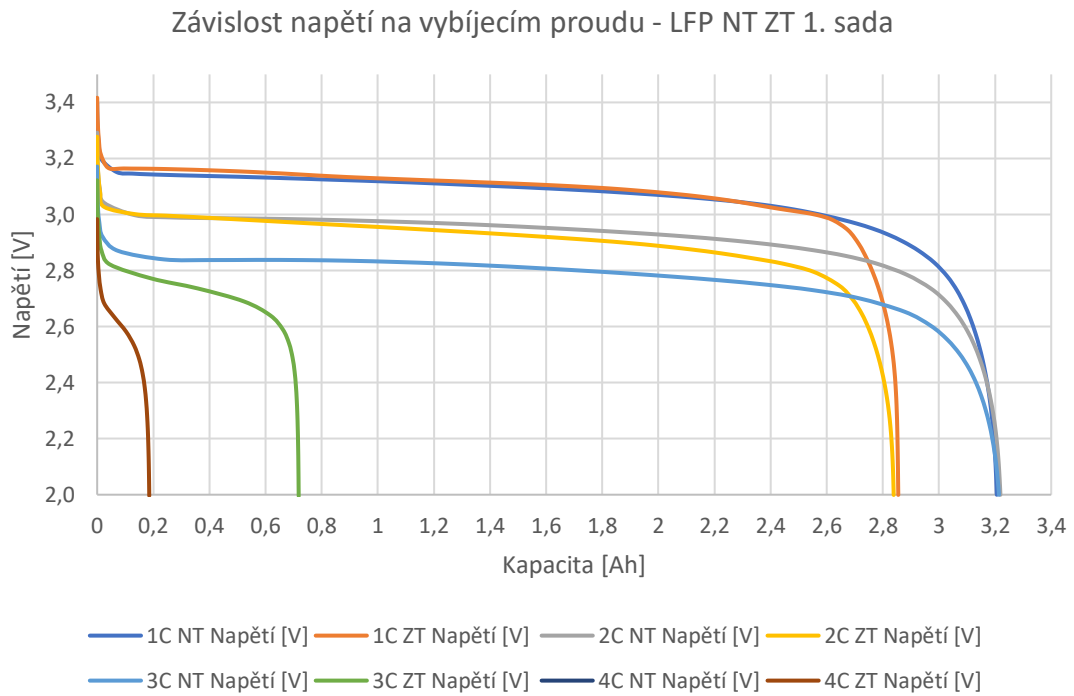


Graf 30 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 1. sada NT

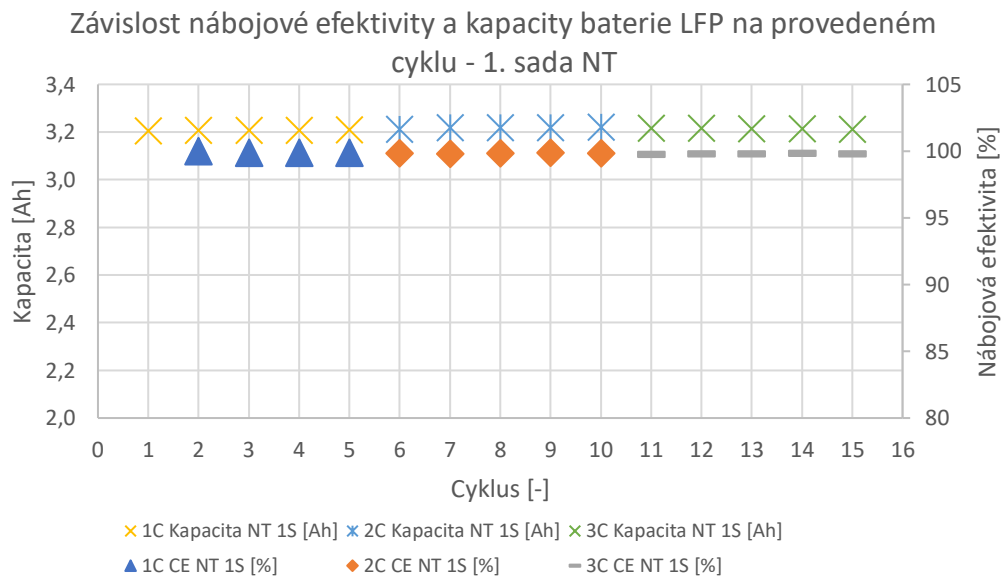


Graf 31 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 1. sada ZT

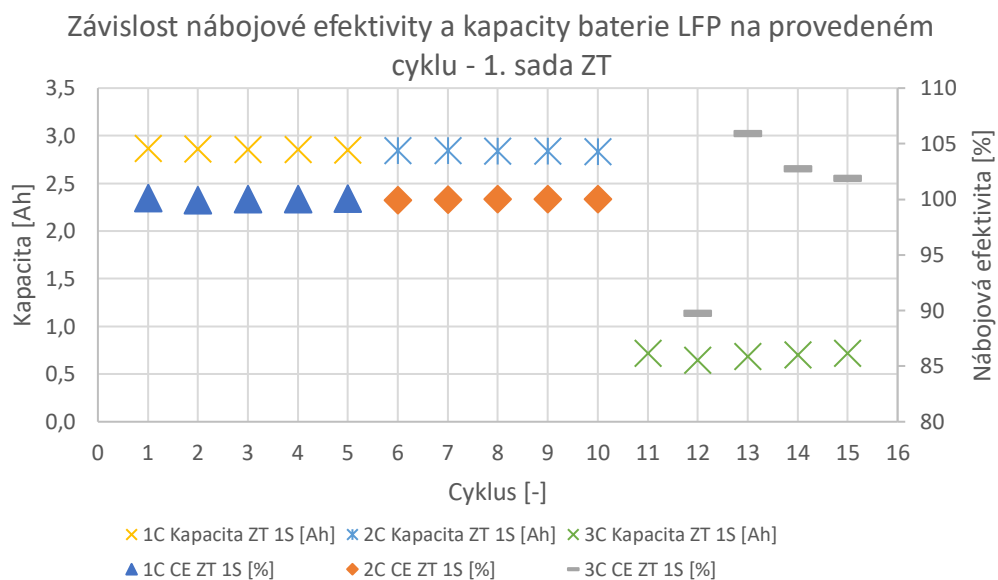
6.1.3 LFP normální teplotní podmínky a zvýšené teploty - První sada



Graf 32 Závislost napětí na vybíjecím proudu LFP NT ZT 1S

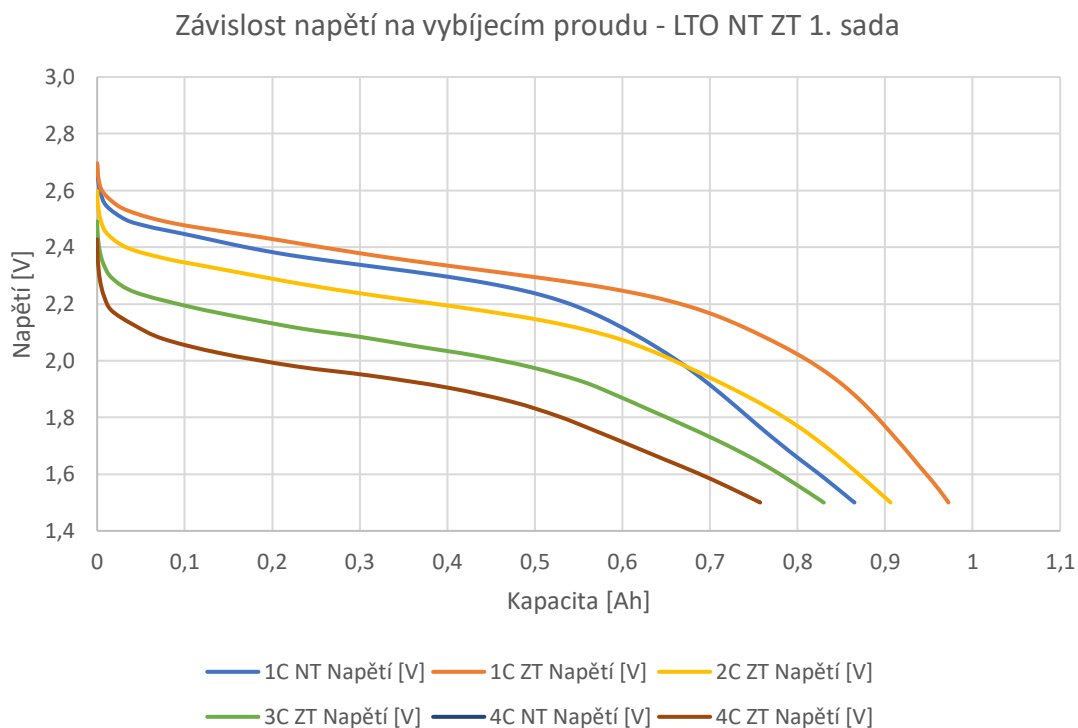


Graf 33 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LFP na provedeném cyklu - 1. sada NT

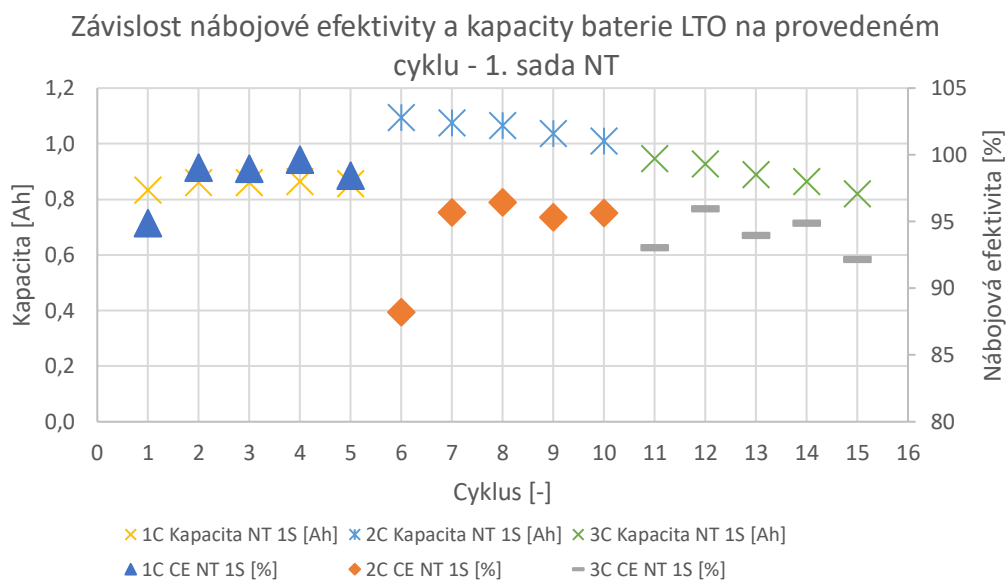


Graf 34 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LFP na provedeném cyklu - 1. sada ZT

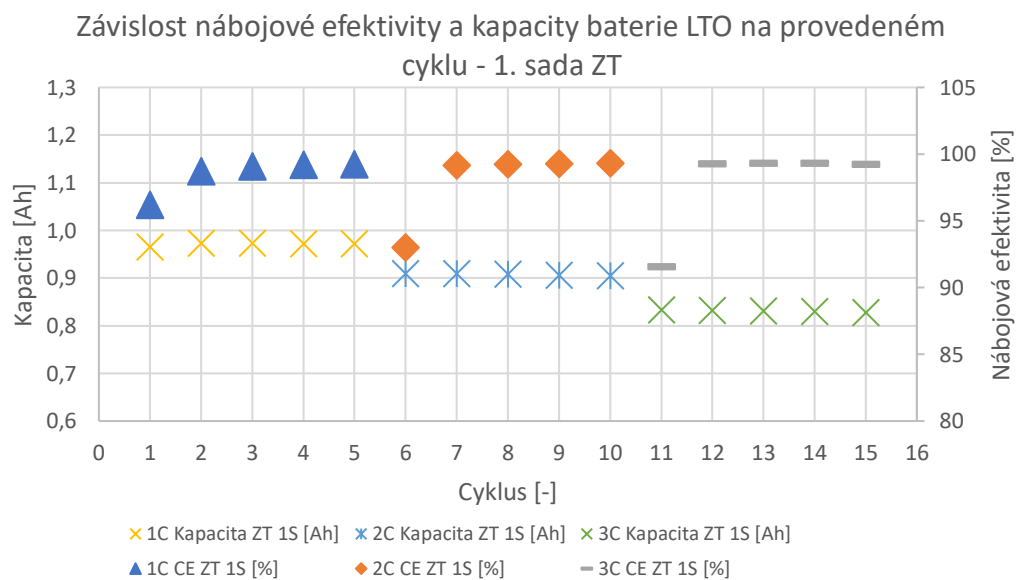
6.1.4 LTO normální teplotní podmínky a zvýšené teploty - První sada



Graf 35 Závislost napětí na vybíjecím proudu LTO NT ZT 1S



Graf 36 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada NT



Graf 37 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LTO na provedeném cyklu - 1. sada ZT

ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ – PRVNÍ SADA BATERIÍ

Testování baterií za normálních podmínek – Počáteční kapacita baterie Goowei klesla z počátečních 2898 mAh na 2761 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu teploty je patrné, že se teplota periodicky měnila z důvodu, že v místnosti, kde probíhalo měření byla nejspíše zapnutá klimatizace.

Počáteční kapacita baterie LG MH1 klesla z počátečních 2980 mAh na 2839 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu vyplývá, že teplota roste s vybíjením baterie z důvodu většího vnitřního odporu, ten se zvyšuje s hloubkou vybití. Během nabíjení konstantním napětím teplota klesá.

Počáteční kapacita baterie LFP klesla z počátečních 3297 mAh na 3203 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu lze vidět, že teplota roste s vybíjením baterie z důvodu většího vnitřního odporu, ten se zvyšuje s hloubkou vybití. Během nabíjení konstantním napětím teplota klesá.

Počáteční kapacita baterie LTO klesla z počátečních 1006 mAh na 942 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu lze vidět, že se teplota mění ve velmi malém rozsahu hodnot. Rozdílná charakteristika napětí je způsobena vlastnostmi a složením baterie, konkrétně LTO katodou.

Testování baterií za zvýšené teploty přineslo následující výsledky. Počáteční kapacita baterie Goowei klesla z počátečních 3071 mAh na 2833 mAh. Pokles kapacity byl vyhodnocen za provedených 200 cyklů. Z grafu je patrné, že teplota roste s vybíjením baterie z důvodu zvětšujícího se vnitřního odporu, který roste s hloubkou vybití baterie. Během nabíjení baterie konstantním napětím, teplota baterie klesá.

Počáteční kapacita baterie LG MH1 klesla z počátečních 3016 mAh na 2911 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu je patrné, že teplota roste s vybíjením baterie z důvodu zvětšujícího se vnitřního odporu, který roste s hloubkou vybití baterie. Během nabíjení baterie konstantním napětím, teplota baterie klesá.

Počáteční kapacita baterie LFP klesla z počátečních 3196 mAh na 2962 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Teplota roste s vybitím baterie z důvodu většího vnitřního odporu, který roste s hloubkou vybití baterie LFP.

Počáteční kapacita baterie LTO klesla z počátečních 1190 mAh na 1055 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Při vybíjení baterie roste teplota. Důvodem je větší vnitřní odpor zvětšující se s hloubkou vybití.

Při testování baterií za normálních podmínek byl na tom nejlépe baterie LFP, protože u něj nedošlo k výraznému poklesu kapacity, tak jako u zbylých třech baterií. Výrobce uvádí nominální kapacitu 3300 mAh. Počáteční kapacita byla u baterie 3297 mAh, což je velice dobrá hodnota při uvážení proudů použitých při měření, a po cyklování za normálních podmínek kapacita poklesla na 3203 mAh. Procentuální rozdíl kapacity je u baterie LFP 2,9 %. Baterie LG MH1 a baterie Goowei vykazovaly poklesy minimálně 3,5 až 7,7 %. U baterie LG MH1 udával výrobce nominální kapacitu 3200 mAh, na začátku měření měla baterie 2980 mAh a po cyklování 2839 mAh. U baterie Goowei udával výrobce kapacitu 3200 mAh, na začátku měření měla baterie 2898 mAh a na konci

měření byla kapacita na 2761 mAh. Procentuální rozdíl kapacit u těchto dvou baterií je 4,7 % (Goowei) a 4,7 % (LG MH1). Nejhůře dopadla při měření baterie na bázi LTO, neboť výrobce udával kapacitu 1300 mAh, na začátku měření měla však baterie pouze 1006 mAh a na konci měření měla pouze 942 mAh. Procentuální rozdíl kapacity při testování za normálních podmínek byl 6,4 %. Počet provedených cyklů za normální teploty byl 200. Při začátku měření nedosahovala počáteční kapacita hodnot udávaných výrobcí při měření za normálních teplot, tak i za zvýšených teplot. Procentuální pokles kapacity je shrnut v tabulkách Tabulka 23, Tabulka 24, Tabulka 25 a Tabulka 26 a to jak za normálních teplotních podmínek, tak i za zvýšených teplotních podmínek. Měření se provedlo celkem na osmi bateriích, od každého typu se jeden exemplář testoval za normálních teplot a druhý za zvýšených teplot. Proud nabíjení a vybíjení při cyklickém testování byly stanoveny na hodnotu 0,5 C, tedy pro Goowei a LG MH1 byl proud 1600 mA, pro baterii LFP 1650 mA a pro baterii na bázi LTO 650 mA.

Při testování za zvýšené teploty bylo provedeno 200 cyklů u baterie Goowei, LG MH1, LFP a LTO. Nejlépe vyšla baterie LG MH1 a nejhůře baterie LTO. Počáteční kapacita baterie LG MH1 byla 3016 mAh a po měření v teplotní komoře měla baterie 2911 mAh. Procentuální rozdíl kapacity byl u baterie LGMH1 3,5 %. Baterie Goowei 7,7 %, LFP 7,3 %. Baterie Goowei měla na začátku měření počáteční kapacitu 3071 mAh a na konci měření 2833 mAh. Baterie LiFePO₄ měla na začátku měření 3196 mAh a na konci 2962 mAh. Baterie LTO měla počáteční kapacitu 1190 mAh a na konci měření kapacita klesla na 1055 mAh. Procentuální rozdíl kapacity byl 11,3 %. Pokles kapacity na cyklus je shrnut v Tabulka 23 a Tabulka 25. Test schopnosti dodat požadovaný proud za různých teplotních podmínek je vidět v Graf 26, Graf 29, Graf 32 a Graf 35. V charakteristikách je vidět jistá variabilita oproti novým bateriím ze sady 2 kvůli postupujícím degradačním procesům baterií. U LFP za zvýšených teplot je vidět silný pokles kapacity se zvyšujícím se proudem. U LTO je vidět, že baterie vykazuje strmější závislost než baterie druhé sady. U baterií Goowei a LG MH1 je vliv teploty minimální, zvýšená teplota přispívá k nepatrně vyššímu napětí během vybíjení.

7. DRUHÁ SADA BATERIÍ – MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOTNÍCH PODMÍNEK A ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZA NORMÁLNÍCH TEPLOT

Tato část diplomové práce je věnována testování lithium-iontových baterií za normálních podmínek. Testována byla druhá sada baterií stejného typu.

Baterie prošly při měření 200 cykly. Přičemž nejprve byly baterie nabodovány, poté umístěny do stojanu, kde k nim bylo přidáno teplotní čidlo a byly dále napojeny na měřicí zařízení BioLogic BCS-815 na kanály F1, F2, F3 a F4. Nastavení parametrů jednotlivých baterií a použitá teplota je blíže popsána v návrhu a postupu řešení, které jsou uvedeny výše v textu.

Měření probíhalo na druhé sadě baterií, která obsahovala:

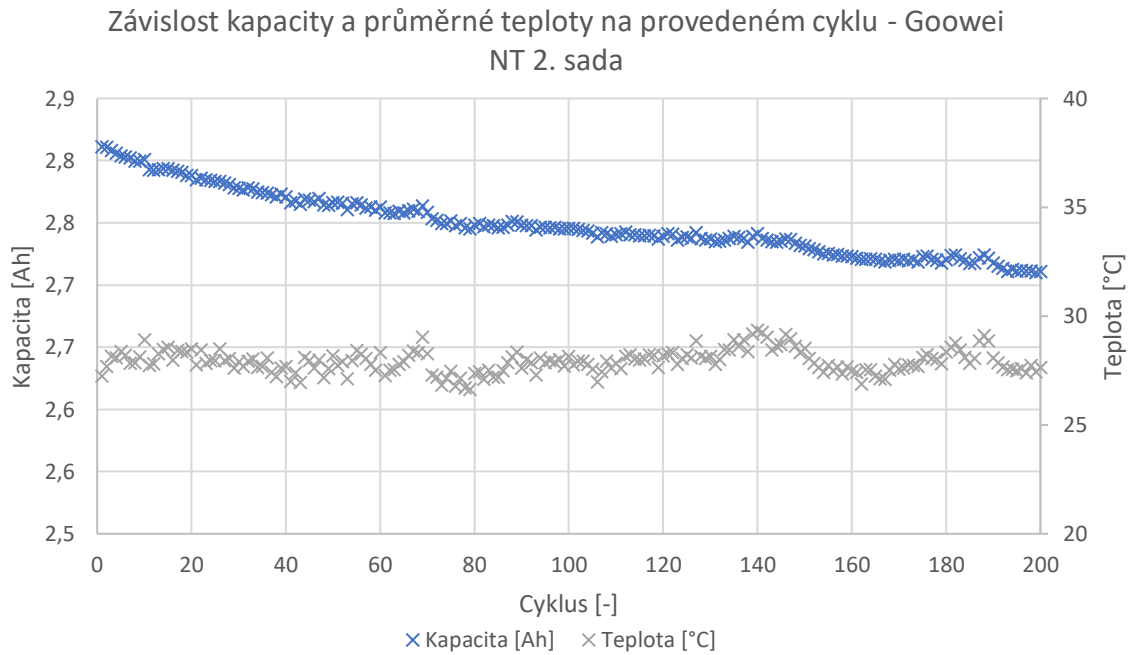
- 1x baterii Goowei
- 1x baterii LG MH1
- 1x baterii LFP-26650-3300
- 1x baterii LTO 1865-13

Na bateriích byla sledována teplota, proud, napětí, kapacita a nábojová účinnost.

