

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv vnějšího prostředí na parametry akumulátorů

Autor práce: **Bc. Tomáš Vít**
Vedoucí práce: **Ing. et Ing. Petr Kašpar Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš VÍT**
Osobní číslo: **E20N0024P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Vliv vnějšího prostředí na parametry akumulátorů**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Analyzujte současný stav trhu s akumulátory s ohledem na jejich předpokládané použití.
2. Změřte a porovnejte vybrané parametry akumulátorů za standardních podmínek vnějšího prostředí.
3. Změřte a porovnejte vybrané parametry akumulátorů za změněných podmínek vnějšího prostředí.
4. Proveďte zhodnocení získaných výsledků.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

HAMMERBAUER, Jiří. Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. 2. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. 181 s. ISBN 80-7082-411-5
POP, Valer et al. Battery management systems: accurate state-of-charge indication for battery-powered applications. [Dordrecht]: Springer, ©2010. xx, 223 s. Philips research book series; v. 9. ISBN 978-90-481-7773-8
HACKNEY, Stephen Andrew, ed., AIFANTIS, Katerina E., ed. a KUMAR, R. Vasant, ed. High energy density lithium batteries: materials, engineering, applications. Weinheim: John Wiley & Sons, ©2010. xvi, 265 s. ISBN 978-3-527-32407-1

Vedoucí diplomové práce: **Ing. et Ing. Petr Kašpar, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**




Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 17.května 2022

Bc. Tomáš Vít

Abstrakt

Předložená práce se zabývá zdroji elektrické energie konkrétně akumulátory. V úvodu práce je pro bližší pochopení problematiky rozdělení zdrojů elektrické energie, konstrukce akumulátorů, vlivy ovlivňující funkci akumulátorů a řešerše dostupných technologií na současném trhu. V praktické části jsou vybrané akumulátory podrobeny zkouškám v normálních pokojových podmínkách a změněných záporných podmínkách. Z výsledků zkoušek byla následně zjištěna kapacita a porovnána z deklarovanými hodnotami výrobce.

Klíčová slova

Akumulátor, baterie, článek, sekundární článek, zdroj, funkce, konstrukce, vliv prostředí, recyklace, parametry

Abstract

The presented thesis deals with sources of electricity, specifically batteries. For the purposes of better comprehension of the topic, the introduction presents various types of electricity sources, as well as battery designs, influences affecting the function of batteries and research of available technologies in the current market. In the practical part, selected batteries are tested in normal room conditions and changed negative conditions. The capacity was then determined from the test results and compared with the declared values of the manufacturer.

Key Words

Accumulator, battery, cell, secondary cell, source, function, construction, environmental influence, recycling, parameters

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. et Ing. Petru Kašparovi, Ph.D. za odborné vedení práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Karlovi Šímovi za asistenci při měření, ochotu a konzultace týkající se odborné práce. Děkuji Ing. Martinovi Hirmanovi Ph.D. za zpřístupnění laboratoří s klimatickými komorami. Můj dík také patří panu doc. Ing. Jiřímu Hammerbauerovi Ph.D. za vypůjčení aparatury nutné k měření.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Základní rozdělení elektrochemických zdrojů energie.....	- 2 -
1.1 Primární článěk	- 2 -
1.2 Sekundární článěk-akumulátor.....	- 2 -
1.3 Baterie	- 2 -
1.4 Palivový článěk	- 3 -
2 Konstrukce akumulátoru	- 4 -
2.1 Elektrody	- 4 -
2.2 Separátor	- 4 -
2.3 Elektrolyt.....	- 4 -
3 Funkce akumulátoru	- 5 -
4 Parametry akumulátorů	- 6 -
4.1 Kapacita.....	- 6 -
4.2 Energetická hustota	- 6 -
4.3 Napětí	- 6 -
4.4 Odpor.....	- 6 -
4.5 Specifická hustota energie.....	- 6 -
4.6 Parametr C.....	- 7 -
4.7 Efektivita	- 7 -
4.8 Životnost	- 7 -
4.9 Samovybíjení.....	- 7 -
4.10 Ekologičnost.....	- 8 -
4.11 Bezpečnost.....	- 8 -
4.12 Ostatní parametry	- 8 -
5 Vlivy působící na parametry akumulátorů	- 9 -
5.1 Vliv teploty.....	- 9 -
5.2 Cykly akumulátorů.....	- 10 -
5.3 Způsob nabíjení akumulátorů.....	- 10 -
5.3.1 Nabíjení konstantním napětím	- 10 -
5.3.2 Nabíjení konstantním proudem.....	- 11 -

5.4	Způsob vybíjení akumulátorů	- 12 -
6	Charakteristická měření akumulátorů.....	- 14 -
6.1	Měření kapacity.....	- 14 -
6.2	Měření odporu.....	- 15 -
6.3	Měření napětí	- 15 -
7	Analýza trhu s články	- 17 -
7.1	Druhy primárních článků	- 17 -
7.1.1	Alkalický článek	- 17 -
7.1.2	Zinko-uhlíkový článek.....	- 18 -
7.1.3	Lithiové články	- 19 -
7.2	Druhy sekundárních článků.....	- 20 -
7.2.1	Lithium-iontové	- 21 -
7.2.2	Li-Pol	- 21 -
7.2.3	Olověné gelové akumulátory	- 22 -
7.2.4	LiFePO ₄	- 22 -
8	Využití akumulátorů	- 23 -
8.1	Úložiště energie.....	- 23 -
8.2	Doprava	- 24 -
8.3	Osobní elektronika	- 25 -
9	Recyklace akumulátorů	- 26 -
10	Vlastní měření.....	- 27 -
10.1	Postup měření	- 27 -
10.1.1	Použité přístroje	- 35 -
10.2	Výsledky měření.....	- 40 -
10.2.1	Výsledky měření olověného akumulátoru LONG 12V.....	- 40 -
10.2.2	Výsledky měření olověného akumulátoru VIPOW 12V	- 43 -
10.2.3	Výsledky měření akumulátoru GP 1100DH	- 46 -
10.2.1	Výsledky měření akumulátoru MEXCELL D-D4000H	- 48 -
10.2.2	Výsledky měření akumulátoru EMMERICH D 9000 MAH FT	- 51 -
10.2.3	Výsledky měření akumulátoru LGABHE 21865.....	- 53 -

10.2.4	Výsledky měření lithio-iontového akumulátoru TINKO IRC18650	- 55 -
10.2.1	Výsledky měření akumulátoru MOTOMA LCR18650-2000MAH	. - 58 -
10.3	Zhodnocení vlastního měření	- 61 -
	Zhodnocení a závěr	- 64 -
	Literatura.....	- 66 -
	Přílohy.....	I

Úvod

S rostoucím tlakem na bezdrátová zařízení, elektromobilitu nebo velkokapacitní skladování energie jsou kladeny vyšší požadavky na kvalitu komponentů ovlivňující spolehlivost těchto technologií. Jedním z klíčových komponentů takových zařízení jsou elektrochemické články skladující potřebnou elektrickou energii. V dnešní době se jedná většinou o akumulátory tedy sekundární články, kterých se na současném trhu vyskytuje velké množství s různými parametry, použitou technologií a rozdílnou spolehlivostí.

Předložená práce se v úvodu zabývá obecnějším popisem konstrukce akumulátorů, rozebráním hlavních parametrů rozhodující o použití akumulátorů, bližším popisem okolností, které mají důsledek na konečný výkon článků a v neposlední řadě popisem jednotlivých typů primárních i sekundárních článků vyskytujících se na současném trhu.

Hlavním výstupem práce je měření několika vybraných akumulátorů různých typů. Během měření je sledován čas, respektive průběh napětí při konstantním zatěžování článku až do bodu charakterizující vybití akumulátoru. Test probíhá v klimatických komorách pro zaručení stálosti prostředí konkrétně teploty. Vždy budou měřeny tři články stejného typu a od stejného výrobce zároveň z důvodu dosažení větší vypovídající hodnoty naměřených dat, a to za normálních a následně změněných podmínek. V závěru budou naměřené průběhy a dopočítané kapacity akumulátorů vyhodnoceny a porovnány s parametry udávané výrobcem. Správně by se naměřené a deklarované hodnoty měly lišit jen minimálně.

Důvodem měření je ověření spolehlivosti, respektive správnosti uváděných informací výrobcem. Je totiž možné, že mnozí výrobci udávají parametry, které nemusejí odpovídat realitě a mohou tak způsobit problémy při technickém nasazení těchto akumulátorů v praxi.

1 Základní rozdělení elektrochemických zdrojů energie

Potřeba ukládání energie je dnes samozřejmostí z důvodů velkého množství současných bezdrátových zařízení, osobní elektroniky, velkokapacitních úložišť nebo elektromobilů. Parametry a typy úložišť se však mohou lišit. V současné elektrotechnice se vyskytují v základě tři typy úložišť elektrické energie a laická veřejnost si je často plete dohromady, i když jsou mezi nimi podstatné rozdíly.

1.1 Primární článek

Prvním hojně využívaným typem je tzv. primární článek nebo také galvanický článek. Jedná se o chemický zdroj energie, který nelze znovu nabít a často obsahuje jedovaté látky [1]. Většinou jsou vhodné pro aplikace menších zařízení, kde je možná jejich jednoduchá výměna. Proti negativu nenabíjecího primárního článku stojí jeho dlouhá skladovatelnost, bezúdržbovost, a často nízké pořizovací náklady [2].