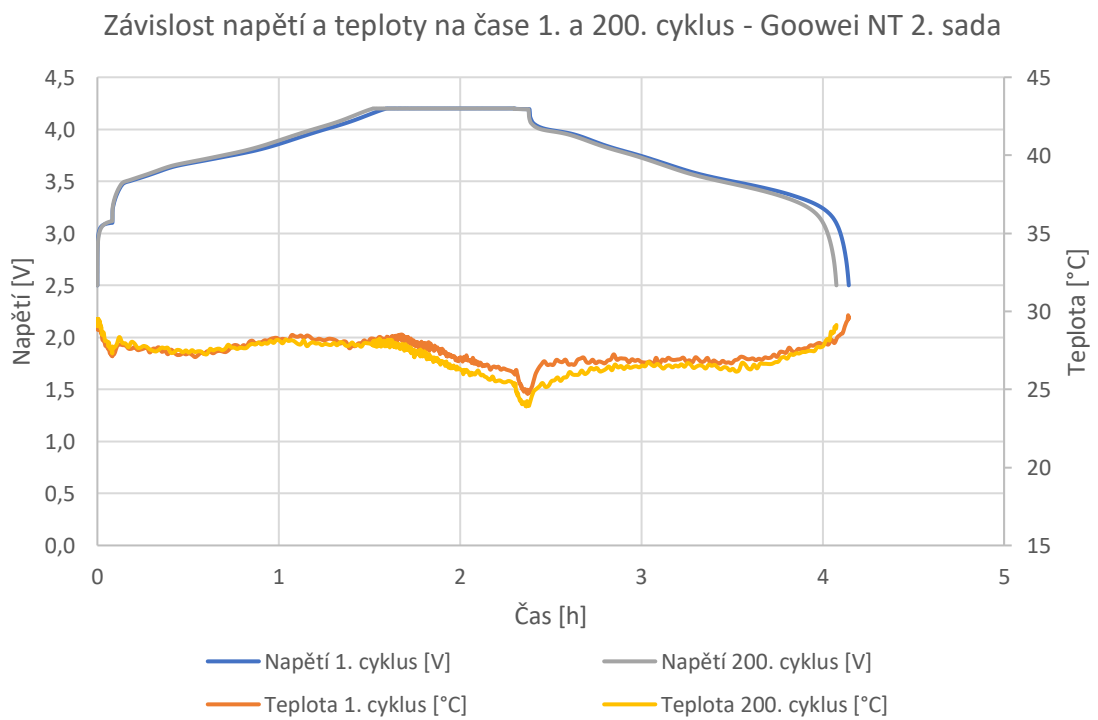
Tyto parametry byly poté vyjádřeny graficky a tabulkovým zhodnocením, kde je vyjádřena nominální kapacita, počáteční kapacita, konečná kapacita, rozdíl kapacity, a to jak v mAh, tak i v procentech.

7.1 Gooweï 18650

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii Gooweï 18650 za normálních teplot

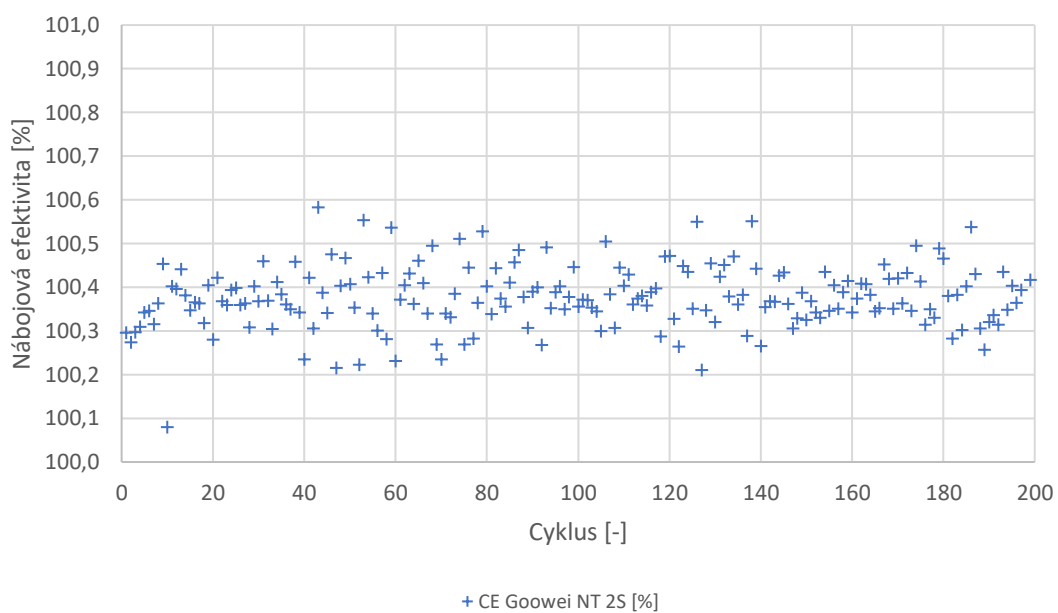


Graf 38 Závislost kapacity a teploty Gooweï NT 2S



Graf 39 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus Gooweï NT 2S

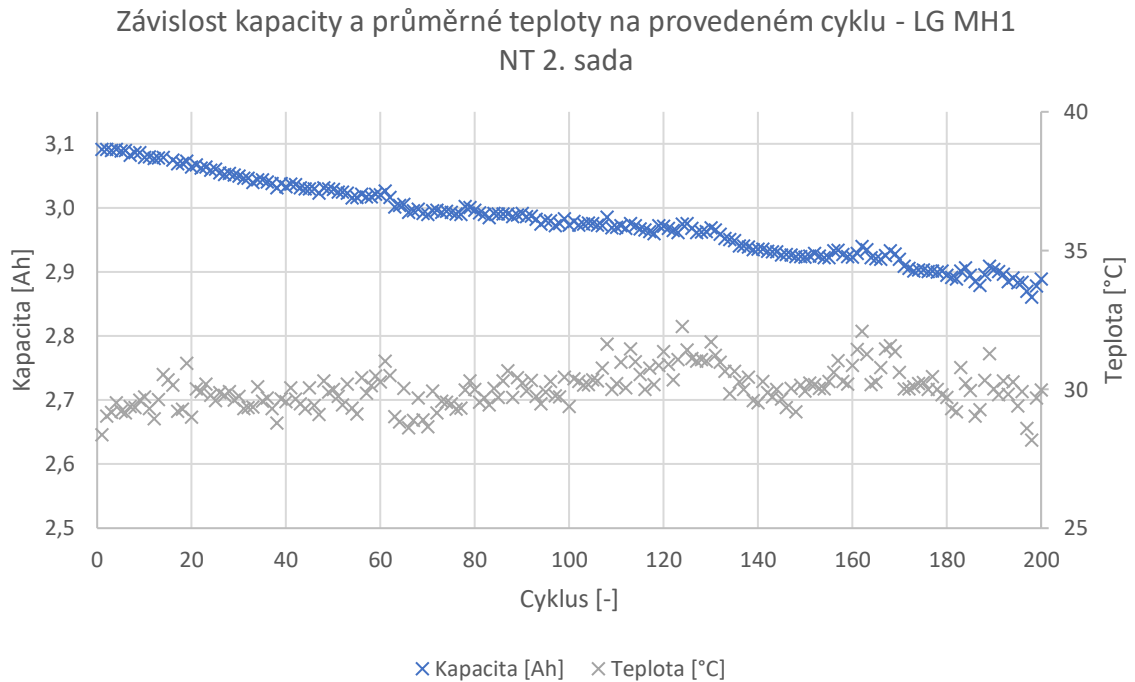
Závislost nábojové efektivity baterie Gooweï 18650 na provedeném cyklu 2. sada NT



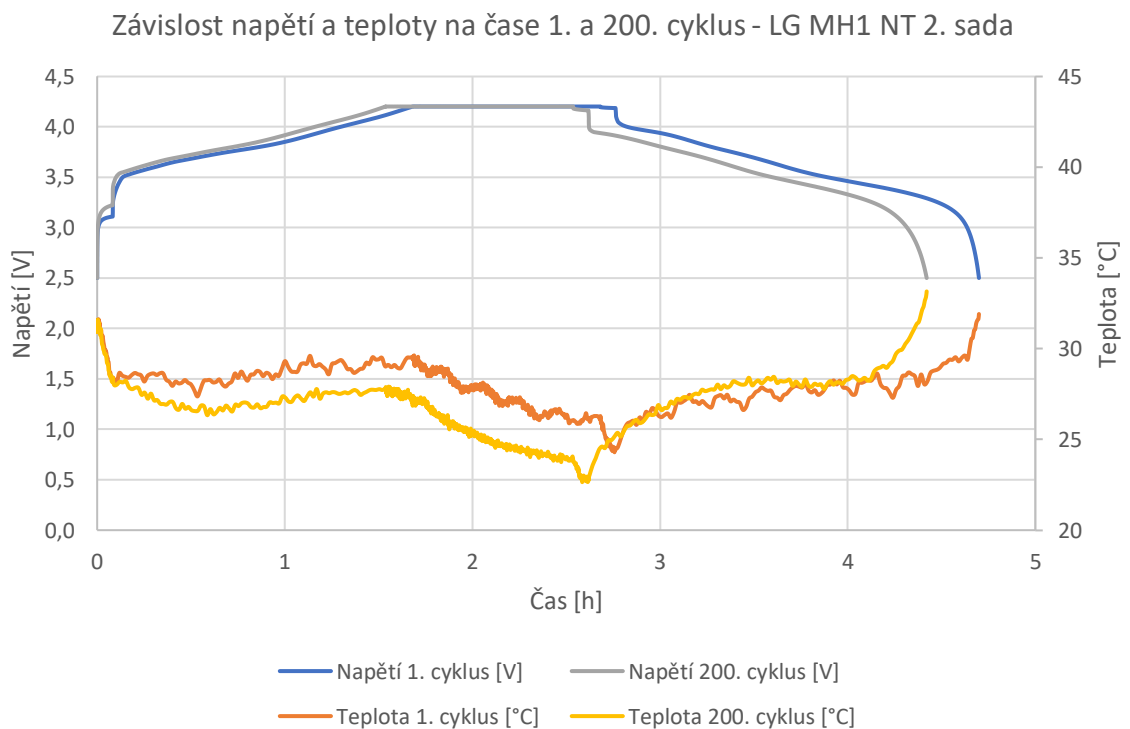
Graf 40 Závislost nábojové efektivity baterie Gooweï na provedeném cyklu - 2. sada NT

7.2 LG MH1

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LG MH1 za normálních teplot

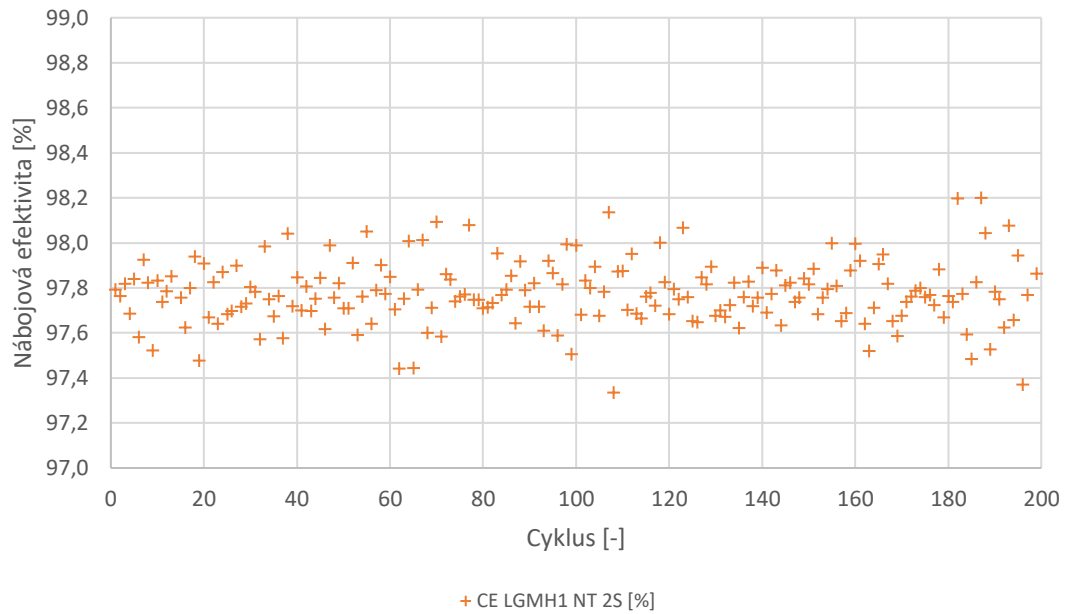


Graf 41 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LG MH1 NT 2S



Graf 42 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LG MH1 NT 2S

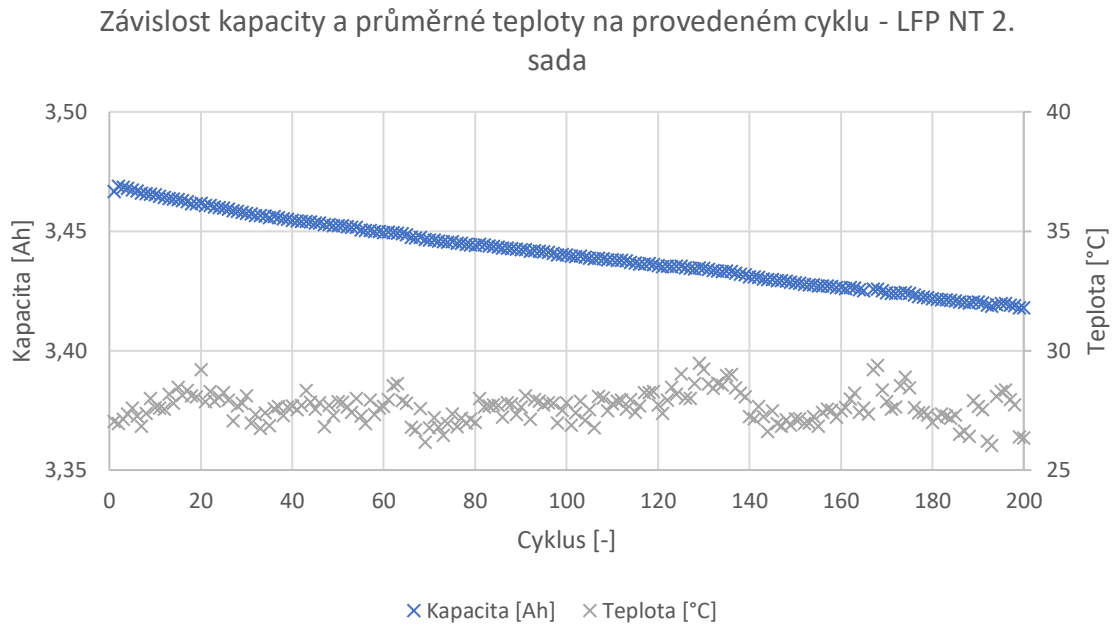
Závislost nábojové efektivity LG MH1 baterie na provedeném cyklu 2. sada NT



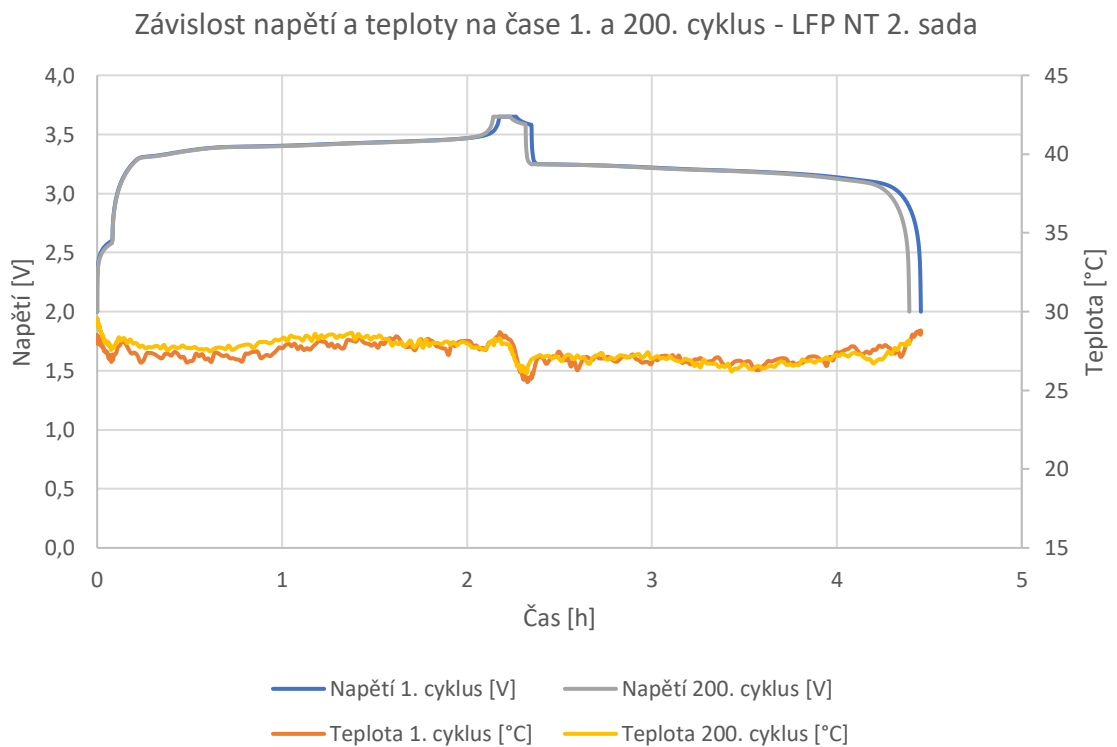
Graf 43 Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 2. sada NT

7.3 LiFePO₄ – LFP-26650-3300

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LFP-26650-3300 za normálních teplot

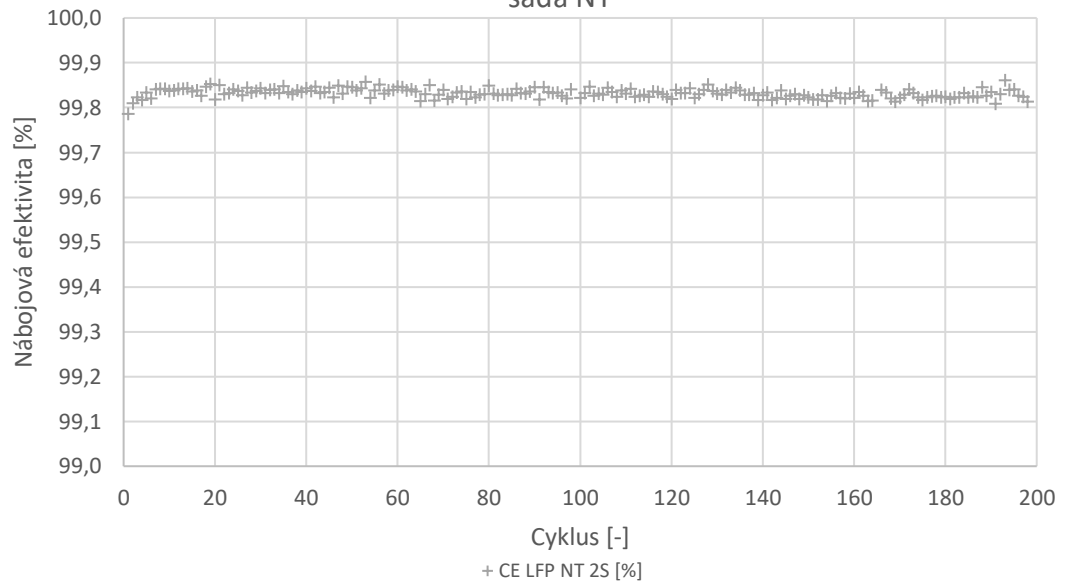


Graf 44 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LFP NT 2S



Graf 45 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LFP NT 2S

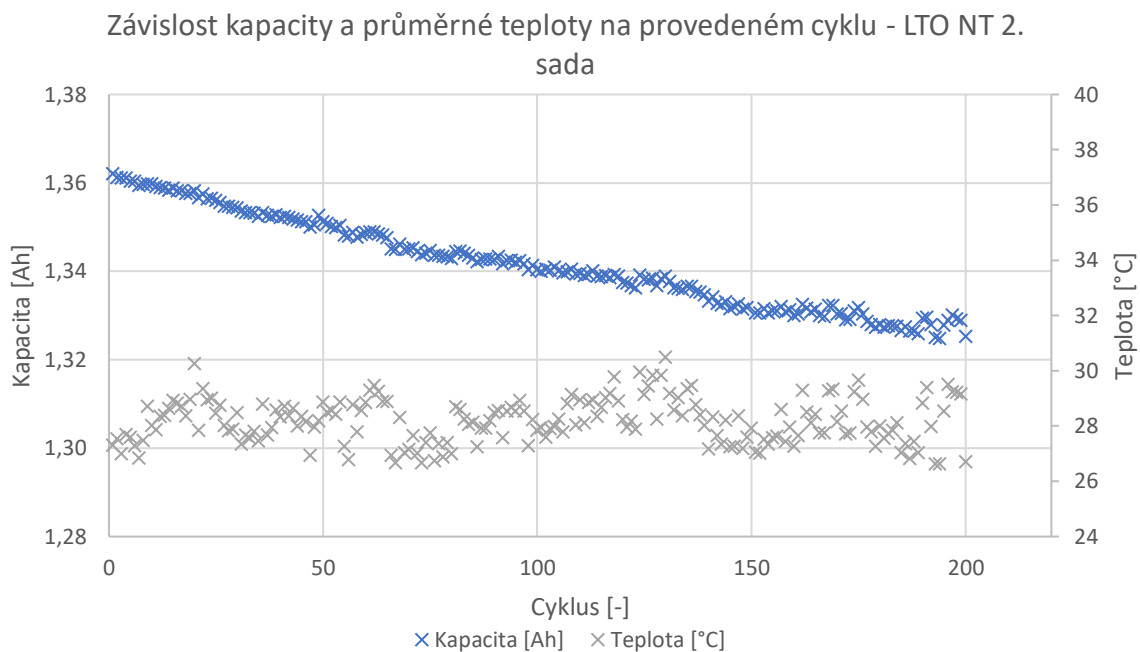
Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu 2.
sada NT



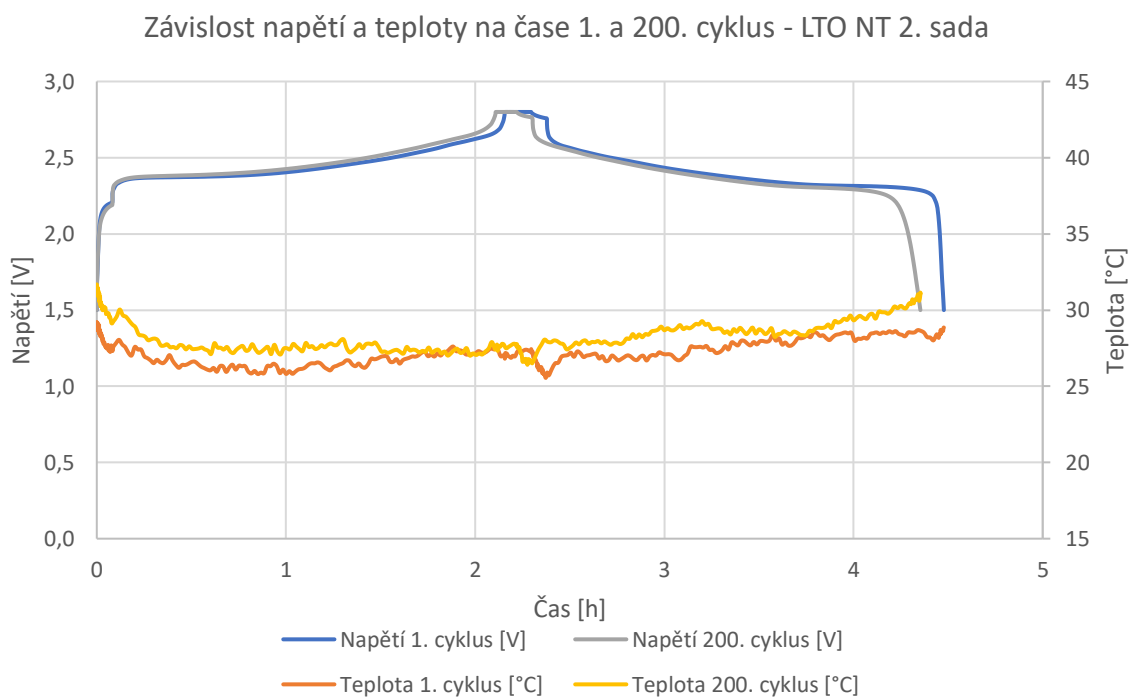
Graf 46 Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 2. sada NT

7.4 LTO 1865-13

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LTO 1865-13 za normálních teplot

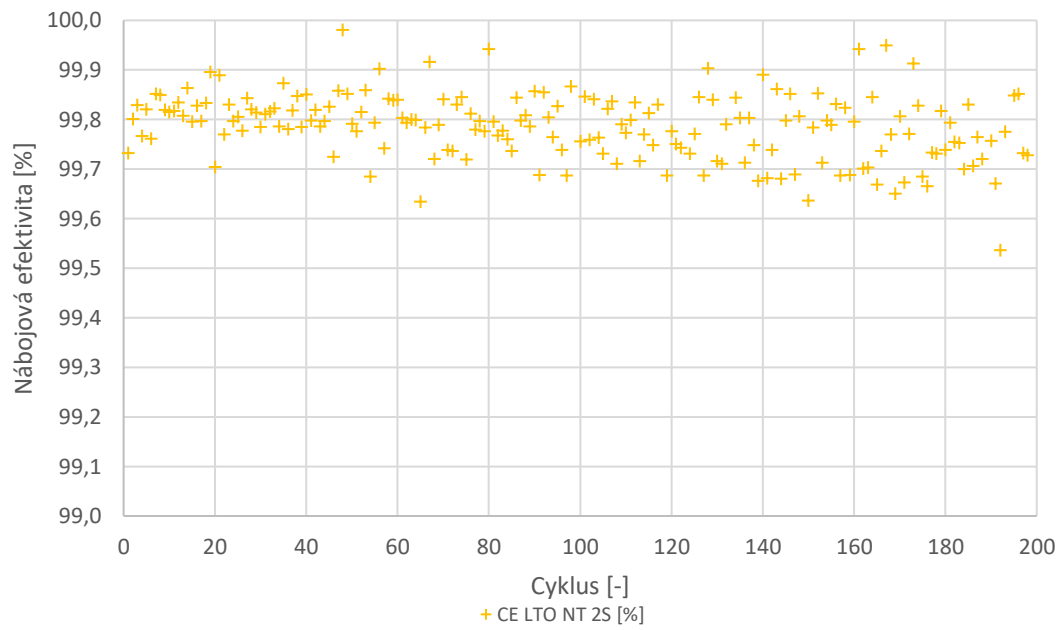


Graf 47 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LTO NT 2S



Graf 48 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LTO NT 2S

Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu 2. sada NT



Graf 49 Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 2. sada NT

7.5 Tabulkové zhodnocení měření za normálních teplotních podmínek

Tabulka poklesu kapacity za normálních teplotních podmínek.

Tabulka 27 Pokles kapacity za normálních teplotních podmínek - 2S

Pokles kapacity za normálních teplot – 200 cyklů				
Typ baterie	Goowe	LG MH1	LFP	LTO
Nominální kapacita [mAh]	3200	3200	3300	1300
Počáteční kapacita [mAh]	2811	3091	3467	1362
Relativní počáteční kapacita oproti nominální [%]	87,4	96,6	105,1	104,8
Konečná kapacita po 200 cyklech [mAh]	2711	2889	3417	1325
Rozdíl kapacity po 200 cyklech [mAh]	100	202	50	37
Rozdíl kapacity na cyklus [mAh/cyklus]	0,500	1,010	0,250	0,185
Relativní rozdíl kapacity po 200 cyklech [%]	3,6	6,5	1,4	2,7
Relativní rozdíl kapacity na cyklus [%/cyklus]	0,0178	0,0327	0,0072	0,0136
Predikce počtu cyklů (lineární pokles z počáteční kapacity na 80% počáteční kapacity) [-]	1124	612	2774	1472
Predikce počtu cyklů (lineární pokles měřené počáteční kapacity na 80% nominální kapacity) [-]	502	526	3308	1741

Tabulka průměrné nábojové účinnosti.

Typ baterie	Průměrná Nábojová účinnost [%]
Goowe	100,377
LG MH1	97,776
LFP	99,832
LTO	99,787

Tabulka 28 Průměrná nábojová účinnost za normálních teplotních podmínek - 2S

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT

Tato část diplomové práce je věnována testování lithium-iontových baterií za zvýšených teplot.

Baterie prošly při měření 200 cykly. Nastavení parametrů jednotlivých baterií je blíže popsáno v návrhu a postupu řešení. Měření probíhalo na druhé sadě baterií, která obsahovala:

- 1x baterii Goowei
- 1x baterii LG MH1
- 1x baterii LFP-26650-3300
- 1x baterii LTO 1865-13

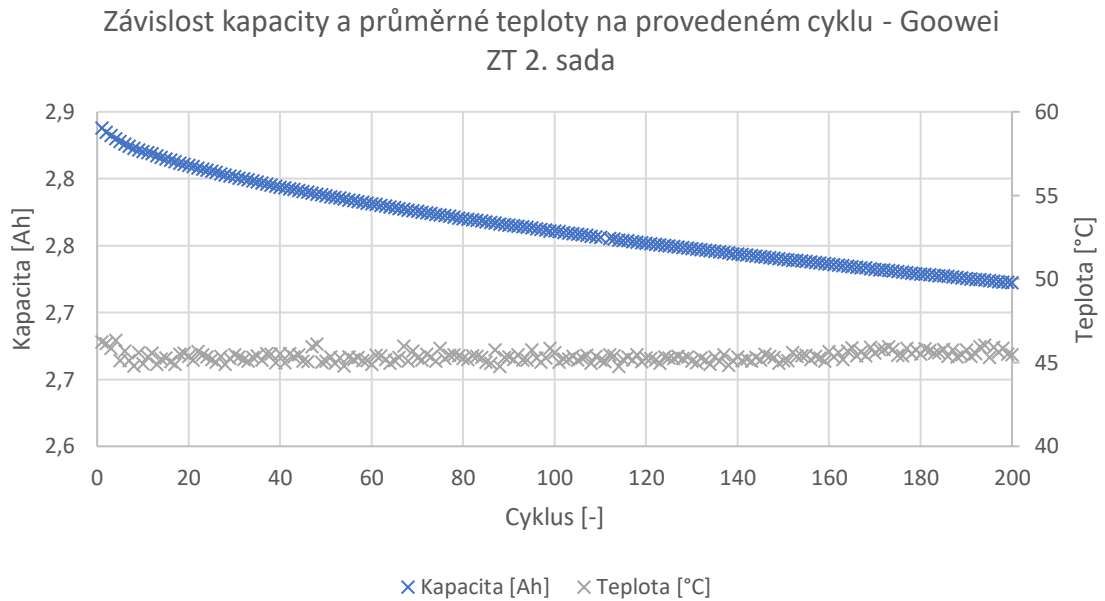
Na bateriích byla sledována teplota, kapacita, nábojová účinnost, proud a napětí.

Tyto parametry byly poté vyjádřeny graficky a tabulkovým zhodnocením, kde je vyjádřena nominální kapacita, počáteční kapacita, konečná kapacita, rozdíl kapacity, a to jak v mAh, tak i v procentech.

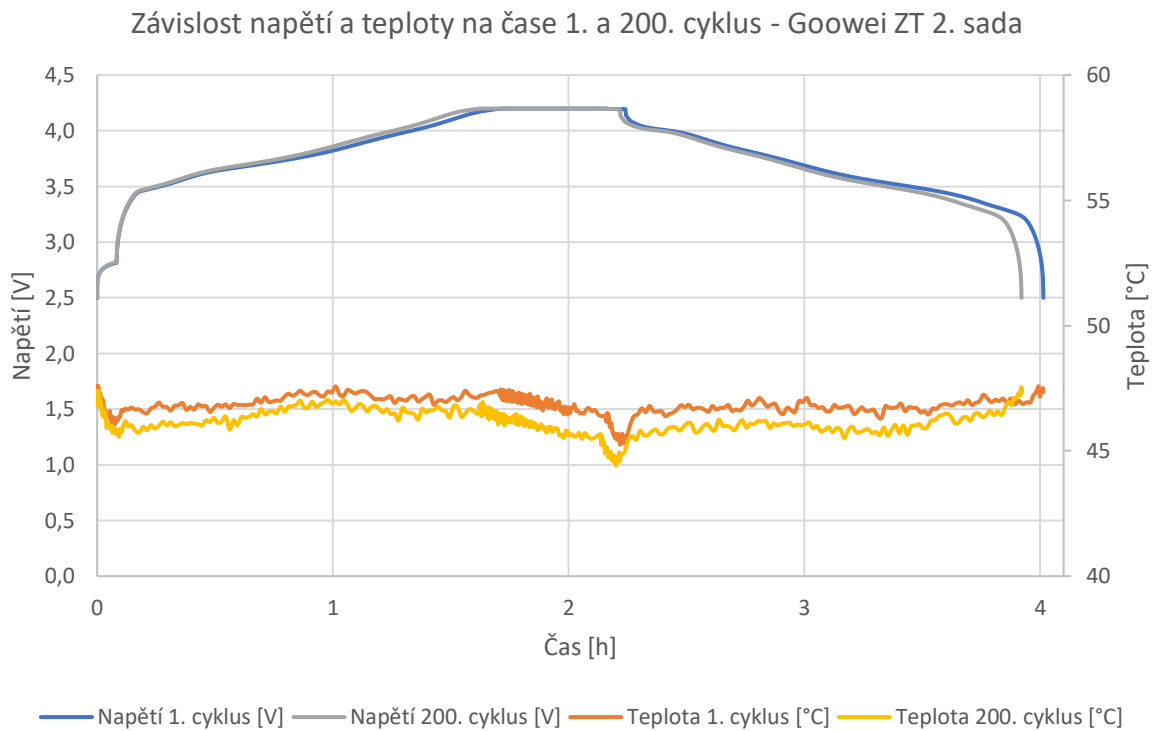
Všechny čtyři baterie byly vyhrazeny pro testování při teplotě 45 stupňů Celsia. Baterie byly umístěny do termostatického zařízení, kde byly připojeny na zařízení BioLogic BCS – 815. Na těchto bateriích byly také umístěny teplotní čidla, aby bylo možné zaznamenat teplotu na bateriích během měření. Proud použitý pro měření za zvýšených teplot byl shodný jako u měření za normálních teplot a činil 0,5 C.

7.6 Gooweï 18650

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii Gooweï 18650 za normálních teplotních podmínek.

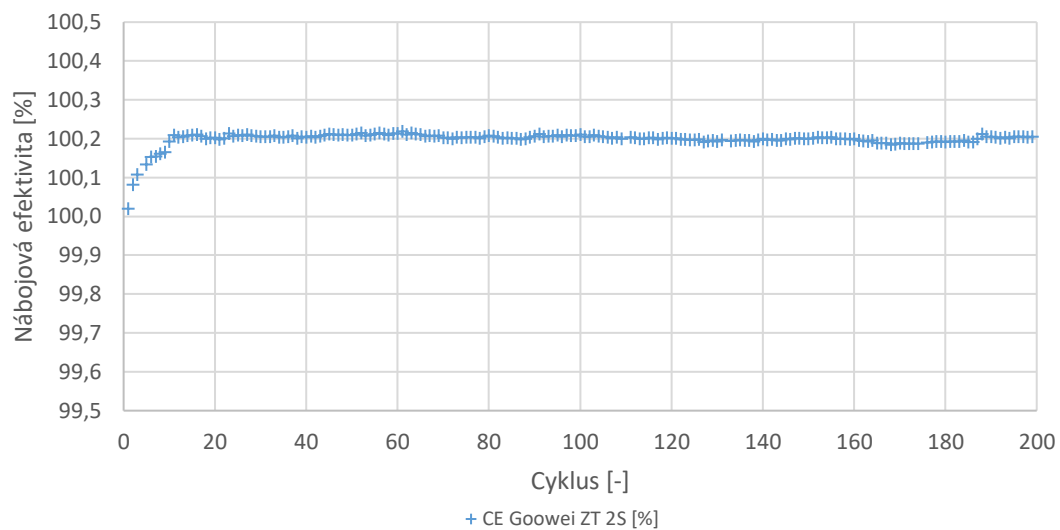


Graf 50 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu Gooweï ZT 2S



Graf 51 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus Gooweï ZT 2S

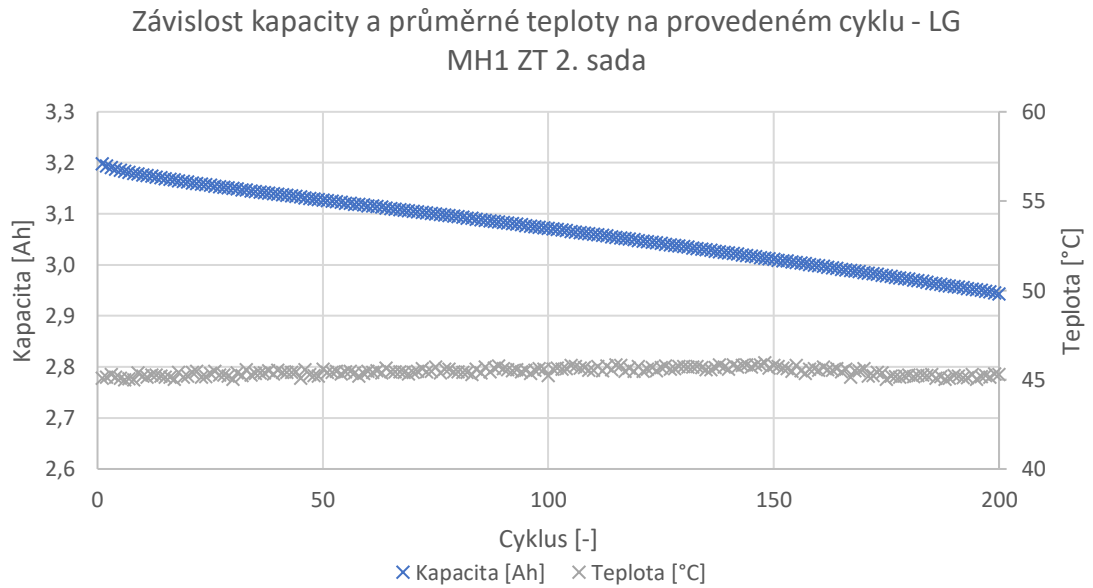
Závislost nábojové efektivity baterie Gooweí na provedeném cyklu 2. sada ZT



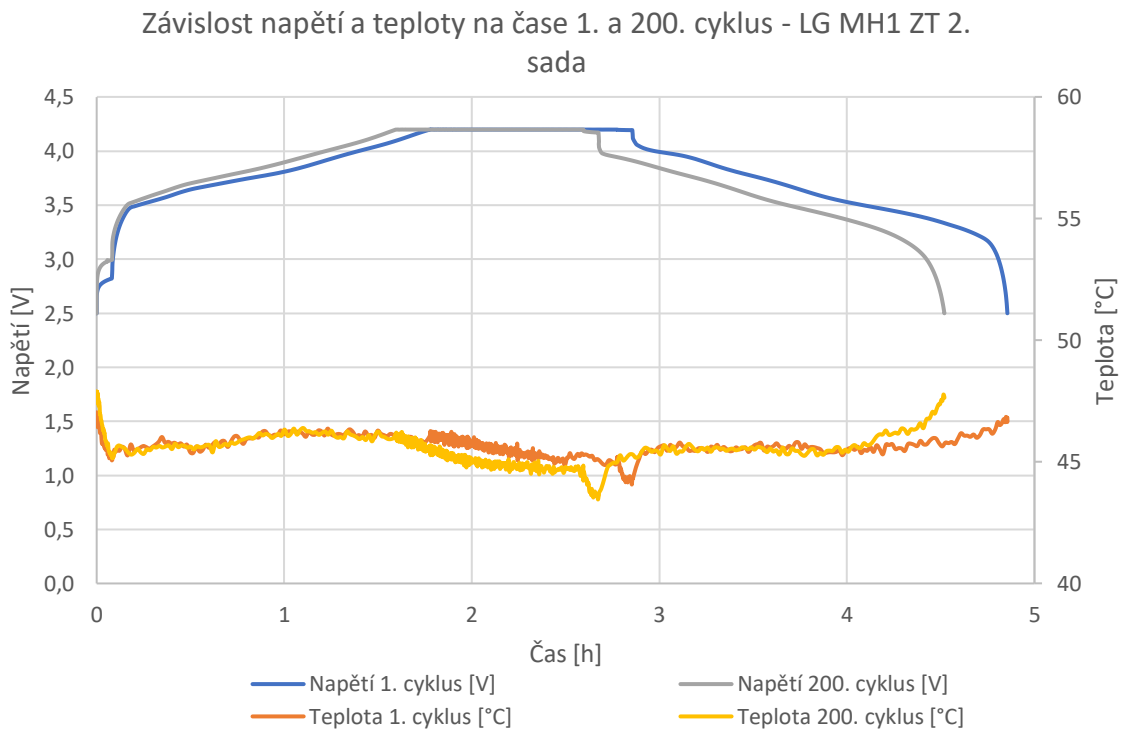
Graf 52 Závislost nábojové efektivity baterie Gooweí na provedeném cyklu - 2. sada ZT

7.7 LG MH1

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LG MH1 za normálních teplot

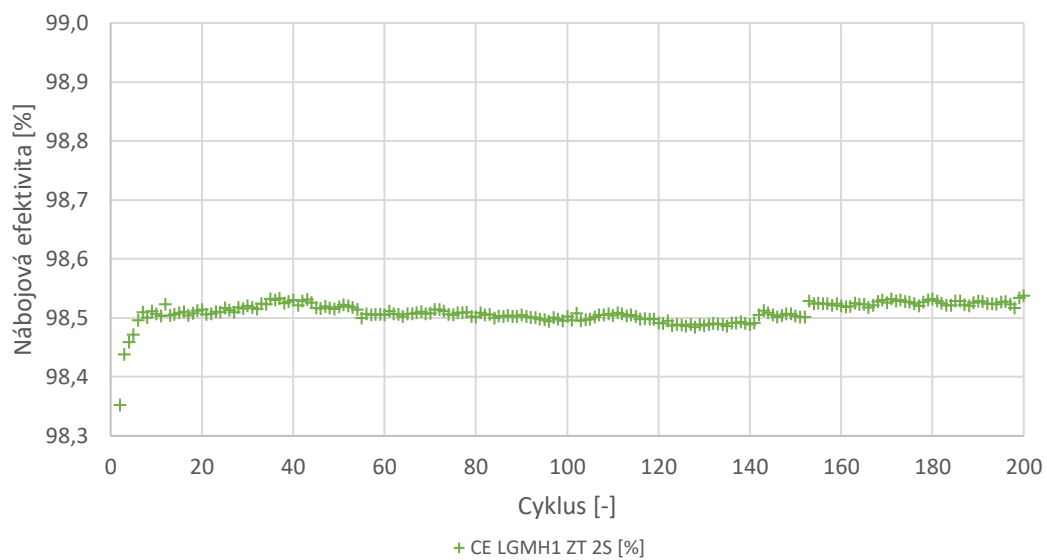


Graf 53 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LG MH1 ZT 2S



Graf 54 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LG MH1 ZT 2S

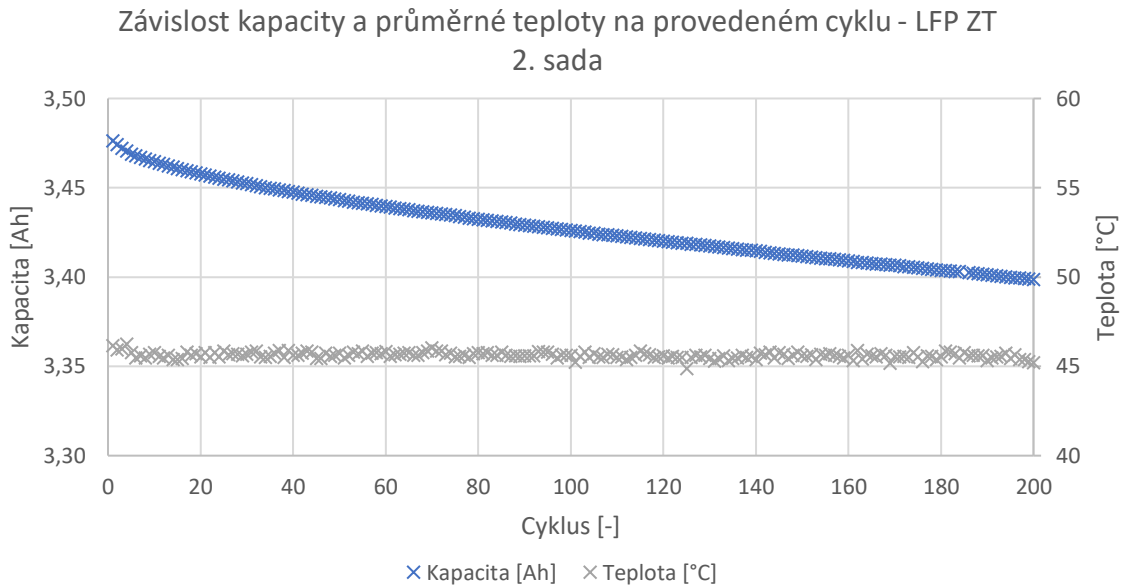
Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu
2. sada ZT



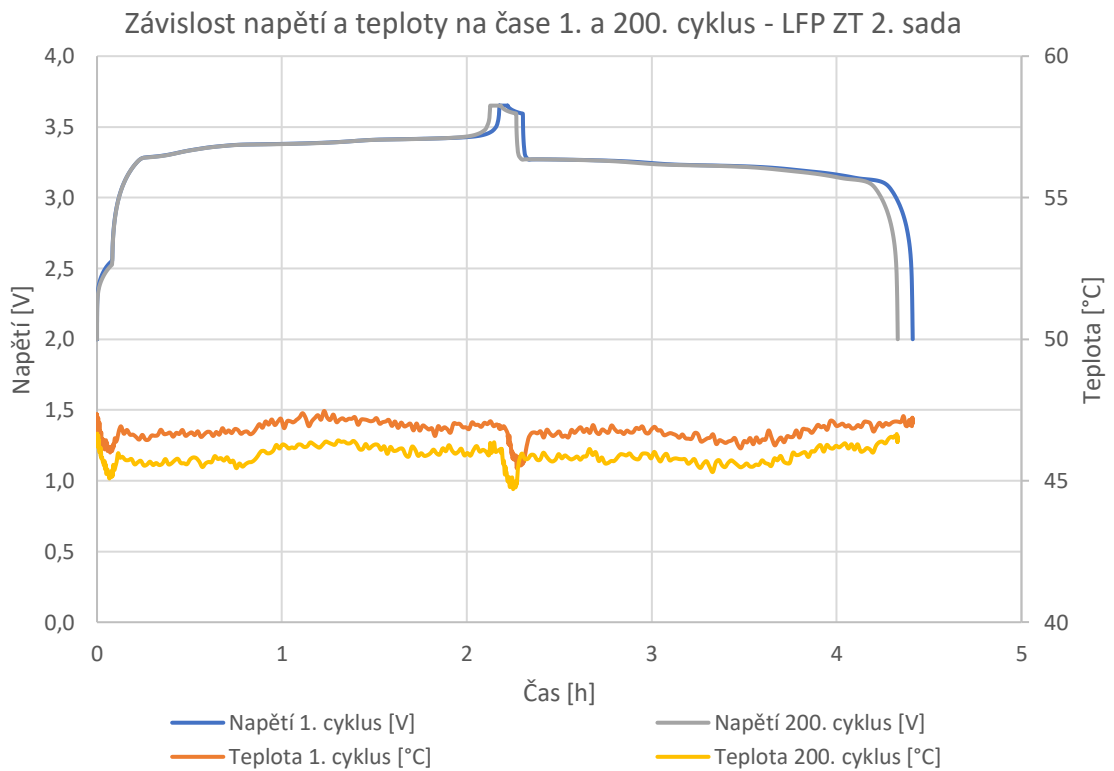
Graf 55 Závislost nábojové efektivity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 2. sada ZT