Typů primárních článků existuje hned několik. Zinko-uhlíkový článek, který je někdy také nazýván suchým článkem poskytuje poměrně vysoký výkon za nízkou cenu. Lithiový článek se vyznačuje svým zachováním parametru v širokém rozpětí teplot. Dále lze mezi primární články řadit alkalický článek nebo kadmium-rtuťový článek. Vybraným typům primárních článků se věnuje kapitola 7.1.

1.2 Sekundární článek-akumulátor

Akumulátor nebo také sekundární článek je zdrojem elektrochemické energie a z pravidla po jeho výrobě se akumulátor a testuje. Po správném prozkoušení je možné ho použít jako zdroj elektrické energie. Důvod, proč je sekundární článek zajímavější, než primární je možnost dobíjení sekundárního článku.

Druhů akumulátorů je nepřehledné množství. Lze mezi ně řadit olověné akumulátory, nikl-kadmiové akumulátory nebo dnes asi nejhojněji užívané lithium-iontové akumulátory [3].

1.3 Baterie

Pojmem baterie se rozumí sdružení několika článků dohromady [1]. Můžou se vyskytovat jako autobaterie, baterie pro velkokapacitní úložiště nebo 9 V baterie, která je složená z 6 článků. Obecně se různé druhy baterie liší velikostí a objemem vzhledem k jejich použití.

1.4 Palivový článek

Palivový článek složen ze dvou elektrod. Proto aby systém fungoval a generoval elektrickou energii je potřeba paliva a takzvaného oxidovadla. Palivo se přivádí k anodě a oxidovalo ke katodě. Článek funguje do té doby, dokud bude dodáváno palivo či oxidovadlo. Důležitým aspektem je odvod zplodin, které vznikají při reakci. Palivové články mají provozní teplotu od 100 °C (nizkoteplotní) do 1000 °C (vysokoteplotní) [4]. Kombinací paliv a oxidovadel je mnoho. Nejznámější kombinací je však vodík jako palivo a kyslík jako oxidovadlo [5].

2 Konstrukce akumulátoru

Aby akumulátor fungoval, jak má, musí obsahovat několik komponentů. Mezi takové komponenty patří elektrody, separátor, elektrolyt a pevný obal pro uložení. Některé akumulátory obsahují i doplňující součásti jako integrované obvody pro hlídání vybíjecího či nabíjecího proudu a hlídání přepětí či podpětí. Dalšími komponenty mohou být různé ventily nebo zátky.

2.1 Elektrody

Konstrukčním prvkem každého akumulátoru jsou elektrody, které určují základní vlastnosti akumulátorů. Elektrody akumulátorů mívají různá konstrukční provedení například v podobě mřížkových elektrod, diskových elektrod nebo trubkových či tyčových elektrod. Elektrody jsou pokryty aktivním materiálem. V samotných akumulátorech lze najít kladné a záporné elektrody. Kladná elektroda je materiál, který v průběhu vybíjení chemicky redukuje. Záporná elektroda bývá v porézním stavu, aby kontaktní plocha byla co největší. Například v případě oloveného akumulátoru je kladná elektroda oxid olovičitý (PbO_2) a vybíjením se redukuje na síran olovnatý (PbSO_4) [4]. Záporná elektroda je porézní olovo a vybíjením se též redukuje na síran olovnatý [4].

2.2 Separátor

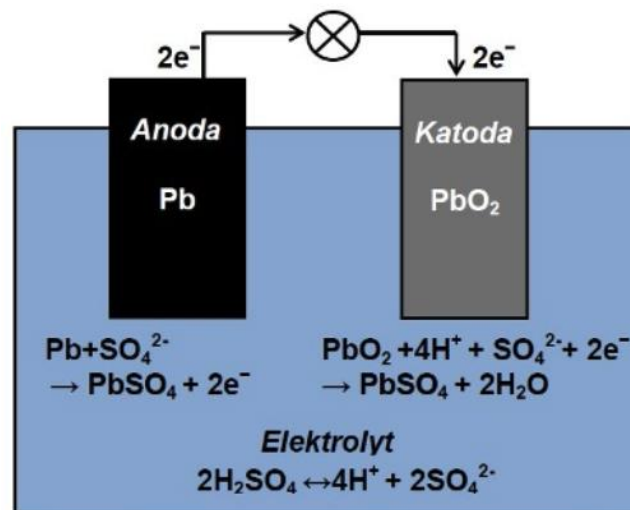
Funkce separátoru je oddělovat kladnou elektrodu od záporné, aby nedocházelo ke zkratům či průběžným vznikům vodivých cest. Separátor by však měl elektrolytu klást c nejmenší elektrický odpor a nezabraňovat průchodu iontům. Separátory se vyhotovují z celulózy nebo polymerů.

2.3 Elektrolyt

Elektrolyt je nejčastěji v podobě tekutina nebo gelu, která je schopna vést elektrický proud. Vedení proudu zde umožňují ionty, které mají díky svému objemu menší pohyblivost než elektrony. Tyto vlastnosti lze však zlepšovat přidáním různých aditiv. Elektrolytem může být například kyselina sírová (H_2SO_4) nebo slaná voda [6].

3 Funkce akumulátoru

Rozdíl mezi funkcí primárního článku tedy článku, který nelze dobít a sekundárního znovu dobíjecího článku. Primární i sekundární článek fungují na principu chemické reakce, při které vzniká napětí. Elektrodotový systém akumulátoru je tvořen anodou a katodou uložených v elektrolytu. Velikost elektrického napětí určuje rozdíl potenciálů elektrod [7]. Po zapojení článku je zdrojem napětí reakce mezi elektrolytem a elektrodou, která probíhá až do vyčerpání potenciální energie reakce. Pro primární články je tento jev nevratný. Funkce akumulátoru je dobře patrná na olověném článku. Anoda je tvořena olovem (Pb), elektrolyt vodou zředěnou kyselinou sírovou (H_2SO_4) a katoda oxidem olovičitým (PbO_2) [7]. V průběhu reakce dochází k reakci elektrod a kyselina je ochuzována a postupem reakce měněna na vodu [7].



Obr. 1: Olověný článek. Převzato z: [4].

Sekundární článek funguje na principu chemické reakce, kdy se při vybíjení energie uvolňuje a tedy reakce probíhá jedním směrem. Při nabíjení reakce probíhá opačným směrem a energie se absorbuje [8]. Každý akumulátor má pak omezený počet cyklů, kolikrát takový elektrochemický proces může proběhnout.

Současný nepoužívanější Lithium-Iontový článek, který lze opakovaně dobíjet funguje podobně. Lithium-Iontový článek je složený z anody, katody, separátoru, který brání zkratu uvnitř baterie a kladného a záporného kolektoru. To co umožňuje akumulátoru opětovné nabíjení je pohyb lithiových iontů, které vytváří v anodě volné elektrony. Při zátěži katoda uvolní ionty, které putují na anodu a generují se elektrony a tím poskytují elektrický proud [9].

4 Parametry akumulátorů

Mimo typu článku se udávají i charakteristické parametry, podle kterých lze posoudit celkové vlastnosti článku. Na základně těchto parametrů lze pak správně vybrat článek, který se bude nejlépe hodit pro napájení zařízení. Přehled nejčastějších parametrů je popsán v následujících podkapitolách.

4.1 Kapacita

Kapacita se značí nejčastěji písmenem C jednotka je Ah (ampérhodina) nebo Wh (Wattodina) [10]. Obecně kapacita určuje počet hodin, jak dlouho je možné baterii vybíjet konstantním proudem. Kapacitu může ovlivňovat například provozní či skladovací teplota nebo nabíjecí a vybíjecí proud. Z pravidla u každého článku výrobce udává deklarovanou kapacitu, kterou by nový článek měl disponovat.

4.2 Energetická hustota

Vyjadřuje množství energie uložené na objemovou jednotku článku. Nejčastěji se udává ve Wh/m³ nebo dm³ případně na litr. Tento parametr je silně závislý na použité technologii a materiálu z něhož je článek vyroben.

4.3 Napětí

Stanovuje se měřením napětí článku mezi anodou a katodou. Jednotka udávající napětí je u většiny článků v jednotkách V (voltech). Obecně je napětí dáno chemickou reakcí probíhající v článku. Rozlišuje se napětí jmenovité a skutečné. Jmenovité napětí je deklarováno normou. Skutečné napětí lze naměřit na svorkách a závisí například na stavu nabití nebo na teplotě.

4.4 Odpor

Jako každá elektrotechnická součástka tak i články kladou odpor protékajícímu proudu. Udává se v miliohmeh ($m\Omega$) a důsledkem jsou zejména tepelné ztráty.

4.5 Specifická hustota energie

Jedná se o kapacitu energie na kilogram baterie. V praxi to znamená, jak rychle dokáže baterie dodávat určité množství energie. Konkrétně baterie s velkou specifickou hustotou se dokáže rychle vybit, ale vydá velké množství energii [11].

4.6 Parametr C

Často uváděný parametr C nebo také *C-rate* charakterizující poměrovou veličinu nabíjení nebo vybíjení. Jedná se o poměrnou veličinu k ampérhodinové nebo watthodinové kapacitě. Například akumulátor o kapacitě 80 Ah má nabíjecí proud 1 C roven 80 A [12]. Pro vybíjecí charakteristiky pro parametr C platí, že při uvedení 1 C u stejného typu akumulátoru o kapacitě 80 ampérhodin bude při plném nabití poskytovat proud 80 ampér po jednu hodinu. Pro kvalitnější představu je parametr C s odpovídajícím časem znázorněn v následující Tab. 1.

Tab. 1: Příklad hodnot parametru C s odpovídajícím časem vybíjení/nabíjení. Převzato z: [13].

C	Čas
2 C	30 minut
1 C	1 hodina
0,2 C	5 hodin

4.7 Efektivita

Při nabíjení a následném použití článku dochází ke ztrátám způsobené chemickou reakcí, degradací materiálu či odporu. Článek se při vybíjení může zahřívat a dochází k úbytku energie. Jinak řečeno z článku nelze získat stejné množství energie, která byla nabitá. Efektivita je udávána v procentech a vyjadřuje rozdíl v kapacitě před nabitím a po vybití článku, vlivem parazitních ztrát během přeměny.

4.8 Životnost

U akumulátorů často udávaný parametr, který vyjadřuje počet cyklů nabití a vybití, než článek začne ztrácet požadované vlastnosti. Zvýšit životnost akumulátorů lze například částečným cyklováním. V průběhu života akumulátoru se zvyšuje vnitřní odpor nebo může docházet k postupnému nafouknutí akumulátoru.

4.9 Samovybíjení

Určuje pokles kapacity bez zátěže za určitý čas. Takový úbytek kapacity lze však v případě potřeby dobít zpět. Většinou se tento parametr řeší u dlouhodobého skladování a vliv na tento parametr můžou mít parametry prostředí jako teplota nebo vlhkost. Určuje

se v procentech za čas. Konkrétně o kolik poklesne kapacita za určité období během skladování. Výrobci často udávají doporučené podmínky pro skladování jako je doporučená teplota nebo úroveň nabití akumulátoru.

4.10 Ekologičnost

Čím dále více řešený parametr udávající vliv na životní prostředí. Jedná se například o materiály z jakých je akumulátor vyroben, původ materiálu nebo náročnost výroby. Velký důraz se klade i na recyklovatelnost jednotlivých komponent celkového produktu případně pokud se jedná o kompozit tak na náročnost oddělení jednotlivých materiálu zpět na primární suroviny.

4.11 Bezpečnost

Určuje, jak se článek zachová při zkratu případně udává dobu hoření, možnou explozi a podobně. Bezpečnost akumulátorů se obzvláště řeší při případném poškození článku.

4.12 Ostatní parametry

V praxi je možné se setkat s mnoha dalšími parametry. Může se jednat například o **špičkový vybíjecí proud** charakterizující maximální proud vybíjení článku, který může být aplikován jen po určitou dobu udávanou výrobcem [14]. Pokud se stanovená doba překročí může vést ke zničení článku. Mezi další ovlivňující parametry samotného akumulátoru je **provozní teplota, tolerance přebíjení a vybití** a v neposlední řadě i **cena**.

5 Vlivy působící na parametry akumulátorů

Jako každé elektrické zařízení ovlivňuje okolí jeho funkčnost. U akumulátoru a obecně u článků hraje roli hned několik faktorů. Tyto faktory lze rozdělit do parametrů okolí, které nelze často ovlivnit a na parametry, které spotřebitel může ovlivnit jako je hloubka vybití a nabití nebo nabíjecí a částečně i vybíjecí proud. Dalším faktorem, který konečný spotřebitel nemůže lehce ovlivnit je kvalita materiálů a celkového provedení výrobcem. Proto se některé parametry liší u článků, které jsou ze stejných materiálů a využívají stejnou technologii článku, avšak jinou technologii výroby a kvalitu komponent. Na následujících řádcích jsou rozepsány spíše parametry, které ovlivňují článek jako hotový produkt.

5.1 Vliv teploty

Prvním a významným parametrem je teplota, která je velmi sledována u provozu baterií. Nejedná se pouze o teplotu prostředí nebo provozní teplotu samotného článku, ale i o teplotu, kde je článek v provozu a také o teplotu skladovacího prostoru, kde je článek skladován.

V určitých mezích platí, že zvýšená teplota pomáhá chemické reakci v článku a napomáhá tedy lépe využít kapacitu článku [12]. Na druhou stranu vysoká teplota podporuje samovybití a degradaci elektrochemického systému článku [12], [15]. Například u lithium-iontových článků dochází při teplotách vyšších jak 50 °C k postupnému rozpadu SEI (Solid electrolyte interface) [16]. Tato vrstva má za úkol chránit zápornou elektrodu a po jejím přerušení vrstvy může docházet ke zkratům uvnitř článku [16]. Doporučená teplota tak bývá od 15 °C až do 35 °C [12]. V extrémním případě může vysoká teplota vést až k destrukci článku. V případě vyšších teplot je však dobré uvažovat o aktivním chlazení, aby se teplota udržovala v mezích zmíněného intervalu. Nevýhoda takového chlazení je však jeho vlastní spotřeba energie, kterou chlazení spotřebuje. Existují však technologie, které zvládají i vysoké provozní teploty bez chlazení jako je např. akumulátor založený na kombinaci sodík-síra [12]. Co se týká skladování akumulátorů ovlivňuje teplota hlavně samovybití. Samozřejmě záleží na technologii článku, jak bude citlivý na teplotu vzhledem k samovybití. Obecně se udává při zvýšení teploty o 10 °C zdvojnásobení rychlosti samovybití [12].

Na články mají vliv i nízké teploty. Nízké teploty jsou v současné době často řešenou problematikou elektromobilů. Při vystavení baterií nízkým teplotám se zvýší vnitřní odpor, což má za následek horší nabíjení a snížení kapacity [15]. Dochází totiž ke snížení kinetiky reakce a tím pádem k horšímu přenosu náboje uvnitř baterie. Elektrolyt v nízkých teplotách

houstne a elektrody mezi sebou hůře interagují. Extrémním případem je zmrznutí elektrolytu, kdy dochází ke zničení článku. Takovým problémům lze však předcházet přidáním aditiv do elektrolytu, který následně sníží svůj bod mrznutí. Běžná teplota, kdy elektrolyt s aditivou zmrzá je až $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16].

5.2 Cykly akumulátorů

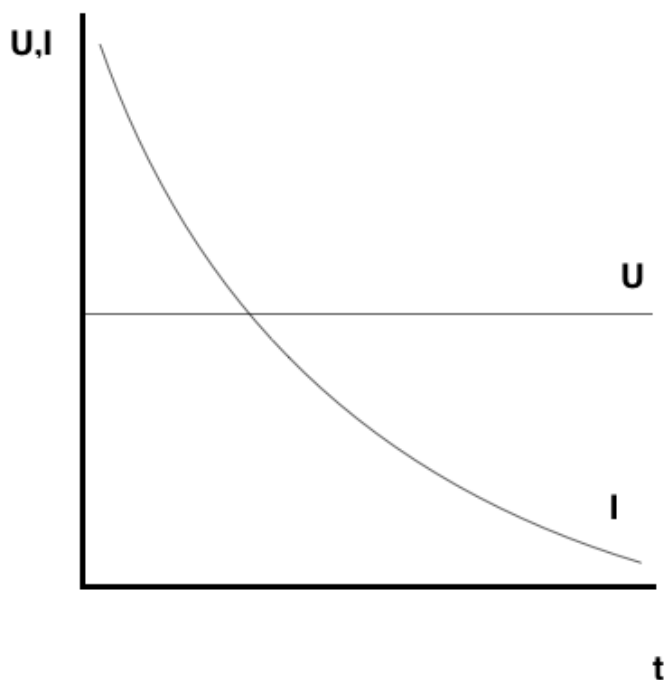
Jeden cyklus baterie je udáván jako úplné nabití článku a následné úplné vybití článku. S cykly jsou tedy úzce spojeny pojmy hloubka vybití a nabití. Obecně platí, že akumulátory není vhodné dobíjet do 100 % a vybíjet do 0 % jejich nominální kapacity. Většinou se doporučuje určité rozmezí např. 80 % nabití a 20 % vybití. Při takovém cyklování akumulátor zvyšuje svou životnost, avšak na úkor nevyužití celkového rozsahu kapacity akumulátoru.

5.3 Způsob nabíjení akumulátorů

Mezi další faktory, které mají vliv na celkový stav a životnosti akumulátorů je způsob jejich dobíjení. Každý výrobce by měl u svého výrobku zmínit nabíjecí charakteristiky tedy hodnotu napětí, respektive maximálního doporučeného dobíjecího proudu při nabíjení. Nedodržování těchto kritérií a parametrů vede k pomalému poškozování akumulátoru a ve výsledku ke zhoršování jeho parametrů.