7.8 LiFePO₄ - LFP-26650-3300

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LFP-26650-3300 za normálních teplot

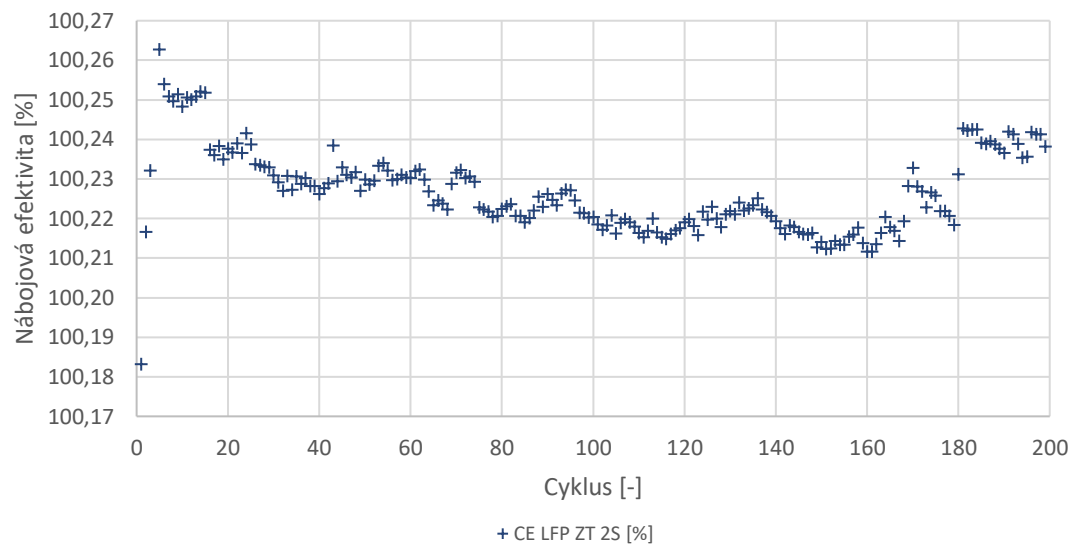


Graf 56 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LFP ZT 2S



Graf 57 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LFP ZT 2S

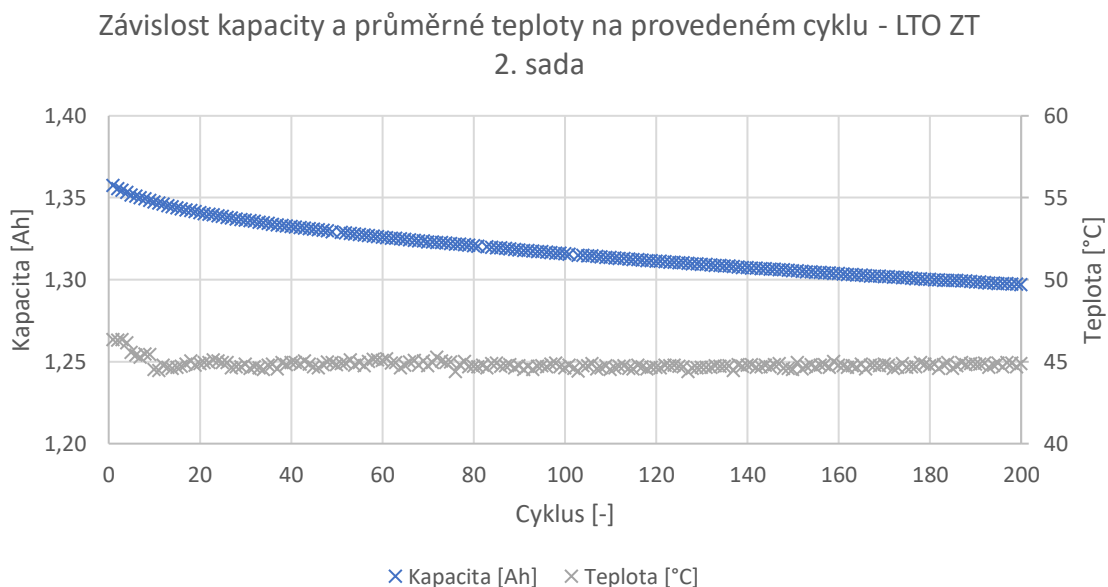
Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu 2. sada ZT



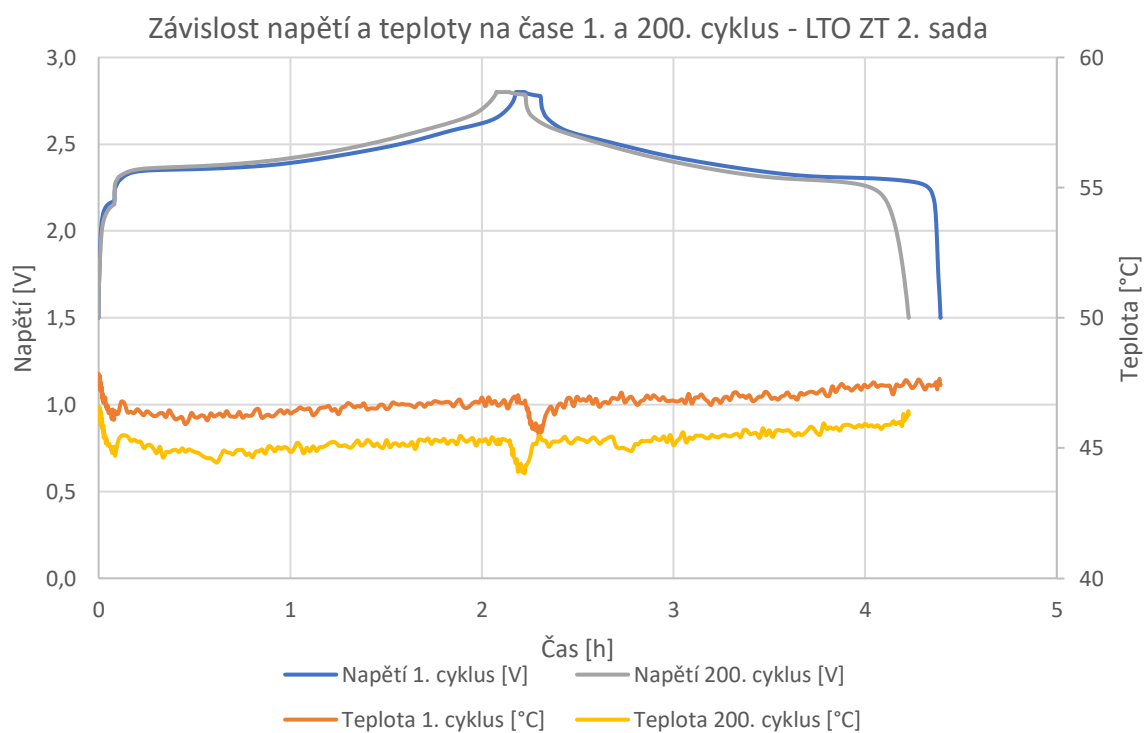
Graf 58 Závislost nábojové efektivity baterie LFP na provedeném cyklu - 2. sada ZT

7.9 LTO 1865-13

Zobrazený graf Závislosti kapacity na provedeném cyklu pro baterii LTO 1865-13 za normálních teplot

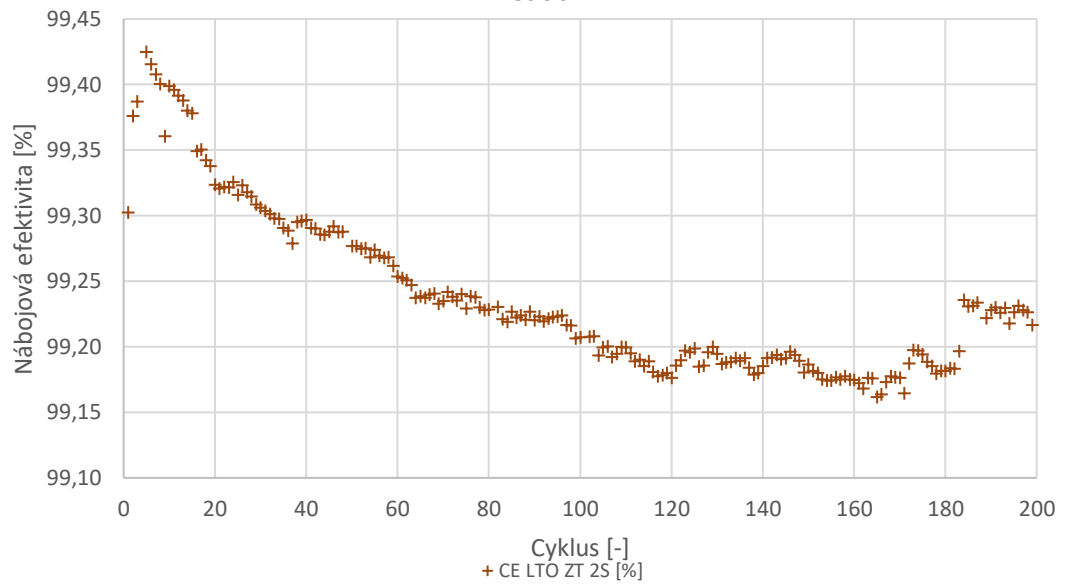


Graf 59 Závislost kapacity a teploty na provedeném cyklu LTO ZT 2S



Graf 60 Závislost napětí a teploty na čase 1. a 200. cyklus LTO ZT 2S

Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu 2. sada ZT



Graf 61 Závislost nábojové efektivity baterie LTO na provedeném cyklu - 2. sada ZT

7.10 Tabulkové zhodnocení měření za zvýšených teplotních podmínek

Tabulka poklesu kapacity za zvýšených teplotních podmínek.

Tabulka 29 Pokles kapacity za zvýšených teplotních podmínek - 2S

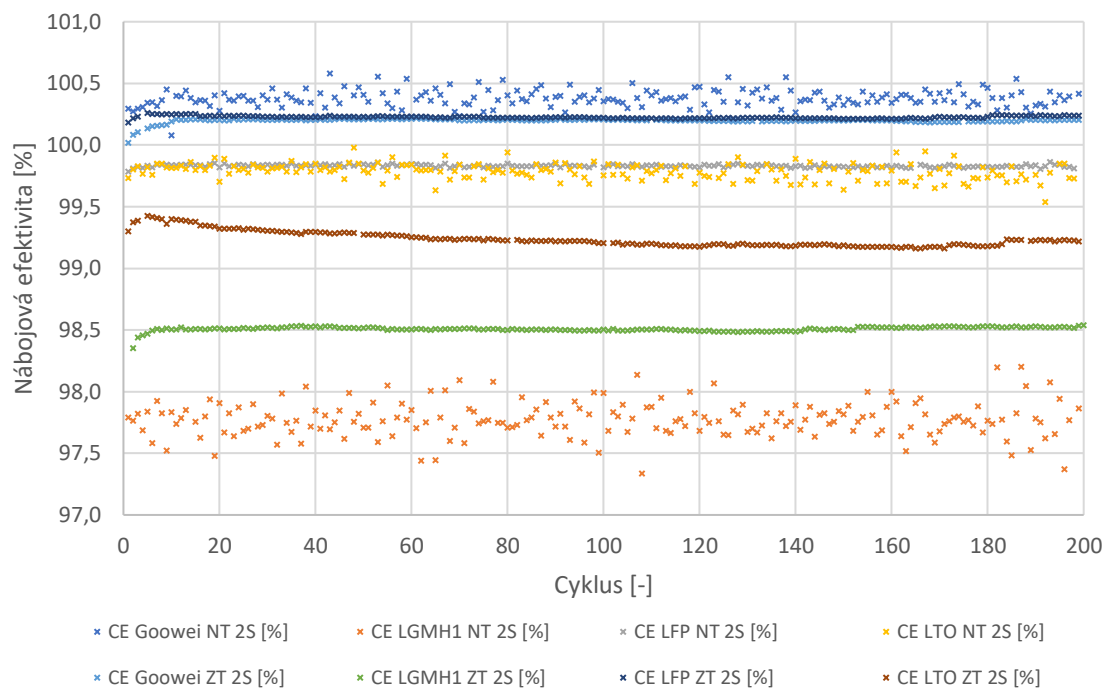
Pokles kapacity za zvýšených teplot – 200 cyklů				
Typ baterie	Goowei	LG MH1	LFP	LTO
Nominální kapacita [mAh]	3200	3200	3300	1300
Počáteční kapacita [mAh]	2838	3198	3476	1358
Relativní počáteční kapacita oproti nominální [%]	88,7	99,9	105,3	104,5
Konečná kapacita po 200 cyklech [mAh]	2722	2943	3399	1297
Rozdíl kapacity po 200 cyklech [mAh]	116	255	77	61
Rozdíl kapacity na cyklus [mAh/cyklus]	0,580	1,275	0,385	0,305
Relativní rozdíl kapacity po 200 cyklech [%]	4,1	8	2,2	4,5
Relativní rozdíl kapacity na cyklus [%/cyklus]	0,0204	0,0399	0,0111	0,0225
Predikce počtu cyklů (lineární pokles z počáteční kapacity na 80% počáteční kapacity) [-]	979	502	1806	890
Predikce počtu cyklů (lineární pokles měřené počáteční kapacity na 80% nominální kapacity) [-]	479	500	2171	1043

Tabulka průměrné nábojové účinnosti.

Tabulka 30 Průměrná nábojová účinnost za zvýšených teplotních podmínek - 2S

Typ baterie	Průměrná Nábojová účinnost [%]
Goowei	100,199
LG MH1	98,509
LFP	100,227
LTO	99,238

Závislost nábojové efektivity baterie na provedeném cyklu 2. sada

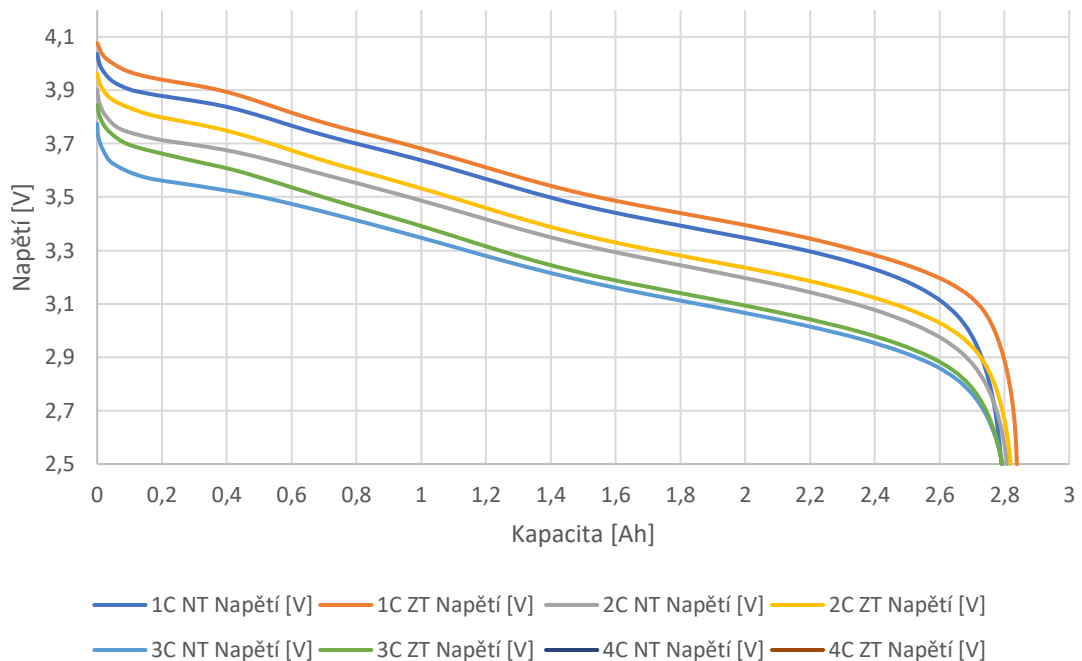


Graf 62 Závislost nábojové efektivity na provedeném cyklu 2S

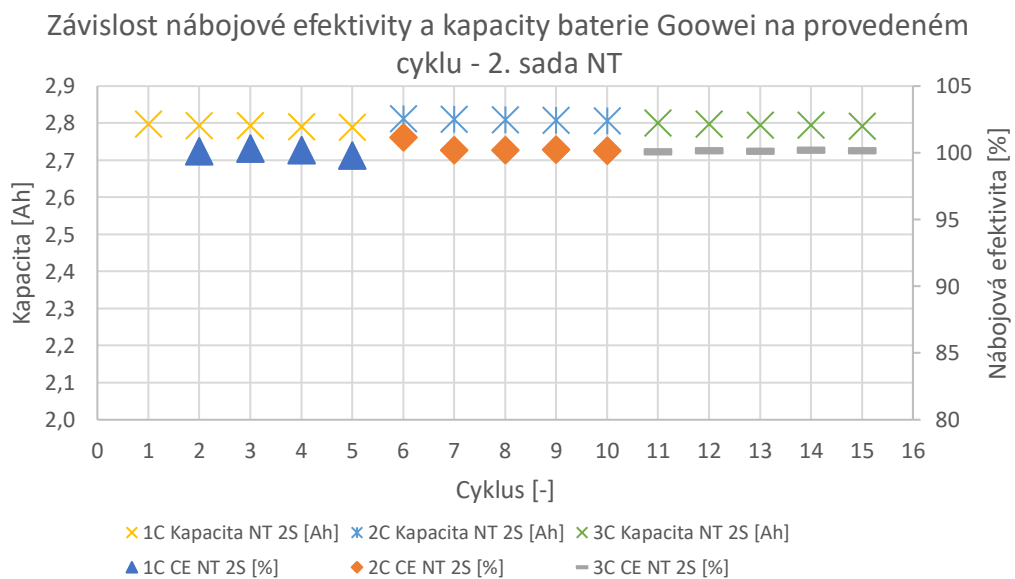
7.1 Rate capability test – proudová zátěž – normální teplotní podmínky a zvýšená teplota -Druhá sada

7.1.1 Gowei normální teplotní podmínky a zvýšená teplota – druhá sada

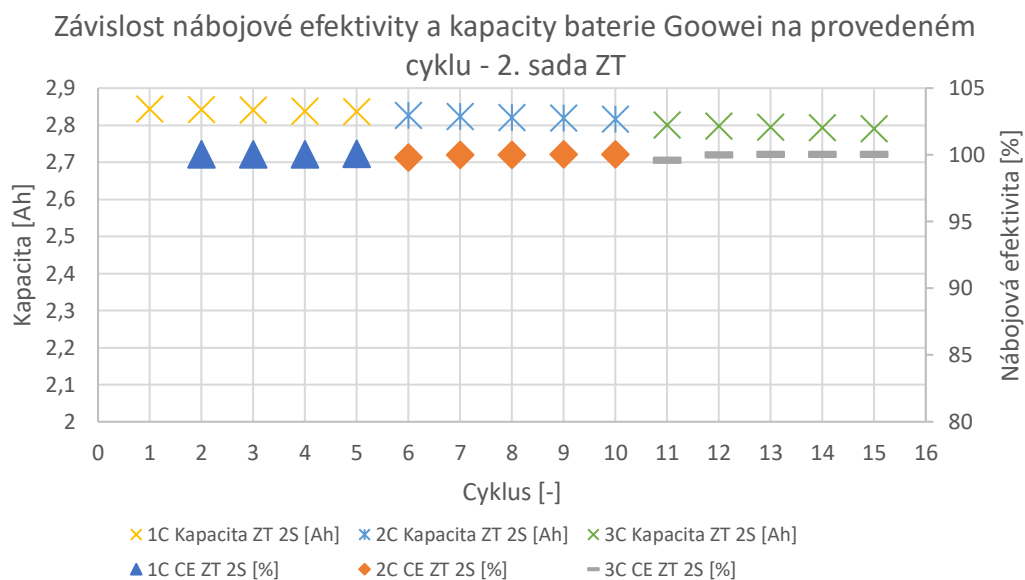
Závislost napětí na vybíjecím proudu - Gowei NT ZT 2. sada



Graf 63 Závislost napětí na vybíjecím proudu Gowei NT ZT 2S

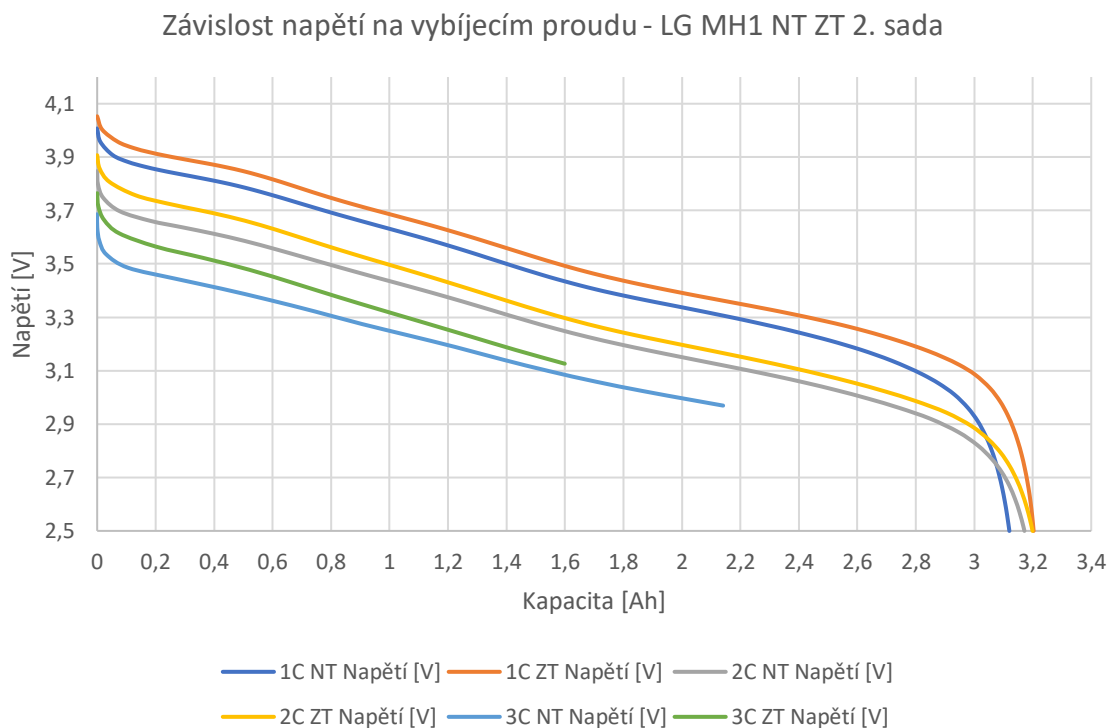


Graf 64 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie Gowei na provedeném cyklu - 2. sada NT