5.3.1 Nabíjení konstantním napětím

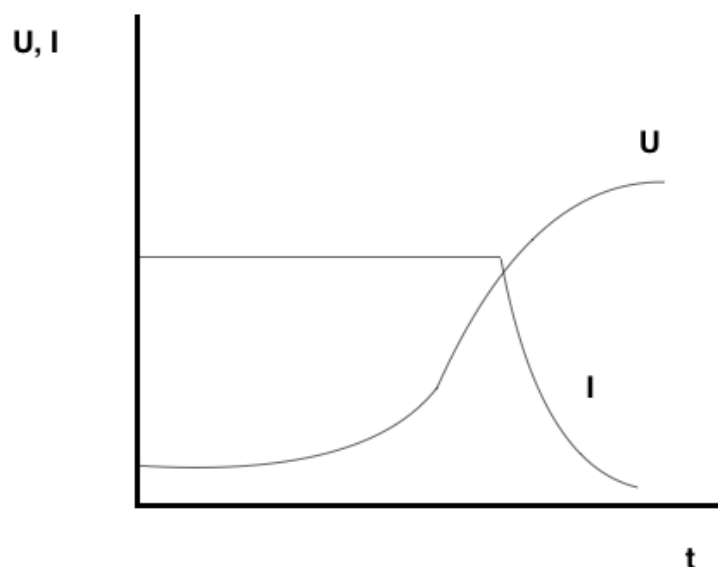
Pro nabíjení konstantním napětím je typický prvotní velký proud, který má za následek ohřátí elektrolytu. Napětí se mění jen minimálně a je stanoveno na konstantní hodnotu s možnou odchylkou $\pm 1\%$ [4], [17]. Takové nabíjení dovoluje z důvodu nízkého konečného proudu dlouhou dobu přebíjení akumulátoru až 48 hodin [17]. Jednou z výhod nabíjení konstantním napětím je rychlá obnova náboje aniž by docházelo k poškození elektrod [4]. Na druhou stranu např. u olověných akumulátorů z důvodů vysokých počátečních proudů jsou vyžadovány usměrňovače, které u konce nabíjecích cyklů jsou minimálně využívány, což může být považováno za nevýhodu. Rozdíl mezi počátečním a konečným proudem se pohybuje v poměru 100:1 až 200:1 [4]. Průběh nabíjení v závislosti na napětí (U) proudu (I) a na čase (t) je vyobrazeno na následující Obr. 2.



Obr. 2: Graf závislosti napětí a proudu na čase u nabíjení konstantním napětím.
Převzato z: [17].

5.3.2 Nabíjení konstantním proudem

Proud během nabíjení zůstává stejný, zatímco napětí akumulátorů roste v závislosti na typu a stavu akumulátoru. Obnova elektrického náboje probíhá lineárně v průběhu času. Na rozdíl od charakteristiky nabíjení konstantním napětím zde jsou usměrňovače využívány až do konce nabíjení. Nevýhodou je u této metody přetěžování akumulátoru z důvodů zplynování, což vede k rozkladu elektrolytu. Průběh nabíjení v závislosti na napětí (U) proudu (I) a na čase (t) ukazuje následující Obr. 3.

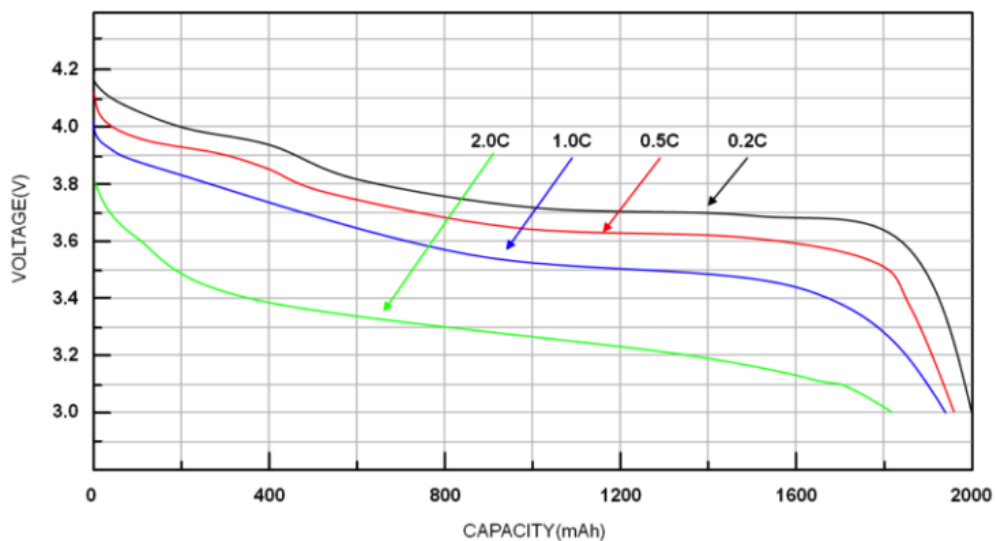


Obr. 3: Graf závislosti napětí a proudu na čase u nabíjení konstantním proudem.
Převzato z: [4], [18].

5.4 Způsob vybíjení akumulátorů

Velký vliv na životnost akumulátorů má způsob vybíjení, respektive zatěžovací proud při vybíjení akumulátoru. Většina datových listů obsahuje i referenční hodnoty zátěže jakou je možné akumulátor zatížit. V případě příliš velkého zatěžovacího proudu dochází k rychlejší degradaci akumulátoru a tím pádem i ke snížení celkové životnosti. Obecně je doporučeno akumulátory proudově nepřetěžovat a v případě možnosti volit takové proudy, které se pohybují spíše ve spodních hladinách referenčních hodnot udávaných výrobcem.

Jak u lithium-iontových tak i u ostatních technologií akumulátorů v případně zatížení vysokými proudy dochází k tzv. posunutí offsetu celé vybíjecí charakteristiky, tedy posunutí celé vybíjecí charakteristiky [19].



Obr. 4: Posunutí offsetu lithium-iontového akumulátoru z důvodu zvýšené proudové zátěže. Převzato z: [19].

Vysoké proudy nemají vliv jen na celkovou životnost akumulátoru, ale také snižují jmenovitou hodnotu kapacity. To je důvod, proč výrobci udávají pro jednotlivá proudová zatížení různé kapacity.

V současné době je odolnost akumulátorů proti pulsním proudům, které mohou dosahovat až několika násobku parametru C celkem řešenou problematikou. Při takových zatíženích se může stát, že akumulátor ztratí schopnost ukládat náboj a tím pádem ztratí funkci akumulátoru a nepůjde znovu nabít [20].

6 Charakteristická měření akumulátorů

V současné době nabývají baterie na významu a často jsou záložním systémem tam, kde je elektřina nutná i při výpadku sítě. Takovými objekty mohou být nemocnice, datová centra nebo i železnice. V momentě potřeby se zapne záložní zdroj, který napájí ty nejnutnější zařízení k zajištění provozu. Jelikož mohou být některé bateriové systémy náchylné na rozdílné parametry je důležité neustálé měření stavu těchto záložních systémů, aby vše fungovalo, jak má. V případě selhání i záložního zdroje by mohlo dojít k vážným následkům. Dnes existují systémy, které dohlíží na stav a měření baterií. Může se jednat o Battery management system (BMS) nebo o Uninterruptible Power Source (UPS).

Každá baterie má své specifické parametry, které se v průběhu života baterie mění. Jejich rychlost změny je závislá na délce používání, způsobu nebo prostředí, kde je baterie využívána. Nejčastější měření na bateriích jsou například měření kapacity, napětí na prázdnou, impedance nebo vnitřní odpor [21]. Další měření poskytující užitečné informace může být měření životnosti, hustoty elektrolytu nebo odolnost proti přebíjení [21]. Na dalších řádcích této kapitoly bude popsáno měření základních veličin popisujících stav baterií.

6.1 Měření kapacity

Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů baterií. Tento parametr se v průběhu života baterie mění a jeho stav je závislý na mnoha faktorech jako je například hloubka nabíjení a vybíjení nebo i teplota. Obecně lze určit kapacitu pomocí vzorce (1).

$$C = \frac{U_p \cdot t}{R} [Ah] \quad (1)$$

kde

U_p [V]... průměrné svorkové napětí

t [h]... doba vybíjení

R_z [Ω]... zatěžovací odpor [21]

Při měření se postupuje tak, že se baterie vybíjí stanoveným proudem přes příslušný zatěžovací rezistor, který je konstantní. V průběhu se měří napětí až do té doby, kdy klesne na charakteristickou hodnotu pro vybití. Celý tento děj je měřen v čase, aby pak bylo možné dosadit do vztahu (1). Vztah lze také upravit nahrazením napětí U_p společně s hodnotou zatěžovacího odporu R a vybíjecího proudu I . Vzniklý vztah (2), který je uveden níže

je použit v praktické části práce pro výpočet kapacity vycházející z výsledků naměřených průběhu jednotlivých akumulátorů.

$$C = I_V \cdot t \quad (2)$$

Kde:

I_V [A] ... konstantní vybíjecí proud

t [h] ... čas, kdy bylo dosaženo napětí signalizující vybití akumulátoru, které bylo stanoveno výrobcem

6.2 Měření odporu

Jak kapacita, tak i vnitřní odpor se u sekundárních článků v průběhu života mění. Celkově se mění odpor i kapacita velmi málo až ke konci životnosti, kdy odpor akumulátorů vzroste. Podle odporu článku lze zjistit stav článku. Je dobré měřit odpor článku v průběhu celého jeho provozu, protože samotná hodnota z jednoho měření nemá dostatečnou vypovídající hodnotu k posouzení stavu [22].

6.3 Měření napětí

Napětí článků je další velice důležitým parametrem zvláště když jsou články zapojeny do *battery packů*, kde jsou články zapojeny v sério-paralelních kombinacích. V případě odlišného napětí článků by docházelo k vyrovnání napětí na ostatních člancích a mohlo by docházet k přehřívání. Napětí na samostatném článku je dáno rozdílem potenciálu katody a anody, kdy jsou potenciály důsledkem chemické reakce mezi elektrodami a elektrolytem. Potenciál článku se vypočítá pomocí vzorce (3).

$$U = U_C - U_A \text{ [V]} \quad (3)$$

Kde:

U [V]... celkové napětí článku

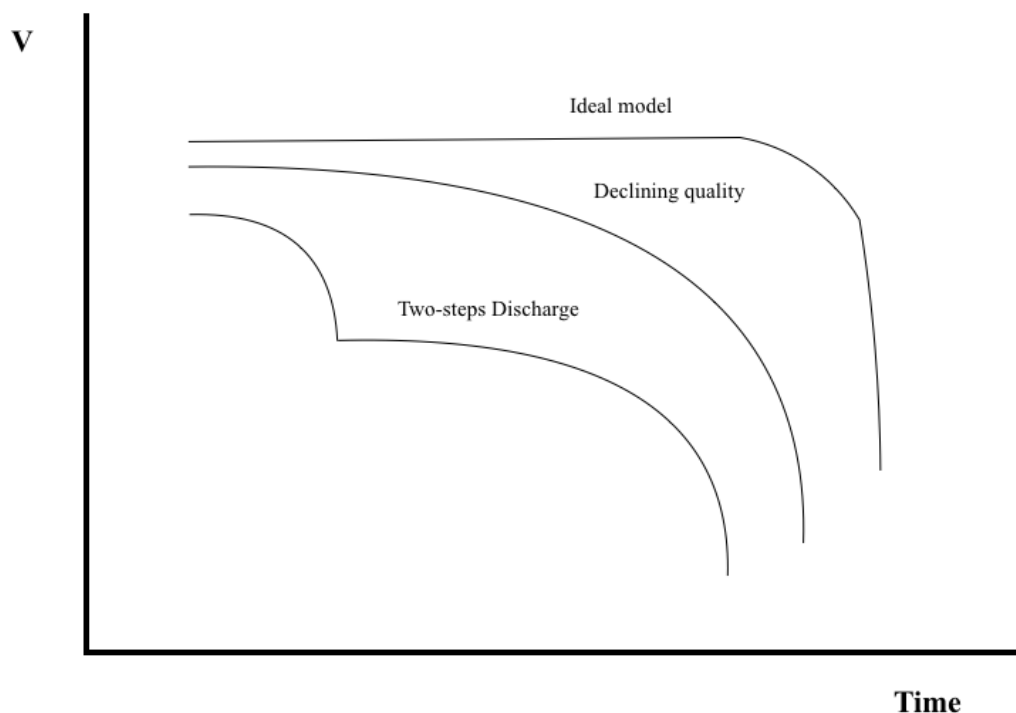
U_C [V]... napětí katody

U_A [V]... napětí anody [23]

Často mívají články i své limitní napětí, které by se v průběhu nabíjení, vybíjení a i během celkového provozu nemělo překročit. Například u většiny lithiových článků s jmenovitou hodnotou napětí 3,7 V se udává horní hranice 4,2 V a spodní hranice, pod kterou by napětí nemělo klesnout se udává 3,2 V [24].

Měření napětí má dobrou vypovídající schopnost o stavu článku nebo baterie. Při měření je baterie připojena k zátěži, kdy je odebrán konstantní proud po stanovenou dobu.

Z naměřených dat se dá určit stav článku. Napětí článku se v průběhu vybíjení mění a může mít několik podob, jak lze vidět na Obr. 5.



Obr. 5: Modely průběhu napětí během vybíjení v závislosti na čase. Převzato z: [23].

Ideální model „*Ideal model*“, kde se vybíjecí křivky v průběhu napětí téměř nemění až do chvíle, kdy se kapacita článku vyčerpá [23]. V takovém případě klesne napětí článku na svou limitní hodnotu. V praxi se lze spíše setkat s modelem „*Declining quality*“, kdy článek vykazuje průběžný úbytek napětí v čase nebo s modelem podobný „*Two-steps Discharge*“, kde článek v průběhu vybíjení může několikrát skokově změnit své napětí [23].

7 Analýza trhu s články

Na současném trhu s články se vyskytuje nepřehledné množství primárních článků a akumulátorů různých velikostí a technologií. V dalších podkapitolách je vytvořen stručný souhrn používaných článků v současnosti.

7.1 Druhy primárních článků

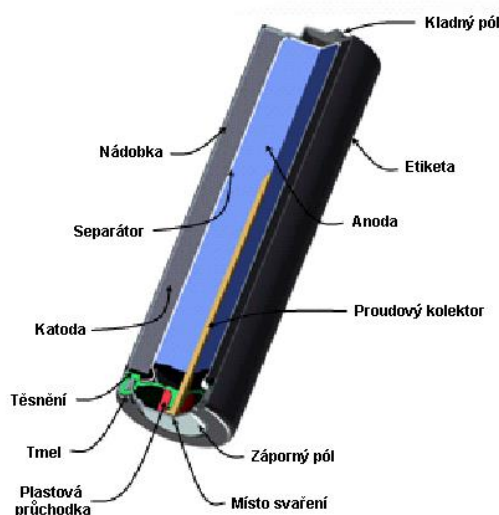
Může se zdát, že primární články do budoucna nemají význam, ale existují aplikace, kde primární články jsou potřeba, a dokonce jsou v takových aplikacích nenahraditelné. Může se jednat o použití, kde nabíjení je nemožné či nepraktické. Konkrétními aplikacemi může být v medicíně, armádních aplikacích či aplikace, které jsou blíže všednímu životu jako detektory či ovladače.

Primární články mají velké výhody jako, možnost dlouhodobého skladování, možnost okamžitého použití nebo šetrnost k životnímu prostředí [25]. Samozřejmě, že na druhé straně jsou nevýhody primárních článků, které mohou také stát za zmínku. Jednou z nevýhod některých primárních článků je poměrně vysoký vnitřní odpor, který s vybíjením stále roste [25]. Další a hlavní nevýhodou je, že se jedná o nenabíjitelné články, což znamená že po jejich vybití jsou určeny k likvidaci.

Celkově lze primární články rozdělit podle velikostí. Na trhu jsou velikosti D, C, AA, AAA a 9V články. Dále lze členit specifické články podle technologie jako jsou alkalické nebo zinko-uhlíkové, dále podle nominálního napětí nebo podle kapacity.

7.1.1 Alkalický článek

Alkalický článek ($\text{MnO}_2\text{-Zn}$) je založen na reakci oxidu manganičitého a zinku za použití alkalického elektrolytu. Tento typ článku se používá spíše pro méně náročné aplikace a jeho jmenovité napětí je 1,5 V. Alkalické články nabízejí kvalitní hustotu energie. Na trhu se vyskytuje několik velikostí alkalických článků od AAA až po 9 V články. Článek je tvořen ocelovou nádobou s vrstvou niklu. Vně nádoby se nachází katoda z oxidu manganičitého (MnO_2) dále je zde separátorem, který odděluje katodu a anodu tvořenou zinkem [26]. Elektrolyt pak může být hydroxid draselný nebo hydroxid sodný [27]. Alkalické články jsou ekologické, protože neobsahují žádné životu nebezpečné látky jako jsou těžké kovy např. rtuť či olovo a nepředstavují tak nebezpečí ani při recyklaci.



Obr. 6: Konstrukce alkalického článku. Převzato z: [26].

7.1.2 Zinko-uhlíkový článek

Jedná se o jeden z nejstarších typů článků. Článek tvoří zinková katoda, která současně slouží i jako vnější vrstva článku. Anoda je tvořena oxidem manganitým společně s práškovým uhlíkem. Jako elektrolyt je v zinko-uhlíkovém článku chlorid amonný někdy označován i jako salmiak. Během vybíjení článku se zahájí oxidace a uvolňují se elektrony. Jeden zinko-uhlíkový článek poskytuje napětí o hodnotě 1,5 V.

Existují také zinko-chloridové články, které jsou podobné jako zinko-uhlíkové jen místo chloridu amonného jako elektrolytu je použita pasta chloridu zinečnatého (ZnCl_2) [28]. Článek je tak schopen poskytovat větší proud a napětí a také delší životnost [28].



Obr. 7: Konstrukce zinko-uhlíkového článku. Převzato z: [29].

7.1.3 Lithiové články

Největší podíl lithia se spotřebuje na lithiové akumulátory. Celkově se ale jedná o velmi vhodný kov i pro primární články.

Li-MnO₂

Tento článek se skládá z lithiové anody a katody oxidu manganičitého (MnO₂). Jako elektrolyt se zde používá chloristan lithný rozpuštěný v organickém rozpouštědle. Článek poskytuje větší kapacitu než zinko-uhlíkové články a napětí článku se pohybuje okolo 3 V. Výhodou Li-MnO₂ článku je malé samovybíjení, které je přibližně 3 % za rok [30].