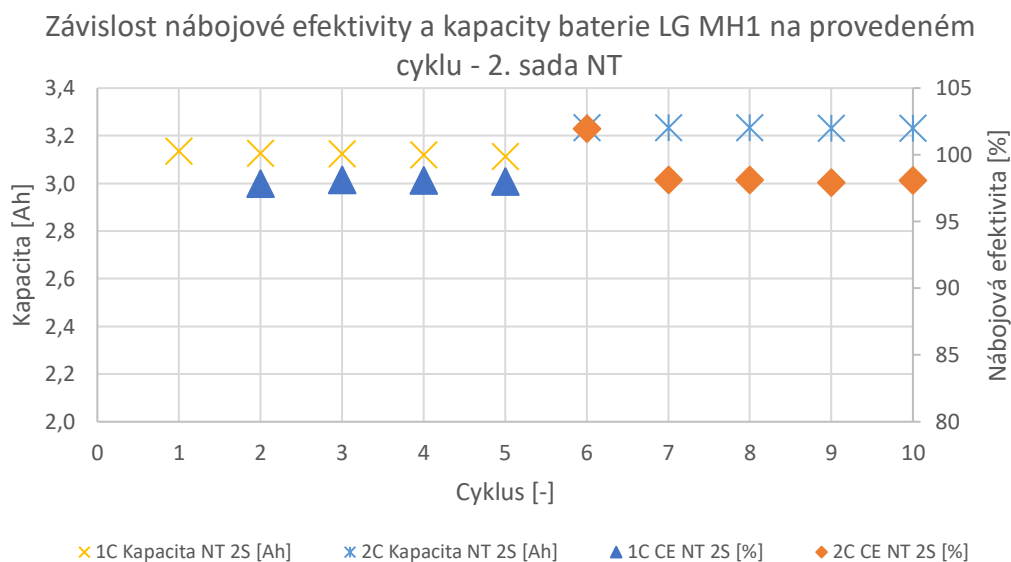


Graf 65 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie Gooweí na provedeném cyklu - 2. sada ZT

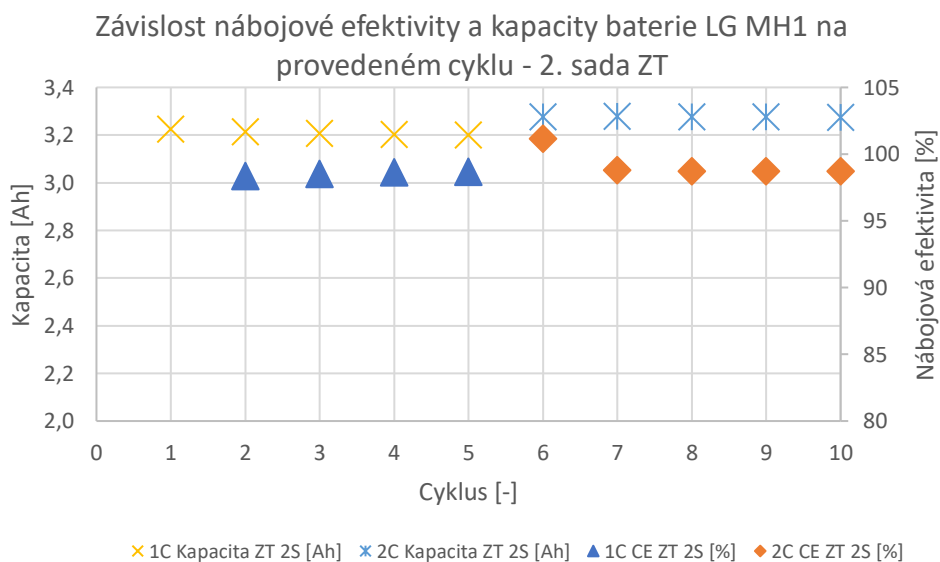
7.1.2 LG MH1 normální teplotní podmínky a zvýšená teplota – druhá sada



Graf 66 Závislost napětí na vybíjecím proudu LG MH1 NT ZT 2S

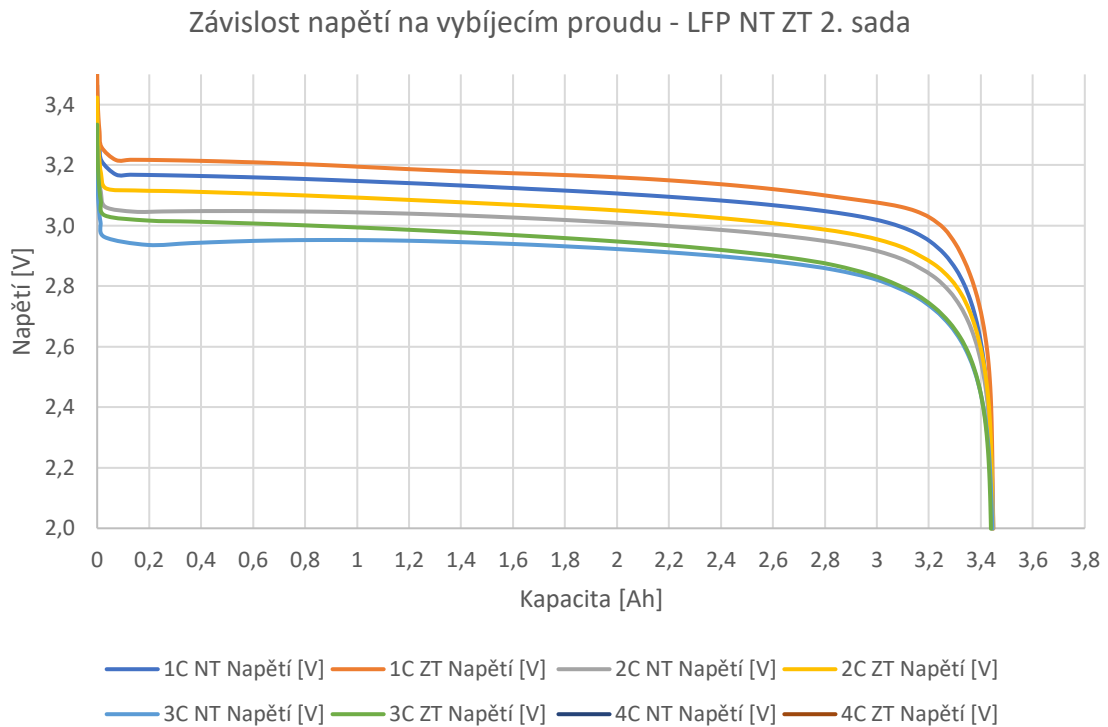


Graf 67 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 2. sada NT

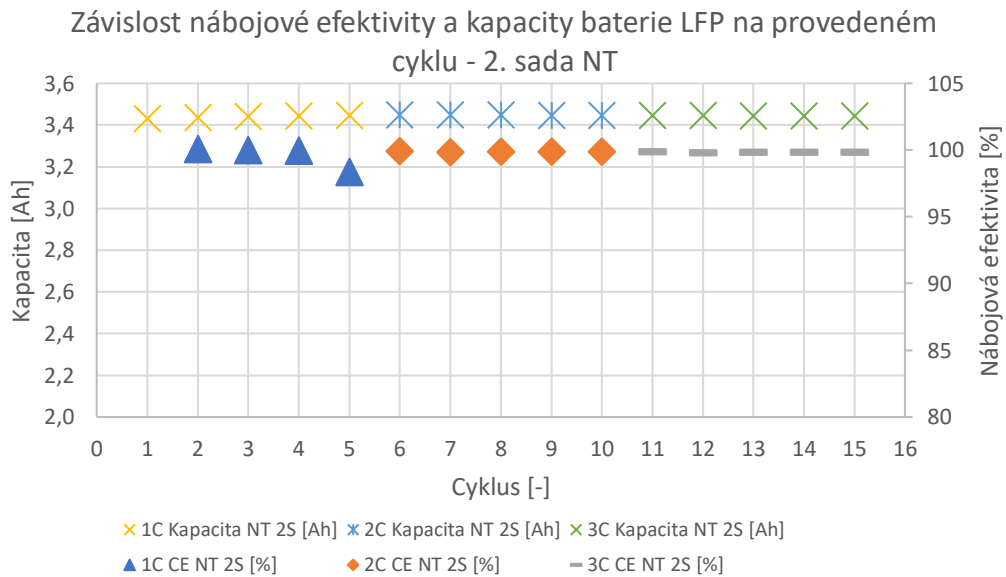


Graf 68 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LG MH1 na provedeném cyklu - 2. sada ZT

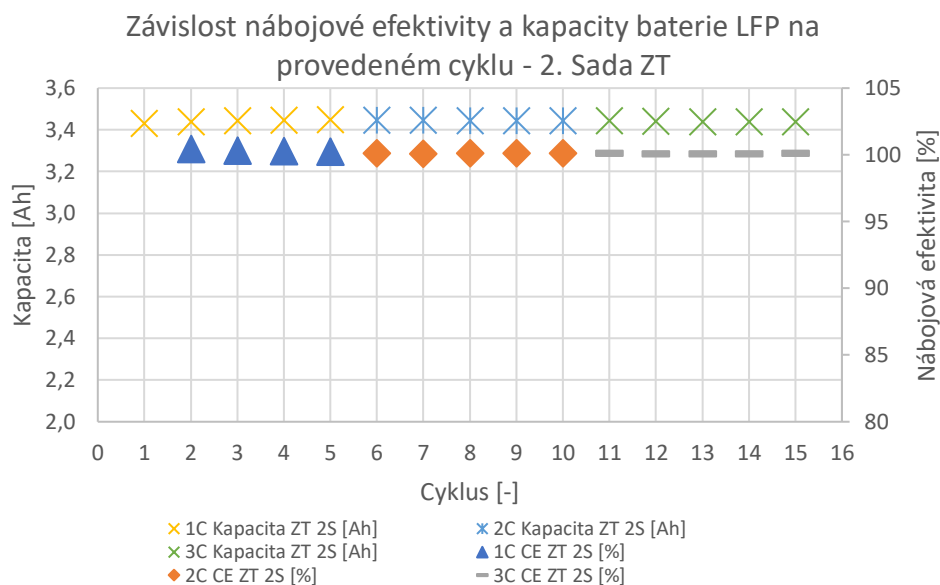
7.1.3 LFP normální teplotní podmínky a zvýšená teplota - druhá sada



Graf 69 Závislost napětí na vybíjecím proudu LFP NT ZT 2S

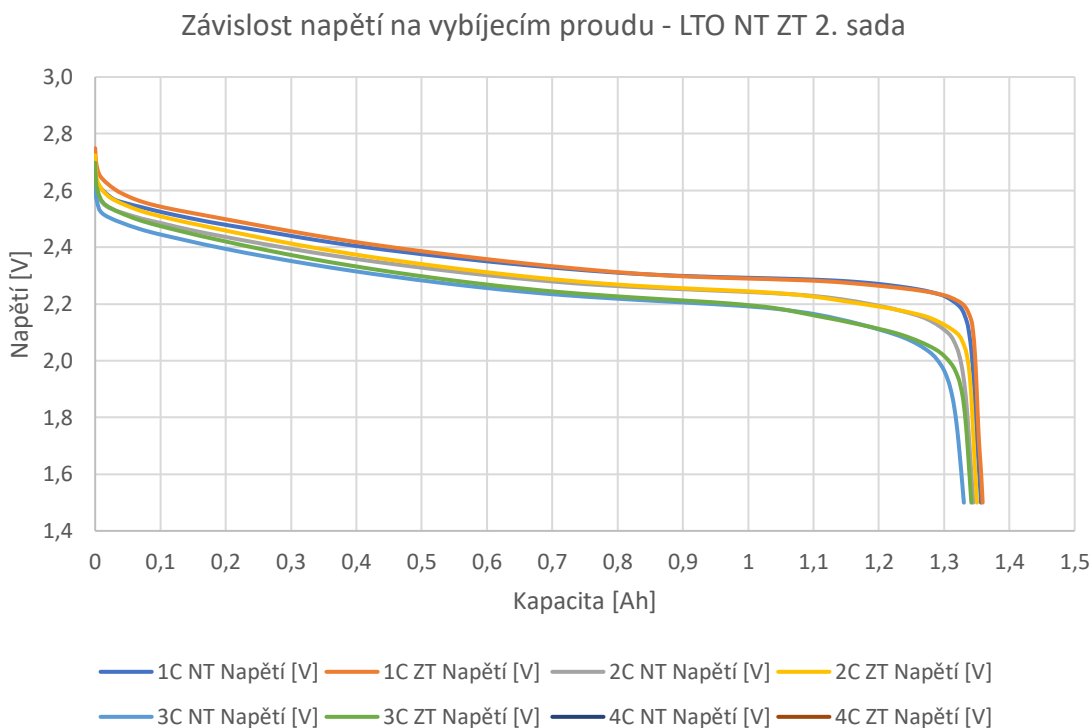


Graf 70 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LFP na provedeném cyklu - 2. sada NT

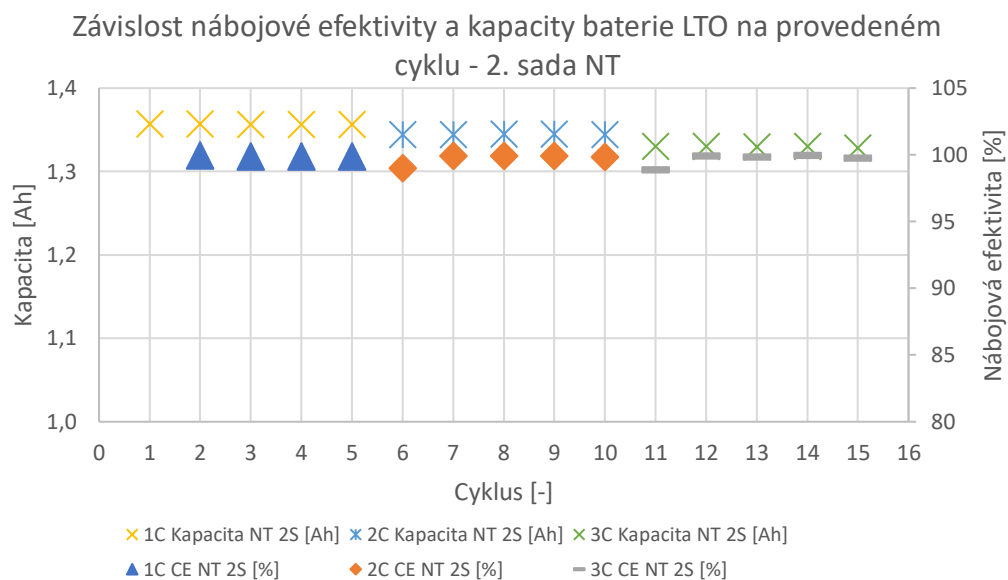


Graf 71 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LFP na provedeném cyklu - 2. sada ZT

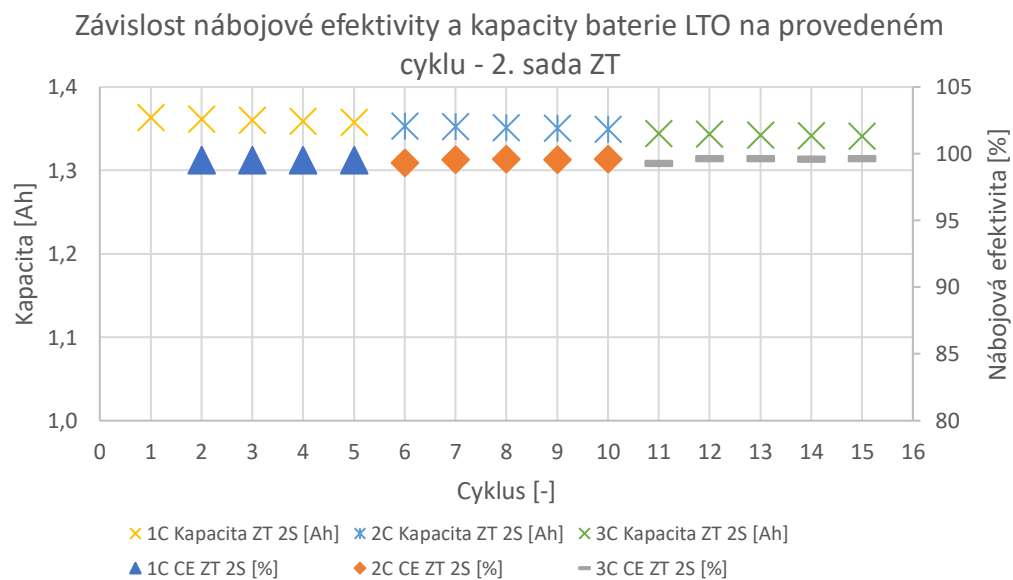
7.1.4 LTO normální teplotní podmínky a zvýšená teplota – druhá sada



Graf 72 Závislost napětí na vybíjecím proudu LTO NT ZT 2S

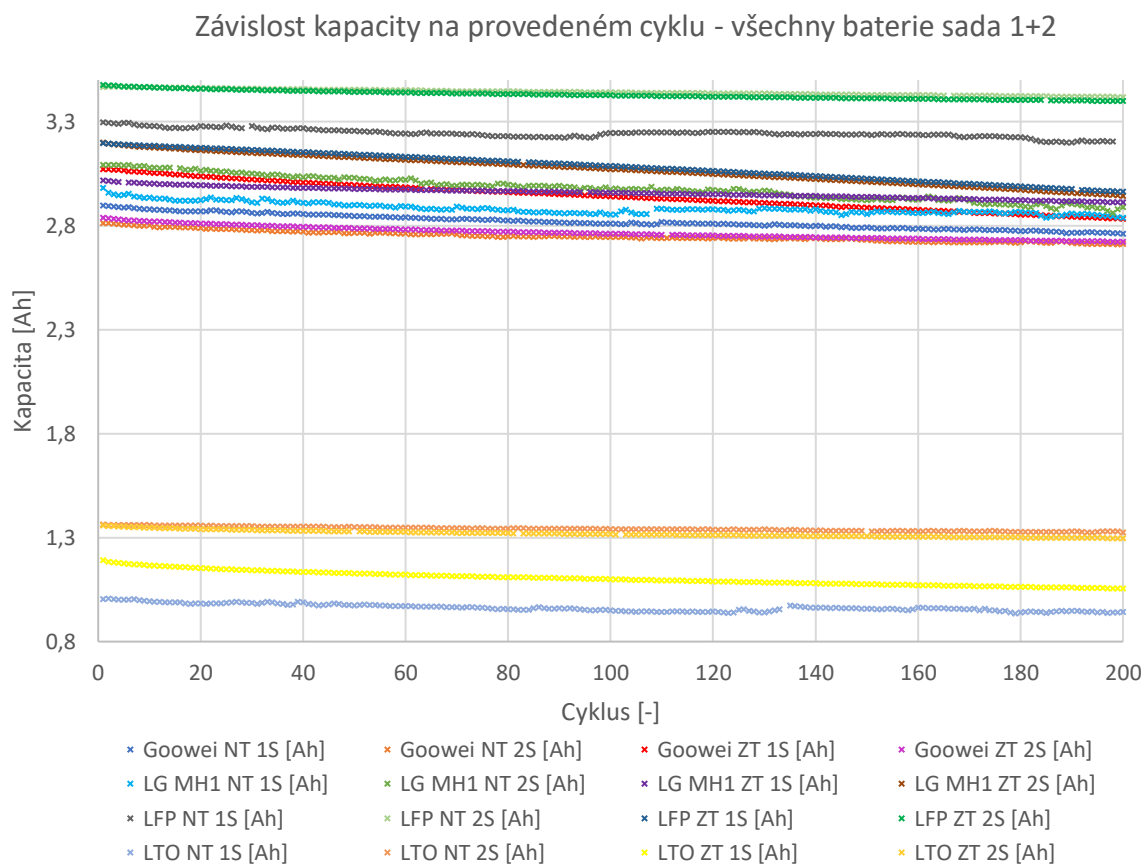


Graf 73 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LTO na provedeném cyklu - 2. sada NT



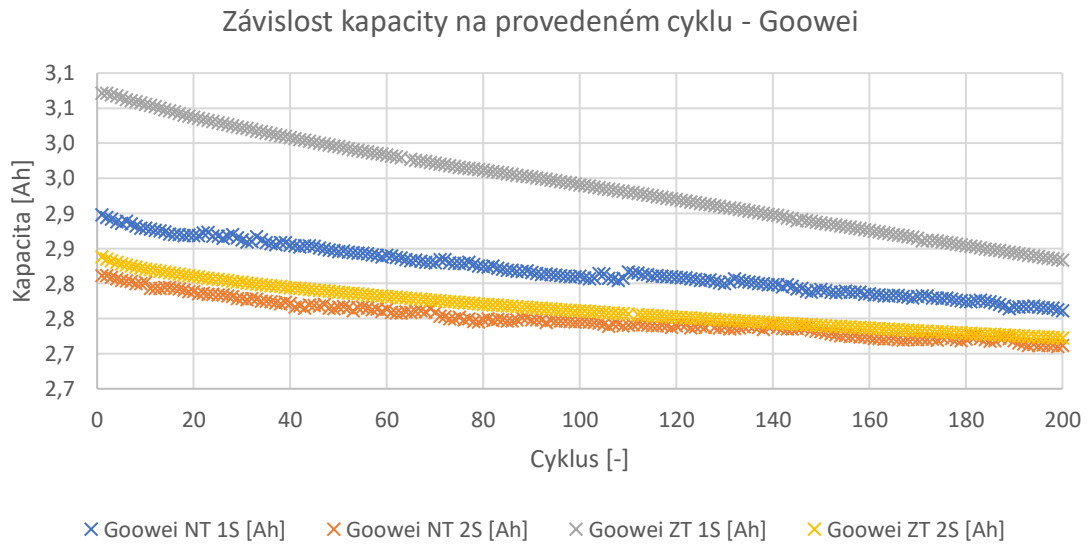
Graf 74 Závislost nábojové efektivity a kapacity baterie LTO na provedeném cyklu - 2. sada ZT