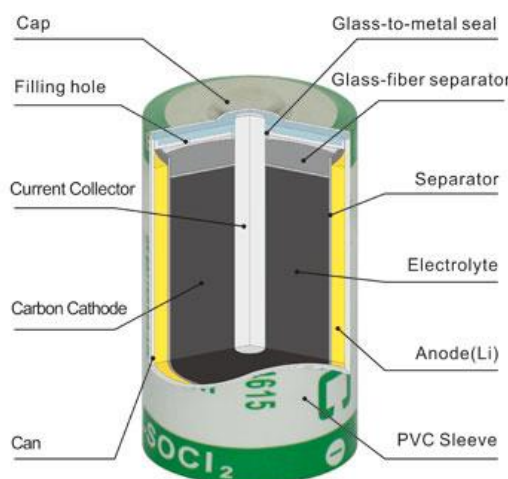
Li-FeS₂

Jedná se o článek s velmi malým samovybíjením. Skladovat lze až 15 let [30]. Má lepší výkon, kapacitu, je lehčí a vykazuje nižší vnitřní odpor než klasické alkalické baterie. Některé Li-FeS₂ články dobře fungují i při extrémních teplotách a to od -40 °C až do 60 °C, což je velká výhoda a lze je tak použít i pro náročnější aplikace [31]. Baterie je složena z lithiové anody a z disulfid-železité katody. Jako elektrolyt je použita lithiová sůl společně s organickým rozpouštědlem.

Obr. 8: Konstrukce FeS₂-Li článku. Převzato z: [31].

Li-SOCl₂

Tento článek je velice odolný. Odolává velkému mechanickému namáhání a pracovní teplotu má od -65 °C do 200 °C [32], [33]. Napětí článku se pohybuje okolo 3 - 3,6 V. Článek lze dlouho skladovat, protože po určité době se mezi anodou a katodou vytvoří pasivační vrstva, která brání samovybíjení [32]. Tato vrstva se po připojení zátěže rozpustí. Článek se skládá z lithiové anody a kapalné katody obsahující póry uhlíku naplněné thionilem chloridu (SOCl₂) [33]. Článek také dominuje velkou energetickou hustotou 650 Wh/kg [33]. Skvělé vlastnosti článku a kvalitní bezpečnost umožňují použití v lékařském vybavení, GPS, radiokomunikaci a dalších náročných aplikacích.

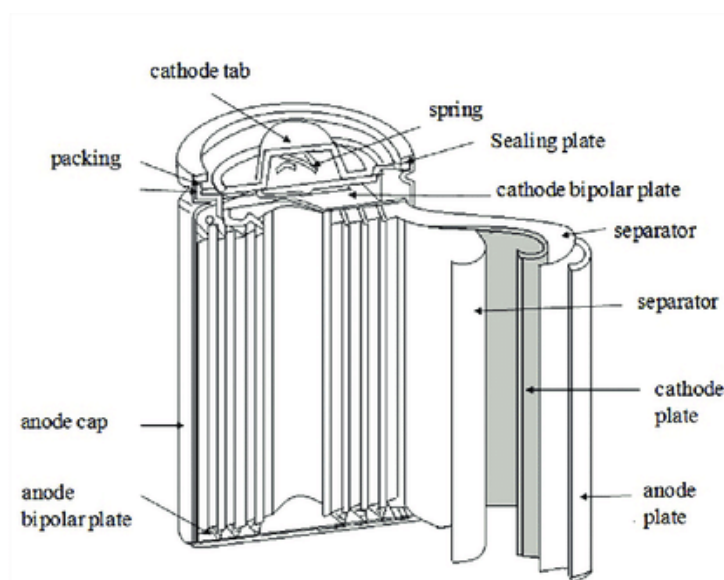
Obr. 9: Konstrukce Li-SOCl₂. Převzato z: [34].

7.2 Druhy sekundárních článků

V následujících podkapitolách jsou vybrány nejpoužívanější sekundární články.

7.2.1 Lithium-iontové

Současně asi nejznámější a nejpoužívanějším nabíjecím článkem je lithium-iontový. Pro elektrody se může použít mnoho kombinací závisících na budoucí aplikaci. Například pro menší aplikace jako jsou notebooky či mobilní telefony se používá kombinace oxidu lithného a kobaltu jako katoda a grafitu jako anoda [35]. Pro náročnější aplikace jako jsou elektromobily se používá pro katodový materiál LiMn_2O_4 (Lithium mangan oxid) nebo fosforečnan lithno-železitý [35]. Jako elektrolyt jsou používány organické sloučeniny jako ether.



Obr. 10: Struktura Lithium-iontového článku. Převzato z: [36].

Lithium-iontové články disponují jednou z největších hustot energie ze všech ostatních dobíjecích článků. Mají malé samovybíjení maximálně 2% za měsíc [35]. Dále nejsou toxické, což je dobré pro jejich recyklaci. V protikladu kladných stránek lithium-iontových článků leží bezpečnost článku. Lithium-iontové články mají tendenci se přehřívat a při větším napětí se i poškozovat. To může vést až ke vznícení článku [35].

7.2.2 Li-Pol

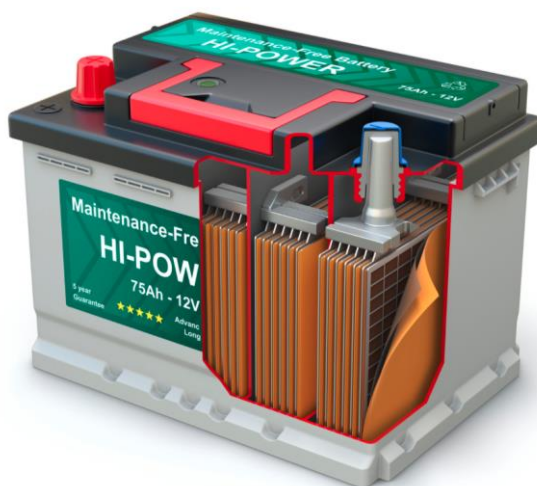
Lithium-polymerový článek je vývojově novější technologií než lithium-iontová technologie. Hlavní rozdíl je použití pevných konkrétně suchých či porézních chemikálií nebo gelových elektrolytů místo kapalných jako je tomu u lithium-iontových článků [37]. Použitý elektrolyt může být například PMMA (polymethylmethakrylát). Článek se skládá z uhlíkové anody a katody vyrobené z určité kovové soli [38].

Články poskytují robustnější konstrukci a úsporu místa což se hodí pro některé aplikace. Taký se jedná o bezpečnější článek, než je klasický lithium-iontový. Na druhou stranu

poskytují méně energie než stejně veliké lithium-iontové a výrobní náklady jsou také značně vyšší.

7.2.3 Olověné gelové akumulátory

Gelový olověný akumulátor se mírně liší od ostatních článků, a to hlavně svým externím vzhledem článku. Skládá se z anody z oxidu olovičitého a katody z houbovitého/pórovitého olova [39]. V případě gelových olověných akumulátoru se jedná o bezúdržbové zdroje s označením VRLA (Valve Regulated Lead Acid) [40]. Akumulátor také zaručuje lepší odvod tepla než jiné olověné akumulátory, a proto má lepší výdrž. Gelové akumulátory disponují dobrou bezpečností, odolávají vyšším teplotám a mají velký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů.



Obr. 11: Konstrukce olověného gelového akumulátoru. Převzato z: [41].

7.2.4 LiFePO_4

Lithium-železo fosfátové články disponují delší životností, nižší hmotností a poskytují vyšší kapacitu oproti olověným akumulátorům [42]. Článek je bezpečný a nepřehřívá se. Riziko exploze je minimální, a proto jsou nejbezpečnějším typem lithiových článků. Lithium-iontové články sice zprvu poskytují větší hustotu energie, ale časem se články LiFePO_4 energeticky nejen vyrovnají, ale i lithium-iontové překonají [42]. Složení článku je velmi podobné jako u lithium-iontových s rozdílem katodového materiálu, který je právě lithium-železo-fosfát. Díky použitých materiálů je výroba článku levnější lépe se recyklují a jsou tedy i ekologičtější než lithium-iontové články. Oblasti použití LiFePO_4 akumulátorů je vhodné pro elektromobilitu a dnes je technologie hojně využíván i v úložištích pro alternativní zdroje energie.

8 Využití akumulátorů

Využití akumulátorů s důrazem na redukci produkce CO₂, respektive omezení fosilních paliv narůstá. Způsobů, jak alespoň částečně nahradit fosilní paliva je hned několik. Jedním z nich jsou obnovitelné zdroje energie. Problémem při výrobě energie ze slunce, větru a vody je však ukládání vyrobené energie. Většina produkce elektrické energie z obnovitelných zdrojů není spotřebováno ihned a pro pozdější potřebu musí být nějakým způsobem ukládána. Možností se naskytuje hned několik, ale jen některé jsou vhodné pro dané aplikace. Nejefektivněji jak ukládat energii z obnovitelných zdrojů jsou přečerpávací elektrárny, které jsou stále nejrozšířenější technologií [43]. Bohužel takový způsob ukládání není možný všude a v úvahu se začínají brát jiné technologie založené zejména na akumulátorech.

8.1 Úložiště energie

Dříve byly velkokapacitní úložiště součástí pouze u zařízeních, kde bylo nutné dodávat energii ze záložních zdrojů v případě výpadku distribuční sítě. Takovým zařízením jsou nemocnice či železniční řízení dopravy. V současné době se začíná rozmáhat trend společně s obnovitelnými zdroji pro velkokapacitní úložiště.

Velkokapacitní úložiště v kooperaci s obnovitelnými zdroji slouží především k vyrovnávání přebytků a nedostatku energie v distribuční síti. Technologie může také pomáhat v oblastech, kde jsou časté výpadky sítě jako například největší velkokapacitní úložiště s lithium- iontovými bateriemi v Austrálii s kapacitou 150 MW [44]. Pro představu, jak takové úložiště může vypadat ukazuje následující Obr. 12.



Obr. 12: Velkokapacitní úložiště v Jižní Austrálii. Převzato z: [45].

Energii lze samozřejmě ukládat i jinými způsoby než jen do akumulátorů a baterií. Můžou to být přečerpávací stanice, jak je zmíněno již v textu výše, ale i jiné perspektivní technologie jako je ukládání do vodíku, stlačování vzduchu pod hladinou moře nebo úložiště na gravitačním principu [46]. Zajímavým projektem na gravitačním principu je systém ARES (Advanced Rail Energy Storage). Jedná se o železniční systém fungující na přeměně kinetické energie na elektrickou. Železniční systém využívá elektromotor k překonání gravitace pro akumulaci energie a generátor pro zpětnou výrobu energie, kdy na cestě zpět využívá výškového rozdílu k výrobě energie [47]. Systém dosahuje účinnosti až 80 % a to je například v porovnání porovnáním s přečerpávací přehradou, která má účinnost 75 % velmi dobré [47].

8.2 Doprava

Tlak na snižování emisí tlačí také na automobilový průmysl a tím pádem elektromobilita začíná nabírat na rozmachu. Pro dopravu jsou již akumulátory důležitým komponentem. Využívaly se i u spalovacích motorů, ale v současnosti se využívají již jako hlavní zdroj energie u elektromobilů. V dnešní době většina výrobců automobilů poskytuje i elektromobily. Takové elektromobily používají většinou lithium-iontové baterie. Lithium-iontové baterie jsou poměrně lehké, mají dlouhý životní cyklus a kvalitní energetickou hustotu. Elektromobily jsou stále poměrně novou technologií, a proto se majitelé elektrických vozů musí vypořádat s několika nedostatky oproti automobilům se spalovacím motorem. Jednou z nich je doba nabíjení, která je okolo 8 hodin [48]. Taková nevýhoda se projeví spíše u cestování na dlouhé vzdálenosti, a při správném naplánování,

kdy se nepřekročí dojezdová vzdálenost, která se dnes pohybuje i okolo 600 kilometrů se zmíněná nevýhoda ani nemusí projevit [48]. V roce 2020 se registrovalo více než 3 000 000 elektrických vozů, kde 1,4 milionů bylo registrováno v Evropě [49]. Stále se jedná o poměrně novou technologii, avšak již dnes nabízí mnohé zajímavé možnosti jako například dobíjení přes vlastní fotovoltaickou elektrárnu. Rozmach elektromobility bude souběžně dopadat i na vývoj nových technologií v oblasti baterií.

8.3 Osobní elektronika

Požadavky na akumulátory použité v osobní elektronice jsou kladeny speciální nároky. V mnohých případech se výrobci snaží zdroj energie minimalizovat, aby zdroj nezabíral mnoho místa, které mohou využít jiné funkční komponenty zařízení. Dalšími požadavky jsou bezpečnost, hmotnost a maximální kapacita akumulátoru. Vhodným kandidátem pro takové použití jsou Li-Pol akumulátory nebo lithium-iontové akumulátory.

9 Recyklace akumulátorů

Stále větší počet technologií vyžaduje mobilní zdroj elektrické energie. Baterie jsou vhodným kandidátem, avšak do budoucna vzhledem k hojnému použití bude nutné takové baterie, které již nespĺňují požadavky na účinnost recyklovat. Problémem je, že mnohé články využívají látky či materiály, které mohou škodit životnímu prostředí. Mnoho výrobců je již nuceno legislativou na takové věci myslet a vedle výroby a vývoje nových článků také vytvářet plán jak články recyklovat [23]. Způsob, jak k recyklaci přistupovat hraje i správné rozdělení článků. Články lze rozdělit z pohledu recyklace do dvou skupin. Na nebezpečný odpad, který obsahuje škodlivé látky a na bezpečný odpad, který by v případě nehody při skladování před samotnou recyklací neměl způsobit škody [23]. Mezi bezpečný odpad spadají například alkalické nebo zinko-uhlíkové články [23]. Olověné akumulátory nebo nikl-kadmiové akumulátory spadají pod skupinu nebezpečného odpadu [23]. Jelikož s bezpečným odpadem je možné zacházet jako s všedním odpadem z domácností, články spadající do této kategorie nemusí být nikterak separovány a v některých státech je možné tyto články vyhazovat do komunálního odpadu [50]. Následně se musí články z komunálního odpadu separovat, aby bylo možné je následně recyklovat.

V současnosti lze vysloužilé články recyklovat pyrometalurgickou metodou nebo metodou hydrometalurgickou, která je zatím spíše testována [51]. Důležitým aspektem je výstupní kvalita, respektive čistota materiálů tak, aby materiály mohly být použity znovu pro výrobu. Hydrometalurgickou metodou lze zpět získat v případě lithium-iontových baterií 90 % lithia [51]. Recyklaci brání současná ekonomická náročnost procesů a také nedostatečná motivace baterie recyklovat z důvodů poměrně malého počtu vysloužilých zařízení.

Vedle recyklace připadá v úvahu tzv. „second live“. V případě elektromobilů jsou články považovány za vysloužilé, pokud kapacita klesne na 75 % původního stavu [51], [52]. Takové baterie by mohly být využity například ve velkokapacitních úložištích.

10 Vlastní měření

Následující část se věnuje vlastnímu měření článků v klimatických komorách. Celkem bylo měřeno osm různých akumulátorů. Dva olovené gelové akumulátory, tři akumulátory velikosti D s technologií nikl-metal-hydrid a nikl-kadmium a jako poslední tři lithium-iontové akumulátory velikosti 18650. Měřeno bylo napětí na článcích připojených na statickou proudovou zátěž. Nejprve se měřilo za standartních pokojových podmínek a následně za podmínek změněných. Parametry měření byly voleny tak, aby se výsledné hodnoty daly porovnat s hodnotami deklarované výrobcem, což je hlavní důvod měření a současně, aby co nejvíce odpovídaly normám pro testování v klimatických komorám. Celé měření probíhalo na RICE v laboratoři s klimatickými komorami a v laboratořích budovy Fakulty elektrotechnické (FEL) na katedře materiálů a technologií (KET) Západočeské univerzity (ZČU).

10.1 Postup měření

Před samotným měřením bylo potřeba připravit kabely. Pro měření byly vybrány měděné kabely se složeným jádrem s co největším průměrem konkrétně 7 mm a to z důvodu snížení odporu s rostoucím průřezem vodiče jak je vidět v následujícím vzorečku (4).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (\Omega) \quad (4)$$

Kde:

R (Ω)... odpor vodiče

ρ ($\Omega \cdot m$)... měrný elektrický odpor vodiče

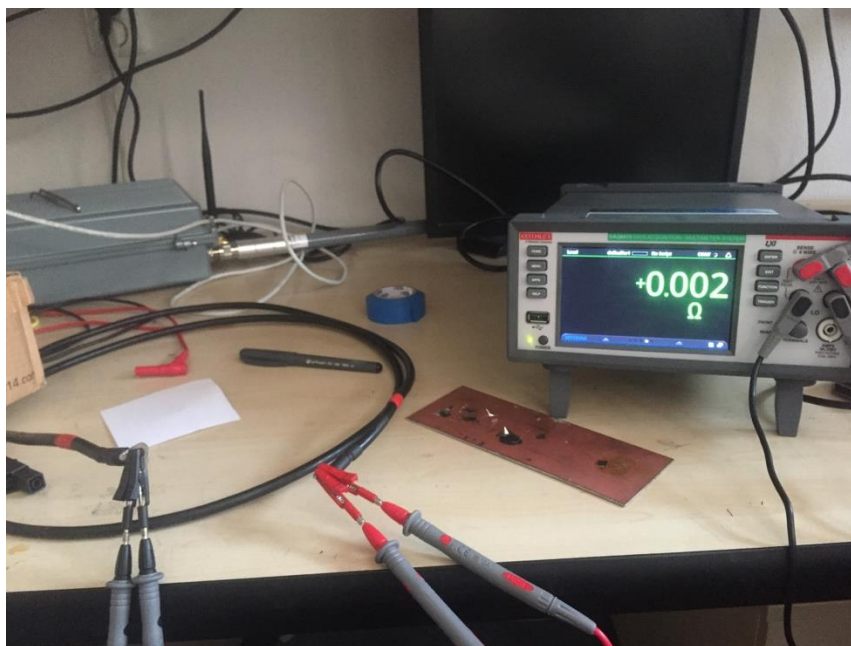
l (m) ... délka vodiče

S (m^2)... obsah průřezu vodiče

Pro první měření byly použity kabely o průřezu $1,5 \text{ mm}^2$, které však byly nevyhovující z důvodu velkého odporu, který do měření zanášel chybu zvláště u článků s napětím $1,2 \text{ V}$. Jak lze vidět u vzorce (3), délka vodiče je přímo úměrná odporu, zatímco průřez respektive plocha průřezu je nepřímo úměrný. Cílem tedy byl co největší průřez kabelu s co nejkratší délkou. Porovnání odporů použitých vodičů z mědi s obsahem průřezu $1,5 \text{ mm}^2$ a 16 mm^2 je vidět v následujícím výpočtu (4) a (5) za použití vzorce (3).