7.2 Závislost kapacity na provedeném cyklu – První a druhá sada baterií

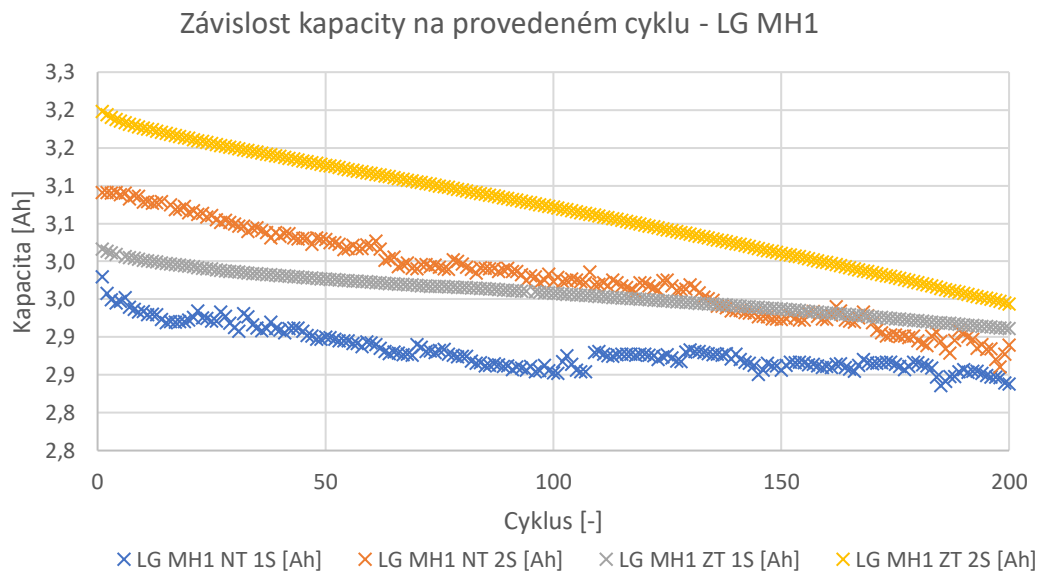


Graf 75 Závislost kapacity na provedeném cyklu – všechny baterie NT ZT 1S 2S

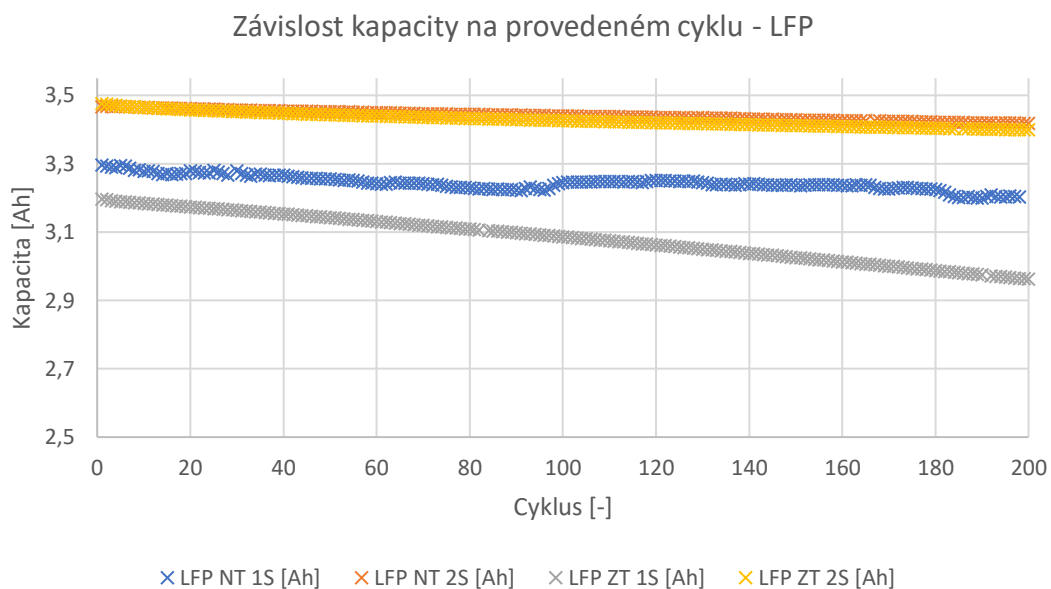
7.3 Závislost kapacity na provedeném cyklu dle typu baterie



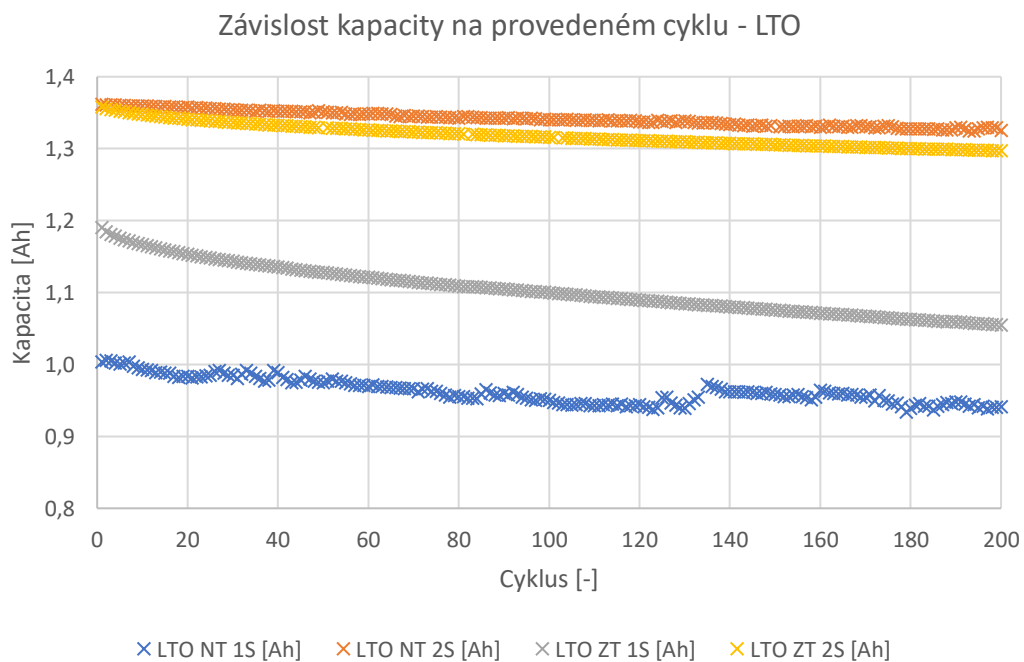
Graf 76 Závislost kapacity na provedeném cyklu Gooweï NT ZT 1S 2S



Graf 77 Závislost kapacity na provedeném cyklu LG MH1 NT ZT 1S 2S



Graf 78 Závislost kapacity na provedeném cyklu LFP NT ZT 1S 2S



Graf 79 Závislost kapacity na provedeném cyklu LTO NT ZT 1S 2S

ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ – DRUHÁ SADA BATERIÍ

Testování baterií za normálních podmínek přineslo následující výsledky. Počáteční kapacita baterie Goowei klesla z počátečních 2811 mAh na 2711 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu teploty je patrné, že se teplota periodicky měnila z důvodu, že v místnosti, kde probíhalo měření byla nejspíše zapnutá klimatizace.

Počáteční kapacita baterie LG MH1 klesla z počátečních 3091 mAh na 2889 mAh.

Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu vyplývá, že teplota roste s vybíjením baterie z důvodu většího vnitřního odporu, ten se zvyšuje s hloubkou vybití. Během nabíjení konstantním napětím teplota klesá.

Počáteční kapacita baterie LFP klesla z počátečních 3467 mAh na 3417 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu lze vidět, že teplota roste s vybíjením baterie z důvodu většího vnitřního odporu, ten se zvyšuje s hloubkou vybití. Během nabíjení konstantním napětím teplota klesá.

Počáteční kapacita baterie LTO klesla z počátečních 1362 mAh na 1325 mAh. Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu lze vidět, že se teplota mění ve velmi malém rozsahu hodnot. Rozdílná charakteristika napětí je způsobena vlastnostmi a složením baterie, konkrétně LTO katodou.

Testování baterií za zvýšené teploty přineslo následující výsledky. Počáteční kapacita baterie Goowei klesla z počátečních 2838 mAh na 2722 mAh. Pokles kapacity byl vyhodnocen za provedených 200 cyklů. Z grafu je patrné, že teplota roste s vybíjením baterie z důvodu zvětšujícího se vnitřního odporu, který roste s hloubkou vybití baterie. Během nabíjení baterie konstantním napětím, teplota baterie klesá.

Počáteční kapacita baterie LG MH1 klesla z počátečních 3198 mAh na 2943 mAh.

Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Z grafu je patrné, že teplota roste s vybíjením baterie z důvodu zvětšujícího se vnitřního odporu, který roste s hloubkou vybití baterie. Během nabíjení baterie konstantním napětím, teplota baterie klesá.

Počáteční kapacita baterie LFP klesla z počátečních 3476 mAh na 3399 mAh.

Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Teplota roste s vybitím baterie z důvodu většího vnitřního odporu, který roste s hloubkou vybití baterie LFP.

Počáteční kapacita baterie LTO klesla z počátečních 1358 mAh na 1297 mAh.

Pokles kapacity byl za provedených 200 cyklů. Při vybíjení baterie roste teplota. Důvodem je větší vnitřní odpor zvětšující se s hloubkou vybití.

Při testování baterií za normálních podmínek byl na tom nejlépe baterie LFP, protože u něj nedošlo k výraznému poklesu kapacity, tak jako u zbylých třech baterií. Výrobce uvádí nominální kapacitu 3300 mAh. Počáteční kapacita byla u baterie 3467 mAh, což je vyšší hodnota než nominální a po cyklování za normálních podmínek kapacita poklesla na 3417 mAh. Procentuální rozdíl kapacity je u baterie LFP pouze 1,4 %. Baterie LG MH1 vykázala pokles o 202 mAh, což je 6,5 %. Baterie Goowei vykazovala pokles o 100 mAh což je pokles o 3,6 %. Nejhůře dopadla při měření baterie LH MH1, neboť výrobce udával kapacitu 3200 mAh, na začátku měření měla však baterie pouze 3091 mAh a na konci měření měla pouze 2889 mAh. Procentuální rozdíl kapacity při

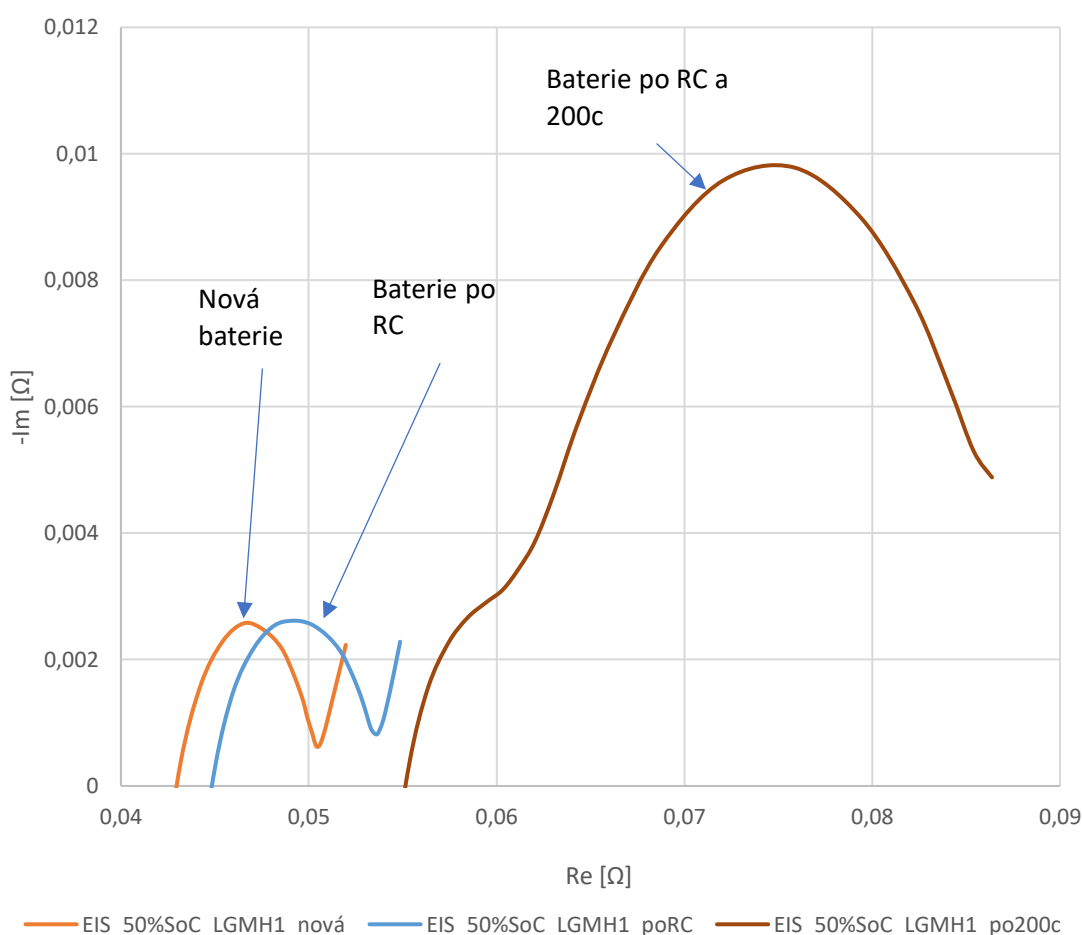
testování za normálních podmínek byl 6,5 %. Počet provedených cyklů za normální teploty byl 200 u všech baterií. Procentuální a absolutní poklesy kapacity a nábojové účinnosti jsou shrnuty v tabulkách Tabulka 27, Tabulka 28, Tabulka 29 a Tabulka 30 jak za normálních teplotních podmínek, tak i za zvýšených teplotních podmínek. Měření se provedlo celkem na osmi údajně nových bateriích, od každého typu se jeden exemplář testoval za normálních teplot a druhý za zvýšených teplot. Proudový nabíjení a vybíjení při cyklickém testování byly stanoveny na hodnotu 0,5 C, tedy pro Goowei a LG MH1 byl proud 1600 mA, pro baterii LFP 1650 mA a pro baterii na bázi LTO 650 mA.

Při testování za zvýšené teploty bylo provedeno 200 cyklů u všech baterií Goowei, LG MH1, LFP a LTO. Nejlépe vyšla baterie LFP (pokles 2,2 %), Goowei (pokles 4,1 %), LTO (pokles 4,5 %) a nejhůře baterie LG MH1 s poklesem 8 %. Počáteční kapacita baterie LG MH1 byla 3198 mAh a po měření v teplotní komoře měla baterie 2943 mAh. Baterie Goowei měla na začátku měření počáteční kapacitu 2838 mAh a na konci měření 2722 mAh. Baterie LiFePO₄ měla na začátku měření 3476 mAh a na konci 3399 mAh. Baterie LTO měla počáteční kapacitu 1358 mAh a na konci měření kapacita klesla na 1297 mAh. Procentuální rozdíl kapacity byl 4,5 %. Pokles kapacity na cyklus je shrnut v Tabulka 27 a Tabulka 29 Test schopnosti dodat požadovaný proud druhé sady za různých teplotních podmínek je vidět v Graf 63, Graf 66, Graf 69 a Graf 72. V charakteristikách je vidět, že baterie ve svém novém stavu mají nízký vnitřní odpor a vybíjecí napětí je stabilní, dosahované vybíjecí kapacity jsou u všech baterií na velice dobré úrovni. U baterií Goowei a LG MH1 je vliv teploty minimální, zvýšená teplota přispívá k nepatrně vyššímu napětí během vybíjení.

8. ČLÁNEK LG MH1 – IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE – ZVÝŠENÉ TEPLoty LG MH1

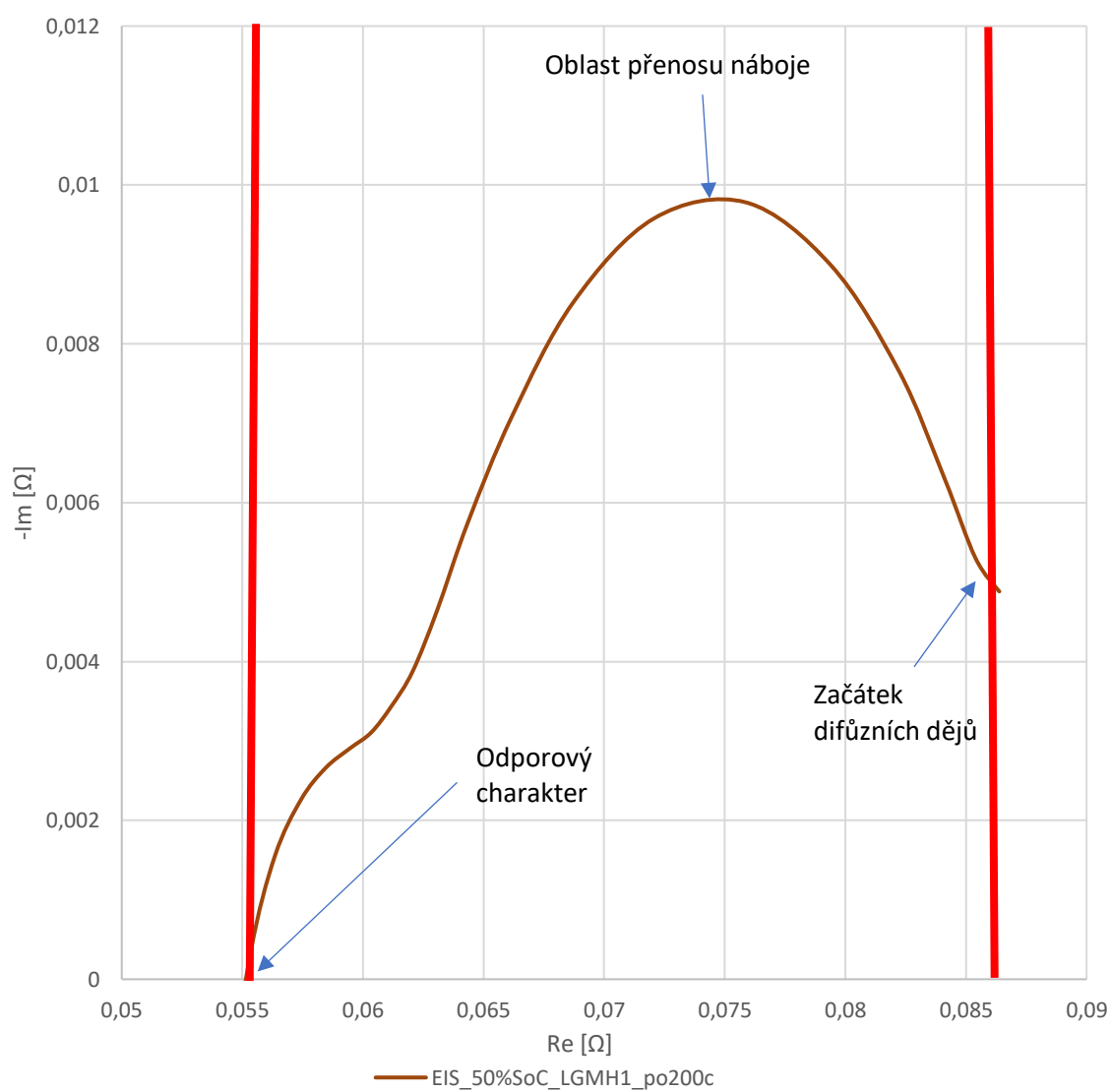
Elektrochemická impedanční spektroskopie je nedestruktivní metoda, která může zkoumat děje uvnitř baterie. K tomuto měření byla vybrána baterie LG MH1 ve zvýšených teplotách, protože je náchylnější k degradaci než LFP a LTO. V tabulce jsou vyznačeny hodnoty frekvence a impedance pro body, kdy elektrochemický systém vykazuje reálnou impedanci (odporový charakter) a přechod mezi oblastí přenosu elektrického náboje a difúzní oblastí kdy převládají pomalé elektrochemické procesy transferu nabitých iontů.

EIS LG MH1 před měřením, po RC a po 200 cyklech



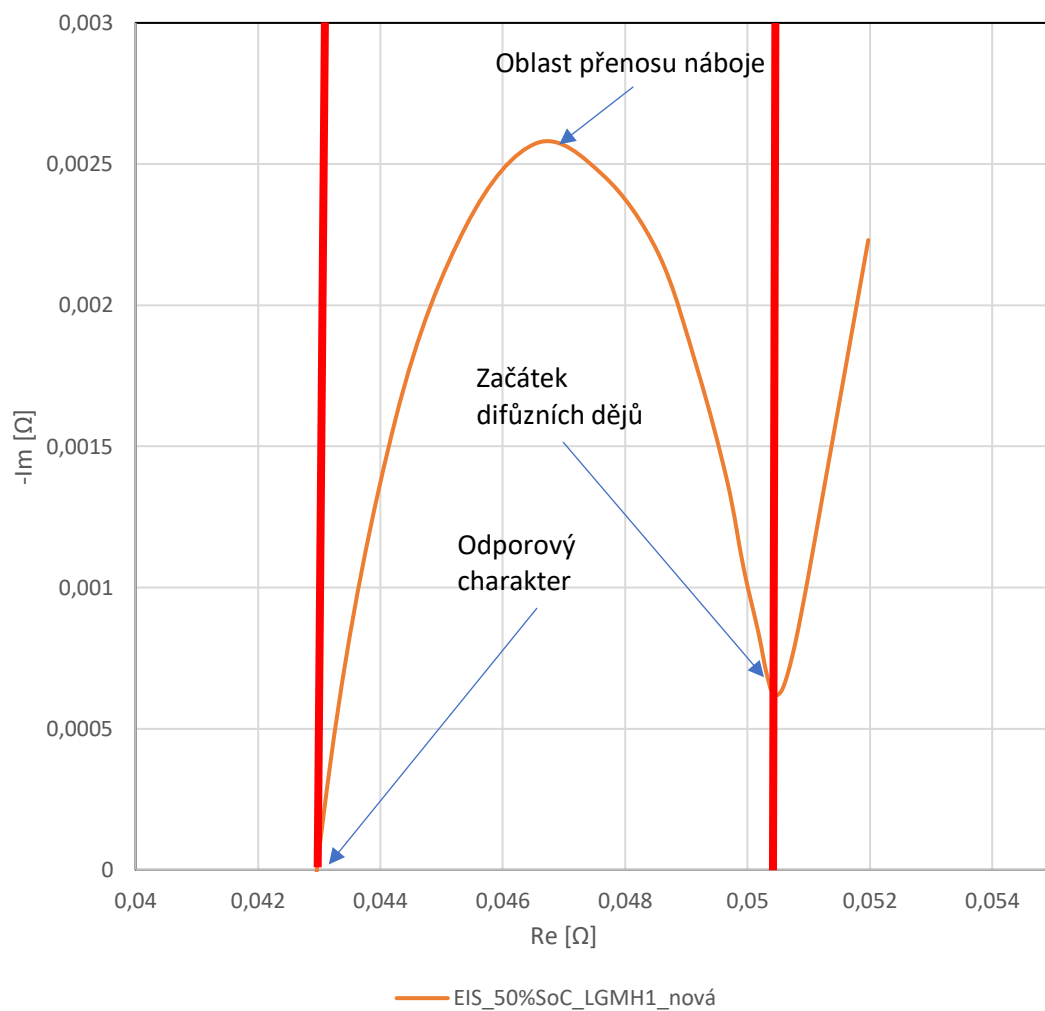
Obrázek 16 EIS LG MH1 před měřením, po RC a po 200 cyklech

EIS LG MH1 po 200 cyklech



Obrázek 17 EIS LG MH1 po 200 cyklech

EIS LG MH1 před měřením (nová baterie)



Obrázek 18 EIS LG MH1 před měřením (nová baterie)

Tabulka 31 Naměřené hodnoty z EIS LG MH1

Elektrochemická impedanční spektroskopie LG MH1 50% nabití			
Nová baterie	f[Hz]	Re [Ω]	-Im [Ω]
Odporový charakter	nejblíže 530,17	0,0433	0
Přechod od přenosu náboje k difuzním dějům	2,806	0,0504	0,623E-3
Po Rate Capability	f[Hz]	Re [Ω]	-Im [Ω]
Odporový charakter	nejblíže 530,17	0,0448	0
Přechod od přenosu náboje k difuzním dějům	1,08	0,0536	0,818E-3
Po 200 cyklech	f[Hz]	Re [Ω]	-Im [Ω]
Odporový charakter	Nejblíže 530,17	0,0552	0
Přechod od přenosu náboje k difuzním dějům	0,1	0,0863	4,881E-3

8.1 Zhodnocení měření – LG MH1 – EIS

Na vybrané exempláři baterie LG MH1 byla opakovaně změřena elektrochemická impedanční spektroskopie. Tato baterie byla vystaveny zvýšeným teplotám v průběhu měření schopností dodat požadovaný proud a následně byla cyklována také ve zvýšených teplotách. Vysoké teploty negativně ovlivňují vnitřní strukturu a vlastnosti baterie, proto bylo toto měření realizováno právě na tomto vzorku. Z naměřených charakteristik je vidět nárůst impedance ve všech frekvenčních oblastech. Za protáhlý tvar křivky u baterie po RC a 200 cyklech pravděpodobně může zesilování SEI vrstvy. Vzhledem k tomu, že neexistuje dostatečné množství dat pro potvrzení této hypotézy tak nelze s určitostí určit jaký jev se zde přesně projevil. Elektrochemická impedanční spektroskopie byla měřena po důkladném vychladnutí vzorku po vyjmutí z klimatické komory, aby nedošlo ke zkreslení měření. Díky tomu byla teplota měření EIS konzistentní napříč měřeními.

9. EKONOMICKÉ ASPEKTY – ZHODNOCENÍ Z KRÁTKODOBÉHO A DLOUHODOBÉHO HLEDISKA

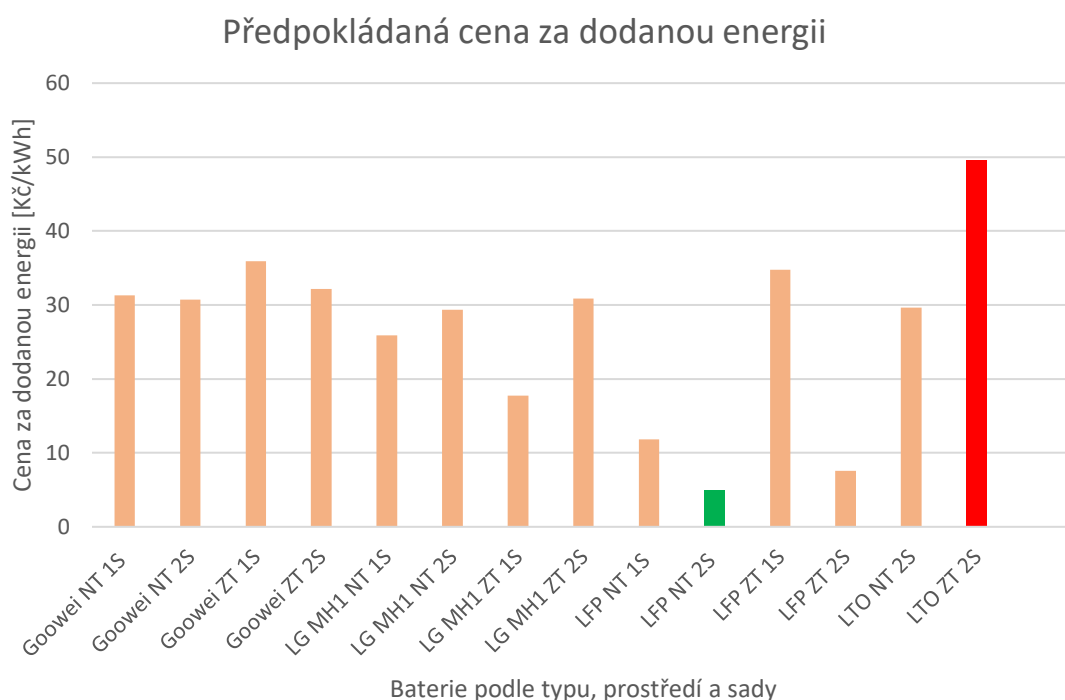
Požizovací cena baterií je klíčový faktor, který často rozhoduje, zda bude baterie v dané aplikaci nasazena, nebo ne. Ceny baterií jsou uvedeny v teoretické části v Porovnání sekundárních elektrochemických baterií. Ekonomicky je však třeba nahlížet na celou životnost baterie. Cena za dodanou energii, nebo cyklus pak může být v porovnání mezi bateriemi zásadně odlišná. Baterie jsou srovnány na základě nejpříznivější situace. Pokud daný typ projevil lepší vlastnosti v sadě jedna, jsou použity data ze sady jedna, pokud ne tak je brán vzorek z druhé sady. Životnost je brána jako počet cyklů, dokud nepoklesne kapacita na 80 % jmenovité hodnoty baterie. Podkladem pro výpočet je předpoklad, že je baterie schopná dodat celou 90% nominální energie pro každý cyklus. Tabulka níže srovnává cenu pořízení vzhledem k životnosti a dalším parametrům.

Tabulka 32 Ekonomické zhodnocení provozu vybraných typů baterií

Hodnocení baterií z hlediska ceny a životnosti na základě výsledků měření				
Typ baterie	Goowei	LG MH1	LFP	LTO
Použití v normálních teplotách	2S	1S	2S	2S
Nominální kapacita [mAh]	3200	3200	3300	1300
90% Nominální energie [Wh]	10,3	10,3	9,5	2,8
Predikce počtu cyklů (lineární pokles měřené kap. na 80% nominální) [-]	502	595	3308	1741
Celková energie do konce životnosti (pokles kapacity na 80 % nominální hodnoty) [kWh]	5,2	6,2	31,4	4,9
Cena/energie [Kč/kWh]	30,7	25,9	5,0	29,7
Použití ve zvýšených teplotách	2S	2S	2S	2S
Predikce počtu cyklů (lineární pokles měřené kap. na 80% nominální) [-]	479	869	2171	1043
Celková energie do konce životnosti (pokles kapacity na 80 % nominální hodnoty) [kWh]	5,0	9,0	20,6	2,9
Cena/energie [Kč/kWh]	32,2	17,8	7,6	49,5
Cena baterie [Kč]	160	160	157	145

9.1 Porovnání ceny za dodanou energii za stanovených podmínek výše a zhodnocení

Výsledky kalkulace předpokládané ceny energie pro jednotlivé baterie je vidět v Graf 80. Podkladem pro tento výpočet jsou na měřená data a údaje výrobce. Cena je počítána jako cena baterie na množství energie podle cyklů. Které by baterie mohla dodat do poklesu na 80 % kapacity udávané výrobcem. Jedná se tak o standardní kritérium konce životnosti baterie. V grafu nejsou uvedeny všechny vzorky, u některých byla počáteční kapacita na tak nepříznivé úrovni, že by došlo k výraznému zkreslení reprezentovaných dat. Vybrané vzorky vykazují parametry, na kterých lze srovnání postavit bez přílišného zjednodušení reálné situace. Životností data jsou lineárně interpolována, na základě předpokladu lineárního stárnutí baterií. Z dat vyplývá, že neekonomičtější baterie z pohledu energie, kterou by mohla vycházet baterie LFP z druhé sady baterií pro jakoukoli provozní teplotu.



Graf 80 Předpokládaná cena za dodanou energii dle baterie

Z krátkodobého hlediska je třeba dbát na parametry popisující baterii z pohledu hustoty energie, napětí a dalších parametrů, které ovlivňují zařízení napájené baterií, v tomto ohledu vyšla nejlépe baterie LG MH1 z druhé sady, protože vykazuje nejlepší poměr kapacity vzhledem k velikosti a hmotnosti. Z dlouhodobého hlediska se ukázala být nejlepší baterie LFP z druhé sady baterií. Vykazuje totiž vyšší než nominální kapacitu a nízký pokles kapacity na cyklus. To jsou předpoklady pro dlouhou životnost baterie v cyklickém a pravděpodobně i kalendářním životě. Výsledná cena vztažená k předpokládané životnosti vychází velice přijatelně. Ve srovnání baterie LFP oproti LG MH1 nabízí pětina náklady.

10. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo prostudovat problematiku lithium-iontových baterií. Dále byla věnována pozornost komerčním lithium-iontovým bateriím a elektrodovým materiálům, základním operačním principům, charakteristikám a vývojovým směrům v oblasti lithium-iontových baterií. Dále byly proměřeny parametry vybraných typů komerčních lithium-iontových baterií za běžných podmínek a za zvýšených teplot. Součástí diplomové práce bylo také zhodnotit vliv teploty na vybrané charakteristiky lithium-iontových baterií za běžných podmínek a zhodnotit vliv zvýšené teploty na vybrané charakteristiky lithium-iontových baterií jak z krátkodobého, tak z dlouhodobého hlediska.

Z dlouhodobého hlediska má zvýšená teplota negativní vliv na životnost baterií, urychluje degradační elektrochemické procesy. Z krátkodobého hlediska se za zvýšené teploty projeví nárůst množství dostupné kapacity z důvodu snížení vnitřního odporu článku. Vysoké teploty také mohou nepříznivě ovlivnit bezpečnost provozu lithium-iontových baterií, při velkých hodnotách proudu může dojít k přehřátí článku díky nedostatečnému chlazení.

Výsledky naměřené v praktické části potvrzují, že teplota urychluje pokles kapacity lithium iontových baterií. Zároveň však pozitivně ovlivňuje stabilitu napětí při vybíjení a dostupnou energii. Baterie LTO vykázaly nejrychlejší míru stárnutí napříč teplotami a vzorky. Naopak nejpomaleji stárly baterie LFP napříč teplotami a vzorky. Za normálních teplot dopadly během měření nejlépe LFP baterie a nejhůře LG MH1. Za zvýšených teplot dopadly opět nejlépe baterie LFP, ale nejhůře snášely zvýšené teploty baterie LTO. Tím, že se experimentu zúčastnily stejné baterie odlišného stáří, tak lze porovnat rychlost stárnutí a poklesu kapacity za stejných podmínek. Z dat vyplývá, že novější baterie ztrácí kapacitu pomaleji až na baterii LG MH1, kde došlo k prvotnímu poklesu kapacity, který je charakteristický pro nové baterie. Dochází pravděpodobně k prvotnímu zesilování SEI vrstvy.

Práce také obsahuje zhodnocení z hlediska provozní ceny baterií. Toto srovnání si klade za cíl popsat vybrané typy lithium iontových baterií z pohledu velikosti vstupní investice a životnosti. Naměřená data slouží jako podklad pro výpočet predikované životnosti za předpokladu lineárního poklesu kapacity s počtem provedených cyklů. V tomto srovnání vyšly nejlépe baterie LFP jak z první sady, tak z druhé sady bez ohledu na teplotní podmínky. Tento fakt dokazuje výjimečnou stabilitu materiálu LFP. LTO netvoří pasivační vrstvu, hodí se tak pro opačné spektrum teplot, ale ve zvýšených teplotách se stárnutí projevuje podobně rychle jako u jiných zkoumaných typů.

Pro vyšetření všech aspektů životnosti zkoumaných lithium iontových baterií by bylo třeba provést více cyklů při různých proudech a teplotách. I přes omezené možnosti experimentu jsou naměřená data validní a cenné pro predikci životnosti baterií a tvoří základ pro případný navazující výzkum.

LITERATURA

- [1] SVOBODA, Lukáš. Vliv kalandrování na vlastnosti elektrod lithium-iontových baterií. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Čech, Ph.D. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=152464
- [2] Velofila: Baterie - trochu historie. Velofila: Baterie - trochu historie [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.velofila.cz/n/baterie-trochu-historie>
- [3] KAVÁLEK, Ondřej. ELEKTRODOVÉ MATERIÁLY NA BÁZI LITHIUM – TITAN – OXIDU PRO LITHNO- IONTOVÉ AKUMULÁTORY. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v brně. Vedoucí práce Ing. Tibor Jirák. . [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8761
- [4] KAZDA, Tomáš. MODIFIKACE MATERIÁLŮ PRO KLADNÉ ELEKTRODY LITHNO-IONTOVÝCH AKUMULÁTORŮ. Brno, 2015. Doktorská práce. Vysoké učení technické v brně. Vedoucí práce Prof. Ing. JIŘÍ VONDRÁK, Dr.Sc. . [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=109611
- [5] Battex: Zinkové primární články. Battex: Zinkové primární články [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <http://www.battex.info/primarni-clanky-a-baterie/zinkove-primarni-clanky>
- [6] Tzbinfo: Lithiové akumulátory. Tzbinfo: Lithiové akumulátory [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [7] JANKULÁR, Tomáš. Příprava a charakterizace elektrodových materiálů z elementární síry pro li-ion akumulátory. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Čech. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68907
- [8] Battery University: A Look at Cell Formats and how to Build a good Battery. Battery University: A Look at Cell Formats and how to Build a good Battery [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/a_look_at_cell_formats_and_how_to_build_a_good_battery
- [9] KUNICKÝ, Daniel. Studium struktury vysokonapěťových katodových materiálů pro lithio iontové akumulátory metodou rentgenové strukturní analýzy. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ladislav Chladil, Ph.D. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173042
- [10] MÁČA, Josef. Kapalné elektrolyty pro lithno-iontové akumulátory s vyšší požární bezpečností. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

- Vedoucí práce Doc. Ing. Marie Sedlářková, CSc. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=163572
- [11] MTI Corporation: 18650 Cylinder Cell Case with Anti-Explosive Cap and Insulation O-ring - 100 Pcs/package - EQ-Lib-18650. MTI Corporation: 18650 Cylinder Cell Case with Anti-Explosive Cap and Insulation O-ring - 100 Pcs/package - EQ-Lib-18650 [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.mtixtl.com/18650CylinderCellCaseandAnti-ExplosiveCapwithInsulationO-ring-10-1.aspx>
- [12] LIBICH, Jiří. Záporná elektroda pro lithno-iontové akumulátory. Brno, 2015. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Vondrák, DrSc. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=109533
- [13] HECHT: Jak pečovat o baterii Li-Ion? HECHT: Jak pečovat o baterii Li-Ion? [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://cz.hecht.cz/info/jak-pecovat-o-baterii-li-ion>
- [14] DublinLive: Exploding e-scooter batteries fuel urgent warning from Dublin Fire Brigade over charging habits. DublinLive: Exploding e-scooter batteries fuel urgent warning from Dublin Fire Brigade over charging habits [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.dublinlive.ie/whats-on/family-kids-news/exploding-e-scooter-batteries-fuel-19561010>
- [15] Ultralife [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.ultralifecorporation.com/PrivateDocuments/BR_Lead_Acid_Replacement.pdf
- [16] Battery University: BU-1001: Batteries in Industries. Battery University: BU-1001: Batteries in Industries [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/batteries_for_medical_consumer_hobbyist
- [17] Akumulátory Li-ion. Belza.cz: Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení [online]. © 2021 BEN – odborná literatura, 2001, 24. 3. 2001 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.belza.cz/charge/liion1.htm>
- [18] BUCHMANN, Isidor. BU-212: Future Batteries. Battery University [online]. British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2021, 22.8.2021 [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-212-future-batteries>
- [19] BUCHMANN, Isidor. BU-301a: Types of Battery Cells: Compare the pros and cons of the cylindrical cell, button cell, prismatic cell and pouch. Battery University [online]. British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2021, 24.4.2019 [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells>
- [20] Lithium-Ion vs Lead-Acid cost analysis: Lithium LiFePO4 vs Lead-Acid cost analysis. PowerTech: TECH CORNER [online]. France: ©Copyright 2021 - PowerTech Systems, 2021 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z:

- <https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-vs-lead-acid-cost-analysis/>
- [21] Who Killed the Graphite Anode?: PNNL researchers move silicon anode Li-ion battery technology forward. Pacific Northwest: National Laboratory [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2010, 2010 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.pnnl.gov/science/highlights/highlight.asp?id=829>
- [22] Researchers increase lifespan of lithium-sulfur batteries. Newatlas: Electronics [online]. Carlton: © 2022 New Atlas, 2013, 4.4.2013 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://newatlas.com/researchers-increase-lifespan-lis-batteries/26911/>
- [23] TSWB-LYP10000AHA: THUNDER SKY WINSTON ENERGY STORAGE TYPE“WATER-BASED LITHIUM YTTRIUM POWER BATTERY” PERFORMANCE SPECIFICATION. Winston Battery [online]. Xingtai Industrial Park of Changtai Economic Development Zone, Zhangzhou City, Fujian Province,P.R.C,363900: Winston Battery, 2021, 21.5.2021 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <http://www.thundersky-winston.com/static/upload/file/20210521/1621587013791065.pdf>
- [24] Goowei Nabíjecí průmyslový článek: baterie 18650 3,7V 3200mAh. Battery-import: LiMn [online]. Praha: Copyright 2021 Battery Import, 2021 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.battery-import.cz/limn/goowei-nabijeci-prumyslovy-clanek--baterie-18650-3-7v-3200mah/>
- [25] LG MH1 Datasheet: PRODUCT SPECIFICATION Rechargeable Lithium Ion Battery Model : INR18650 MH1 3200mAh. Octopart [online]. 29 West 38th St. 14th Floor New York, NY 10018: Octopart, 2021, 17.1.2014 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/INR18650-MH1-LG-Electronics-datasheet-48665530.pdf>
- [26] LiFePO4 26650 Rechargeable. Batteryspace: LiFePO4/LiFeMnPO4 Batteries [online]. Richmond: BatterySpace.com, 2021 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/8891-LFP-26650-3800HT.pdf>
- [27] 3.2 Volt 26650 LiFePO4 Battery (3300 mAh) with Tabs. Onlybatteries: 3.2V Lithium Phosphate (LiFePO4) Batteries (Single Cells) [online]. Plattsburgh: Onlybatteries.com, 2021 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.onlybatteries.com/showitem.asp?ItemID=20793.11&cat1=88&uid=2052>
- [28] Battery Cycler: BCS-800 Series. Snowhouse: BCS-815 Battery Cycling System up to 15 A per Channel [online]. Québec: Snowhouse © 2020, 2020 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.snowhouse.ca/details/science/bcs-815-battery-cycling-system.html>
- [29] VENTICELL 55 - ECO line. BMT: VENTICELL [online]. Brno: © 2021 BMT Medical Technology, 2021 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.bmt.cz/venticell-61-venticell-55---ecoline16>

- [30] BUCHMANN, Isidor. BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries. Battery University [online]. British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2021, 21.10.2021 [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>
- [31] Pack of 5pcs: LTO1865 Rechargeable Cell: 2.4V 1300 mAh (Lithium Titanate): The new Lithium Titanate technology. Shop.gwl.eu [online]. Průmyslová 11 102 00 Praha 10 Czech Republic, European Union: © 2021 GWL, 2021, 2021 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: https://files.gwl.eu/inc/_doc/attach/StoItem/7015/GWL_LTO1865_Rechargeable.pdf
- [32] BUCHMANN, Isidor. BU-105: Battery Definitions and what they mean. Battery University: Learn about Batteries [online]. Vancouver, Canada: Cadex Electronics, 2021, 21.11.2021 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-105-battery-definitions-and-what-they-mean>
- [33] BUCHMANN, Isidor. BU-212: Future Batteries. Battery University [online]. British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2021, 22.8.2021 [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-212-future-batteries>
- [34] Researchers increase lifespan of lithium-sulfur batteries. Newatlas: Electronics [online]. Carlton: © 2022 New Atlas, 2013, 4.4.2013 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://newatlas.com/researchers-increase-lifespan-lis-batteries/26911/>
- [35] PAVLOVEC, Lukáš, Jan ŽITKA a Zbyněk PIENKA. CHEMICKÝ POHLED NA LITHIUM-IONTOVÉ BATERIE. Chemické listy: Chem. Listy 112, 508-516(2018) [online]. Ústav makromolekulární chemie AV ČR, v. v. i., Heyrovského nám. 2, 162 06 Praha 6: Chemické listy, 2018 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/download/3150/3134/>
- [36] PISTOIA, Giafranco. Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications. 1. Elsevier Inc. 620 E Main St Frisco, CO 80443. Elsevier Inc. (Branch Office) 201 SE 2nd Ave, Suite 201: Copyright © 2022 Elsevier, 2014. ISBN 978-0-444-59513-3.
- [37] BUCHMANN, Isidor. Lithium Polymer - Substance or Hype. Battery University [online]. British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2021, 22.11.2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-206-lithium-polymer-substance-or-hype>
- [38] KEKELÁK, M. Studium elektrodových materiálů pro post-lithno iontové systémy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2020. 58 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kazda, Ph.D. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=210344

- [39] Baterie Panasonic 18650, NCR18650G, 3,7V, 3600mAh, Li-ion, 4,87A, 1ks. TOP BATTERY [online]. Pražská 68/12 10200 Praha 10 - Hostivař Česká republika: TOP BATTERY, 2021, 21.7.2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.topbattery.cz/prumyslove-baterie-a-akumulatory/li-ion/baterie-panasonic-18650-ncr18650g-3-7v-3600mah-li-ion-4-87a-1ks.html>
- [40] ČLÁNEK LIFEPO4 50AH 3,2V CATL. Battery Store [online]. mivvy a.s. Ostravská 1555 73801 Frýdek - Místek: © 2021-22, mivvy, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.batterystore.cz/cs/clanky-lifepo4/29-clanek-lifepo4-50ah-32v-catl.html>
- [41] HANSEN, Kathryn. CR2032 vs BR2032 vs LIR2032 Coin Cell Batteries | Side-by-Side Comparison. Pick Vacuum Cleaner [online]. 29.7.2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://pickvacuumcleaner.com/cr2032-br2032-lir2032-3v-lithium-primary-rechargeable-coin-cell-batteries-specifications-and-recommendations/>
- [42] BUCHMANN, Isidor. BU-1003: Electric Vehicle (EV): Discover alternatives to fossil fuel in batteries. Battery University [online]. British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2021, 28.11.2019 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-1003-electric-vehicle-ev>
- [43] BABIESKA, L. Studium životního cyklu akumulátorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2020. 82 s., 4 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kazda, Ph.D. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=210083
- [44] What is Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)? (Electrochemistry Basics Series). BioLOGIC Measurement Solutions for Science & Industry. [online]. Biologic, 4. rue de Vaucanson, Seyssinet-Pariset 38170 FRANCE: Biologic, 2022, 28.3.2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.biologic.net/topics/what-is-eis/>
- [45] MA, Shuai, Modi JIANG, Peng TAO, Chengyi SONG, Jianbo WU, Jun WANG, Tao DENG a Wen SHANG. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review: A review. Progress in Natural Science: Materials International. 2018, 28(6), 653-666. ISSN 1002-0071. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002](https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002)
- [46] BUCHMANN, Isidor. BU-908: Battery Management System (BMS). Battery University [online]. British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2021, 4.11.2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-908-battery-management-system-bms>
- [47] Battery Life Calculator, Formula, Example, Formula. Electrical 4U [online]. United Kingdom, B11 3NL, Birmingham, Unit 116 Fernley Rd.: © 2017 - 2020 Electrical4u, 2020, 2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.net/calculator/battery-life-calculator-formula-example-formula/>


- [48] Getting Started with EC-Lab®: GCPL: Galvanostatic Cycling with Potential Limitation. BioLOGIC Measurement Solutions for Science & Industry. [online]. Biologic, 4. rue de Vaucanson, Seyssinet-Pariset 38170 FRANCE: Biologic, 2022, 28.3.2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.biologic.net/wp-content/uploads/2019/08/getting-started-gcpl_electrochemistry.pdf
- [49] Nabíjecí průmyslový článek, baterie 26650 3,2V 3300mAh. In: Battery-import [online]. Praha: Copyright 2021 Battery Import, 2022, 2022 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.battery-import.cz/lifepo4/nabijeci-prumyslovy-clanek--baterie-26650-3-2v-3000mah/>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Datové listy použitých baterií	145
--	-----

Příloha A - Datové listy použitých baterií


Příloha A Datové listy použitých baterií

	Specification Approval Sheet (ACL9012 -3.3Ah)	Effective Date	2012.4.26
		Document Number	S470XLB029
		Page No.	1/11
		Version	A0

Specification Approval Sheet

Model: ACL9012 -3.3Ah

	Signature	Date
Customer Approval		
	Company Name :	
	Company Stamp :	

		Effective Date	2012.4.26
		Document Number	S470XLB029
	Specification Approval Sheet (ACL9012 -3.3Ah)	Page No.	4/11
		Version	A0


1. Scope

This document describes the Product Specification of the Lithium iron phosphate battery cell supplied by ENIX ENERGIES.

2. Model: ACL9012 -3.3Ah

3. Specification

No.	Items	Specifications
1	Charge cut-off voltage	3.65V
2	Nominal voltage	3.2V
3	Minimal capacity	3300mAh @ 0.2C Discharge
4	Nominal capacity	3350mAh @ 0.2C Discharge
5	Charge current	1C
6	Standard charging method	1C CC (constant current) charge to 3.65V, then CV (constant voltage 3.65V) charge till charge current decline to $\leq 0.05C$
7	Charging time	Standard charge: 2.0 hours Ref
8	Max. charge current	2C
9	Max. continue discharge current	10A (Cell skin temperature cannot exceed 80°C)
10	Discharge cut-off voltage	2.0V
11	Operating temperature	Charging: -10°C ~ 45°C Discharging: -20°C ~ 60°C (Cell skin temperature cannot exceed 80°C)
12	Storage temperature/humidity	Temperature -10°C ~ +35°C Humidity 65%±20%RH (Recommended to store 23 ± 5°C for long term storage)
13	Cell Weight	80.0g±1.0g
14	Cell Dimension	Length: 65.0±0.3 mm Width: 26.2±0.2 mm

	Specification Approval Sheet (ACL9012 -3.3Ah)	Effective Date	2012.4.26
		Document Number	S470XLB029
		Page No.	5/11
		Version	A0


4. Battery Cell Performance Criteria

4.1. Electrical characteristics

No.	Items	Test Method and Condition	Criteria		
1	Standard Charge	Charging the cell initially with constant current at 1C and then with constant voltage at 3.65V till charge current declines to 0.05C.	N.A.		
2	Rated Cap 0.2C	Capacity measured with discharge current of 0.2C with 2.0V cut-off voltage after the standard charge.	≥3300mAh		
	Rated Cap 0.5C	Capacity measured with discharge current of 0.5C with 2.0V cut-off voltage after the standard charge.	≥3250mAh		
	Rated Cap 1C	Capacity measured with discharge current of 1C with 2.0V cut-off voltage after the standard charge.	≥3200mAh		
	Rated Cap 2C	Capacity measured with discharge current of 2C with 2.0V cut-off voltage after the standard charge.	≥3200mAh		
	Rated Cap 3C	Capacity measured with discharge current of 3C with 2.0V cut-off voltage after the standard charge.	≥3200mAh		
3	Cycle Life	Test condition: Temperature: 23± 5°C Charge: 1C CC to 3.65V, and CV to 0.05C cut off Discharge: 1C discharge to 2.0V 80% or more of 1 st cycle capacity at 1C discharge of operation	≥ 2000 times		
4	Storage Performance	Battery cell stored at 25°C with 50% SOC			
			1Month	3Month	6Month
		Cap Retention	90%	85%	80%
		Cap Recovery	95%	90%	85%
5	Initial Impedance	Internal resistance measured at AC 1KHz after 50% charge	≤ 20mohm		
6	Cell Voltage	As of shipment	3.3V ~ 3.4V		

4.2 Safety Performance


No.	Items	Test Method and Condition	Criteria
-----	-------	---------------------------	----------

	Specification Approval Sheet (ACL9012 -3.3Ah)	Effective Date	2012.4.26
		Document Number	S470XLB029
		Page No.	6/11
		Version	A0

1	Overcharge (3C/10V)	Charge the cell with current of 3C, till the voltage of the cell reach 10V and current reduce to 0A. Monitor the variation of the cell's temperature in the process of the test. Stop the test when the temperature of the cell falls to value 10°C lower than the peak value.	No explosion No fire
2	Over Discharge	Charge: 1C CC to 3.65V and CV to 0.05C cut off, Discharge the cell with 1C current for 2.5 hours.	No explosion No fire No leakage
3	Nail test	Charge: 1C CC to 3.65V, and CV to 0.05C cut off, Standby for 1 hour, then measure OCV, A nail is penetrated vertically through the center of the cell and left for over 1h. The diameter of the nail is 2.5~3.5 mm.	No explosion No fire
4	Short test (25°C)	The battery to be fully charged with standard charging condition, and short the positive and negative terminals for 4 hrs with wire resistance = 30mOhm at 25°C.	No explosion No fire
5	Short test (55°C)	The battery to be fully charged with standard charging condition, and short the positive and negative terminals for 4 hrs with wire resistance = 30mOhm at 55°C.	No explosion No fire
6	Heating test (130°C)	The battery to be fully charged with standard charging condition, and put into the chamber for heating at 130°C / 30mins.	No explosion No fire

4.3 Environmental and Mechanical Test

No.	Items	Test Method and Condition	Criteria
1	Vibration test	After standard charging, fixed the cell to vibration table and subjected to vibration cycling that the frequency is to be varied at the rate of 1Hz per minute between 10Hz and 55Hz, the excursion of the vibration is 1.6mm. The cell shall be vibrated for 30 minutes per axis of x, y axes.	No leakage No fire No explosion
2	Drop test	The battery to be fully charged with standard charging condition, and dropped from a height of 1m to concrete floor for 6 times (+/- direction on x, y axes).	No leakage No fire No explosion
3	Impact test	The battery to be fully charged with standard charging condition, and put a rod with diameter = 15.8mm on the cell, and then heavy block (weight = 9.1Kg) crash on the cell from a certain height (height = 61.0cm).	No explosion No fire

	Specification Approval Sheet (ACL9012 -3.3Ah)	Effective Date	2012.4.26
		Document Number	S470XLB029
		Page No.	7/11
		Version	A0

4	Crush test	Cell is to be crushed between two flat surfaces, the crushing is to be continued until applied force of 13 kN, and once the maximum force has been obtained it is to be released. Measure its temperature and observe event.	No explosion No fire
5	Shock test	The battery to be fully charged with standard charging condition, and subjected to 6 shocks/axis, 18 total, of peak acceleration of 150g and pulse duration of 6 ms.	No explosion No fire No leakage

4.4 Visual inspection

There shall be no such defect as scratch, flaw, crack, and leakage, which may adversely affect commercial value of the cell.

4.5 Standard environmental test condition

Unless otherwise specified, all tests stated in this Product Specification are conducted at below condition:

Temperature: $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$

Humidity: $65 \pm 20\% \text{ RH}$

5 Storage and Others

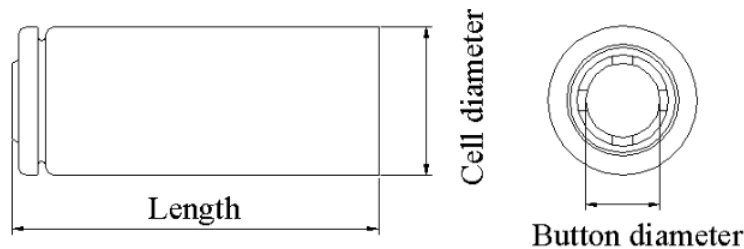
5.1 Long Time Storage

If the Cell is stored for a long time, the cell's storage voltage should be 3.2V ~ 3.4V and the cell is to be stored in a condition as No. 4.4.

5.2 Others

Any matters that this specification does not cover should be conferred between the customer and ENIX NERGIES.

6 Battery Cell Drawing (all unit in mm, not in scale)



Cell Diameter (mm)	Cell Length (mm)	Button Diameter (mm)
26.2±0.2	65.0±0.3	15.0±0.3



LGC MED/BDC

LGC MED/BDC

Lee, Yong Seok

Kim, Dong Myung

PRODUCT SPECIFICATION
CONFIDENTIAL

Document No.
LRB-PS-
CY3200_MH1_Tentative

Description
Lithium Ion INR18650 MH1 3200mAh

Date
2014-03-06

Rev
0

PRODUCT SPECIFICATION

Rechargeable Lithium Ion Battery
Model : INR18650 MH1 3200mAh

Prepared	Reviewed	Approved
Lee, Yong Seok	Ryu, Duk hyun	Kim, Dong Myung
Date : '14. 03. 06	Date : '14. 03. 06	Date : '14. 03. 06



20 YOIDO-DONG YOUNGDUNGPO-GU,
SEOUL 150-721, KOREA
<http://www.lgchem.com>



Description
Lithium Ion INR18650 MH1 3200mAh

PRODUCT SPECIFICATION
CONFIDENTIAL

Date
2014-03-06

Rev
0

1. General Information

1.1 Scope

This product specification defines the requirements of the rechargeable lithium ion battery to be supplied to the Customer by LG Chem.

1.2 Product classification: Cylindrical rechargeable lithium ion battery

1.3 Model name: INR18650 MH1

2. Nominal Specification

Item	Condition / Note	Specification
2.1 Energy (Power)	Std. charge / discharge	Nominal 3200 mAh Minimum 3100 mAh
2.2 Nominal Voltage	Average	3.67V
2.3 Standard Charge (Refer to 4.1.1)	Constant current Constant voltage End current(Cut off)	0.5C (1550mA) 4.2V 50mA
2.4 Max. Charge Voltage		4.2 ± 0.05V
2.5 Max. Charge Current		1.0 C (3100mA)
2.6 Standard Discharge (Refer to 4.1.2)	Constant current End voltage(Cut off)	0.2C (620mA) 2.5V
2.7 Max. Discharge Current		10A
2.8 Weight	Approx.	Max. 49.0 g
2.9 Operating Temperature	Charge Discharge	0 ~ 45 C -20 ~ 60 C
2.10 Storage Temperature (for shipping state)	1 month 3 month 1 year	-20 ~ 60 C -20 ~ 45 C -20 ~ 20 C

4.2 Electrical Specification

Item	Condition	Specification
4.2.1 Initial AC Impedance	Cell shall be measured at 1kHz after charge per 4.1.1.	$\leq 40 \text{ m}\Omega$, without PTC
4.2.2 Initial Power	Cells shall be charged per 4.1.1 and discharged per 4.1.2 within 1h after full charge.	$\geq 3100 \text{ mAh}$
4.2.3 Cycle Life	Cells shall be charged and discharged per 4.1.3 500 cycles. A cycle is defined as one charge and one discharge. 501st discharge power shall be measured per 4.1.1 and 4.1.2	$\geq 70 \%$ (of C_{\min} in 2.1)

4.3 Environmental specification.

Item	Condition	Specification
4.3.1 Storage Characteristics	Cells shall be charged per 4.1.1 and stored in a temperature-controlled environment at $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ for 30 days. After storage, cells shall be discharged per 4.1.2 to obtain the remaining power*.	Power remaining rate $\geq 90\%$ (P_{\min} in 2.1)
4.3.2 High Temperature Storage Test	Cells shall be charged per 4.1.1 and stored in a temperature-controlled environment at 60°C for 1 week. After storage, cells shall be discharged per 4.1.2 and cycled per 4.1.3 for 3 cycles to obtain recovered power**.	No leakage, Power recovery rate $\geq 80\%$
4.3.3 High Temperature and High Humidity Test	Cells are charged per 4.1.1 and stored at 60°C (95% RH) for 168 hours. After test, cells are discharged per 4.1.2 and cycled per 4.1.3 for 3 cycles to obtain recovered power.	No leakage, No rust Power recovery rate $\geq 80\%$
4.3.4 Thermal Shock Test	65°C (8h) \leftarrow 3hrs \rightarrow -20°C (8h) for 8 cycles with cells charged per 4.1.1 After test, cells are discharged per 4.1.2 and cycled per 4.1.3 for 3 cycles to obtain recovered power.	No leakage Power recovery rate $\geq 80\%$

* Remaining Capacity : After storage, cells shall be discharged with Std. condition(4.1.2) to measure the remaining capacity.

** Recovery Capacity : After storage, cells shall be discharged with fast discharge condition(4.1.3), and then cells shall be charged with std. charge condition(4.1.1), and then discharged with Std. condition(4.1.2). This charge / discharge cycle shall be repeated three times to measure the recovery capacity.

4.3.5 Temperature Dependency of Capacity	Cells shall be charged per 4.1.1 at 23°C ± 2°C and discharged per 4.1.2 at the following temperatures.		
	Charge	Discharge	Capacity
	23 C	-10 C 0 C 23 C 60 C	70% of P _{ini} 80% of P _{ini} 100% of P _{ini} 95% of P _{ini}

I.4 Mechanical Specification

Item	Condition	Specification
4.4.1 Drop Test	Cells charged per 4.1.1 are dropped onto an wooden floor from 1.0 meter height for 1 cycle, 2 drops from each cell terminal and 1 drop from the side of cell can (Total number of drops = 3).	No leakage No temperature rising
4.4.2 Vibration Test	Cells charged per 4.1.1 are vibrated for 90 minutes per each of the three mutually perpendicular axis (x, y, z) with total excursion of 0.8mm, frequency of 10Hz to 55Hz and sweep of 1Hz change per minute	No leakage

I.5 Safety Specification

Item	Condition	Specification
4.5.1 Overcharge Test	Cells are discharged per 4.1.2, then charged at constant current of 3 times the max. charge condition and constant voltage of 4.2V while tapering the charge current. Charging is continued for 7 hours (Per UL1642).	: No explode, No fire
4.5.2 External Short - Circuiting Test	Cells are charged per 4.1.1, and the positive and negative terminal is connected by a 100mΩ-wire for 1 hour (Per UL1642).	: No explode, No fire
4,5.3 Overdischarge Test	Cells are discharged at constant current of 0.2C to 250% of the minimum capacity.	: No explode, No fire

4.5.4 Heating Test	Cells are charged per 4.1.1 and heated in a circulating air oven at a rate of 5°C per minute to 130°C. At 130°C, oven is to remain for 10 minutes before test is discontinued (Per UL1642).	: No explode, No fire
4.5.5 Impact Test	Cells charged per 4.1.1 are impacted with their longitudinal axis parallel to the flat surface and perpendicular to the longitudinal axis of the 15.8mm diameter bar (Per UL1642).	: No explode, No fire
4.5.6 Crush Test	Cells charged per 4.1.1 are crushed with their longitudinal axis parallel to the flat surface of the crushing apparatus (Per UL1642).	: No explode, No fire

5. Caution

Warning for using the lithium ion rechargeable battery. Mishandling of the battery may cause heat, fire and deterioration in performance. Be sure to observe the following.

5.1 Cautions for Use and Handling

- When using the application equipped with the battery, refer to the user's manual before usage.
- Please read the specific charger manual before charging.
- Charge time should not be longer than specified in the manual.
- When the cell is not charged after long exposure to the charger, discontinue charging.
- Battery must be charged at operating temperature range 0 ~ 45 °C.
- Battery must be discharged at operating temperature range -20 ~ 60 °C.
- Please check the positive(+) and negative(-) direction before packing.
- When a lead plate or wire is connected to the cell for packing, check out insulation not to short-circuit.
- Battery must be stored separately.
- Battery must be stored in a dry area with low temperature for long-term storage.
- Do not place the battery in direct sunlight or heat.
- Do not use the battery in high static energy environment where the protection device can be damaged.
- When rust or smell is detected on first use, please return the product to the seller immediately.
- The battery must be away from children or pets
- When cell life span shortens after long usage, please exchange to new cells.

LTO Battery Specification

MODEL: 1865
(2.4V/1300mAh)

Prepared By/Date 编制/日期	Checked By/Date 审核/日期	Approved By/Date 批准/日期
刘国华 2013.5.21	郑小耿 2013/5/25	

Customer Approval	Signature/Date(签名/日期)
	Company Name(公司名称)
	Company Stamp(公司印章)

1 Scope				
This specification is applied to the reference battery in this Specification and manufactured by AA Portable Power Corp				
2 Product Specification				
2.1 Characteristic				
Table 1 (表 1)				
No. (序号)	Item (项目)	General Parameter (常规参数)		Remark (备注)
1	Rated Capacity (额定容量)	Typical (标称容量)	1300mAh	Standard discharge (1.0C C) after Standard charge (标准充电后 1.0C 标准放电)
		Minimum (最小容量)	1250mAh	
2	Nominal Voltage (标称电压)	2.4V		Mean Operation Voltage (即工作电压)
3	Internal Impedance (内阻)	$\leq 20m\Omega$		The measure must uses the new batteries (使用出货后一个星期内的新电池)
4	Standard charge (标准充电)	Constant Current 1300mA (1.0C) end Voltage 2.85V 26mA cut-off (恒流: 1300mA 1.0C ₅ A 截止电压: 2.85V 截止电流: 26mA)		Charge time : Approx 1.6h (充电时间: 大约 1.6 个小时)
5	Standard discharge (标准放电)	Constant current 1300mA (1.0C) end voltage 1.5V (恒流: 1300mA (1.0C) 截止电压: 1.5V)		
6	Fast charge (快速充电)	Constant Current 6500mA (5.0C) end Voltage 2.85V 26mA cut-off (恒流: 6500mA (5.0C) 截止电压: 2.85V 截止电流: 26mA)		Charge time : Approx 0.5h (充电时间: 大约 0.5 个小时)
7	Maximum Continuous Discharge Current (最大放电持续电流)	13A (10C rate)		39A (30C rate) < 5 sec
8	Operation Temperature Range (工作温度范围)	Charge (充电) : 0~45°C		60±25%R.H. Bare Cell (单体电池工作湿度范围)
		Discharge (放电) : -30~70°C		
9	Storage Temperature Range (储存温度范围)	Less than 1 year: -20~20°C (小于一年: -20~20°C)		60±25%R.H. at the shipment state (出货状态时的湿度范围)
		less than 3 months: -20~45°C (小于 3 个月: -20~45°C)		

2.2 Cycle Life

Table 2 (表 2)

No. (序号)	Item (项目)	Criteria (标准)	Test Conditions (测试条件)
1	Cycle Life (循环寿命) (1.0 C)	Higher than 70% of the Initial Capacities of the Cells (初始容量的 70%)	Carry out 3000cycle Charge: 1.0C to 2.85V Discharge: 1.0 C to 1.5 V Temperature:25±3℃ 循环 3000 次 充电: 1.0C to 2.85V 放电:1.0C 放至 1.5V 温度: 25±3℃

2.3 Temperature Dependence of discharge capacity

Cells shall be charged per 3.3.1 and discharged @0.2C₅A to 3.0 volts. Except to be discharged at temperatures per Table 3. Cells shall be stored for 2 hours at the test temperature prior to discharging and then shall be discharged at the test temperature. The capacity of a cell at each temperature shall be compared to the capacity achieved at 25 °C and the percentage shall be calculated. Each cell shall meet or exceed the requirements of Table 3.

Table 3

Discharge Temperature (放电温度)	-30℃	-20℃	25℃	70℃
Discharge Capacity (0.5C ₅ A) (放电容量/0.5C ₅ A)	60%	85%	100%	95%

3 Protection circuit

LTO battery is very safe, it can be in the overcharge and over discharge without risk, so it can be used safely without PCM;

Although it can be used safely without PCM, but charging and discharging of the battery must ensure that under normal conditions (this is all cells are required), if not the battery performance will deteriorate or failure.

4. Note For Use Of Battery

5. Cell Mechanical characteristics and Safety Test

Table 5 (表 5)

(Safety Test)

Item (项目)	Battery Condition (电池要求)	Test Method (测试方法)	Requirements (要求)
Vibration Test 振动测试		After standard charging, fixed the cell to vibration table and subjected to vibration cycling that the frequency is to be varied at the rate of 1Hz per minute between 10Hz an 55Hz, the excursion of the vibration is 1.6mm. The cell shall be vibrated for 30 minutes per axis of XYZ axes. 将标准充电后的电芯固定在振动台上, 沿 X、Y、Z 三个方向各振动 30 分钟, 振幅 1.6mm, 振动频率为 10Hz~55Hz, 每分钟变化 1Hz。	No leakage 无泄漏 No fire 不起火
Crush (挤压试验)	Fresh, Fully charged (充满电的新电池)	Crush between two flat plates. Applied force is about 13kN(1.72Mpa) for 30min. (电池放置在两块平面金属板间, 施加 13KN (1.72Mpa) 的作用力, 且持续保持 30 分钟)	No explosion, No fire (无起火无爆炸)
Short Circuit (短路试验 20℃)	Fresh, Fully charged (充满电的新电池)	Each test sample battery, in turn, is to be short circuited by connecting the (+) and (-) terminals of the battery with a Cu wire having a maximum resistance load of 0.05 Ω .Tests ae to be conducted at room temperature(20±2℃). (在常温下约 20±2℃ 依次把每个样品电池的正负极用铜线连接起来使电池外部短路--线路总电阻不超过 0.05 Ω)	No explosion, No fire No fire hetemperature of the surface of the Cells are lower than 150℃ (无起火无爆炸 电池表面温度应低于 150℃)
Impact (冲击试验)	Fresh, Fully charged (充满电的新电池)	A 56mm diameter bar is inlayed into the bottom of a 10kg weight. And the weight is to be dropped from a height of 1m onto a sample battery and then the bar will be across the center of the sample. (用一条直径为 56mm 的圆棒放置在电池中央, 将一 10Kg 的重锤从 1m 的高度垂直落下在电池的中心位置)	No explosion, No fire (无起火无爆炸)
Over Charge (过充测试)	Fresh, Fully charged (充满电的新电芯)	Charging voltage: 2.4*4=9.6V; charging current: 2C; end current: 0.02C (充电电压: 标称电压的 4 倍, 2.4*4=9.6V, 充电电流: 2C, 结束电流: 0.02C)	No explosion, No fire (无起火无爆炸)
Forced Discharge (过放试验)	Fresh, Fully charged (充满电的新电池)	Discharge at a current of 1 C A for 2.5h. (以 1C 的电流放电 2.5 小时)	No explosion, No fire (无起火无爆炸)

6. Handling of Cells

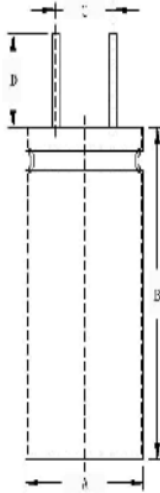
6.1 Cell fixing

The cell should be fixed to the battery pack by its large surface area.
No cell movement in the battery pack should be allowed.

6.2 Inside design (外壳内部设计)

No sharp edge components should be insides the pack containing the LIP cell.

10. Initial Dimension: (初始尺寸)



单位: mm 公差: ±0.2

项目	参数
A(直径)	18.7
B(长度)	65.3
C(引脚间距)	7.5
D(引脚规格)	12

Units (单位)	mm		PCM (保护板)				
Connector/插头	无						
Wire(引线)	无		L(线长)				
T (厚度)	Max.	W (宽度)	Max.	H (高度)	Max.		
Drawer (绘图)		Checked (审核)		Approved (批准)		Date (日期)	
			DRAWING				