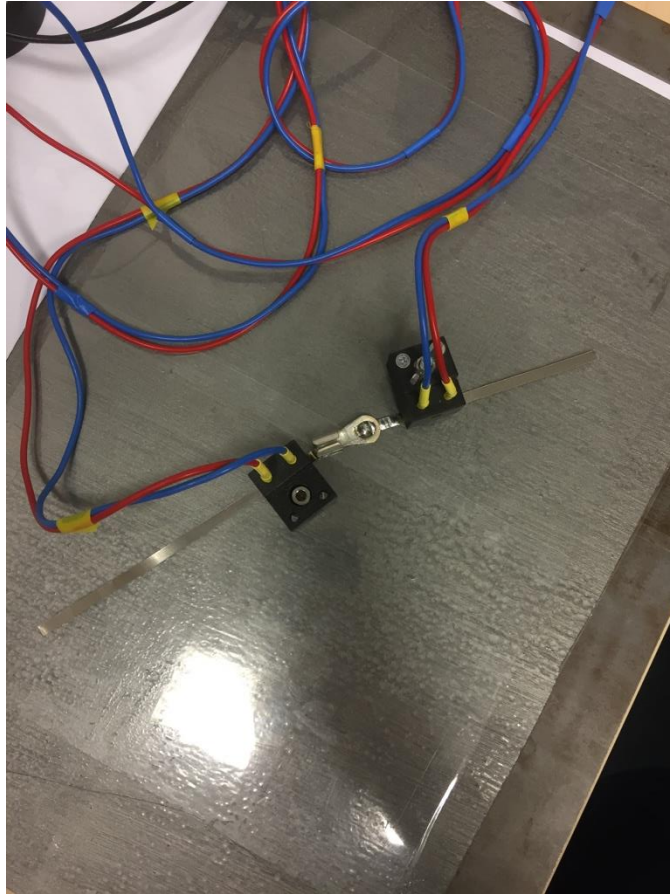
$$R_{1,5} = 0,0178 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 0,0237 \quad \Omega \quad (5)$$

$$R_{16} = 0,0178 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2}{1,6 \cdot 10^{-5}} = 0,0022 \quad \Omega \quad (6)$$



Obr. 13: Ověření teoretických předpokladů odporu vodiče multimetrem KEITHLEY DAQ6510 čtyřvodičovou metodou.

Dále bylo potřeba upravit jak samotné kabely, tak i akumulátory. Kabely byly osazeny zaletovanými oky cínem, které byly vždy před měřením napájeny přímo na páskové vývody článků. Pro uchycení by bylo možné použít i krokové svorky, avšak z důvodu snížení přechodového odporu se ukázalo pevné napájení jako lepší řešení z hlediska následné přesnosti měření. Celý kabel a jednotlivé spoje byly změřeny na multimetru KEITHLEY DAQ6510 čtyřbodovou metodou, jak je vidět na obrázcích Obr. 13 a Obr. 14.



Obr. 14: Příklad měření odporu čtyřbodovou metodou vhodného kontaktu pro měření pomocí multimetru KEITHLEY DAQ6510.

Dále bylo nutné vyřešit uchycení kabelů na póly akumulátorů. U prvních měření byly použity držáky vytvořené v programu Fusion 360 a vytištěné na 3D tiskárně se šroubovými a pružinovými vývody. Vzhledem ke snaze snížit přechodový odpor se využilo odporové svařování a na akumulátory byly bodovou metodou odporově navařeny vývodové ploché poniklované vodiče, které se napájely na oka kabelů.



Obr. 15: Kontaktování vývodových plíšků na akumulátory pomocí odporového svařování.

Výsledné akumulátory s kabely měly menší odpor díky použití letovaných spojů a většímu průřezu přívodních kabelu, než byly použity při prvních pokusech s krokovými svorkami a kabelem o ploše průřezu $1,5 \text{ mm}^2$. Tvrzení si lze také ověřit úbytkem napětí na kabelu o ploše průřezu $1,5 \text{ mm}^2$ a 16 mm^2 , které jsou vidět v následujících výpočtech (8) a (9).

$$U_V = R \cdot I \quad (7)$$

Kde:

U_V (V)... úbytek napětí na vodiči

R (Ω)... odpor vodiče

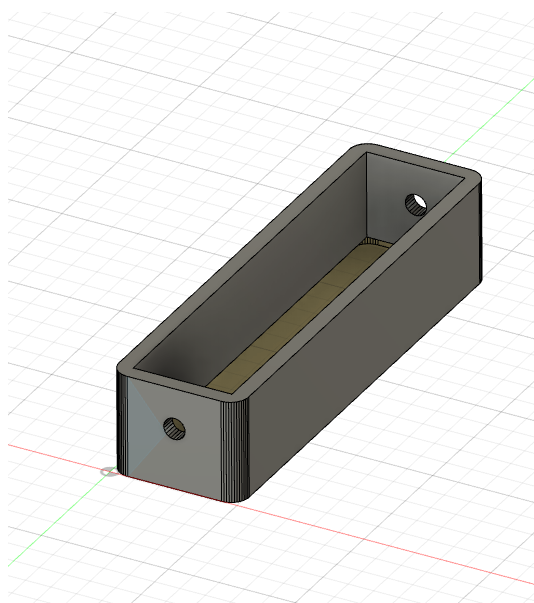
I (A)... proud procházejícím vodičem

$$U_{1,5} = 0,0237 \cdot 2,2 = 0,052 \text{ V} \quad (8)$$

$$U_{16} = 0,0022 \cdot 2,2 = 0,0048 \text{ V} \quad (9)$$

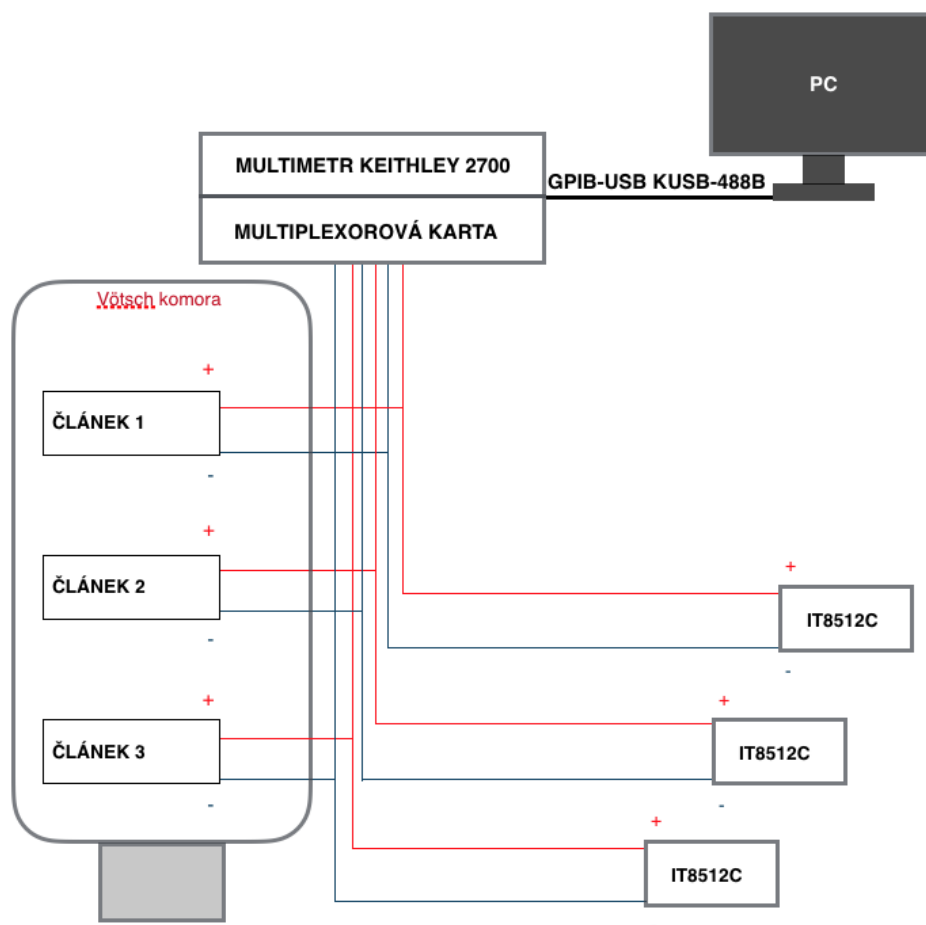
Při použití silnějšího vodiče o ploše průřezu 16 mm^2 se úbytek napětí v porovnání s kabelem s plochou průřezu $1,5 \text{ mm}^2$ a zatěžovacím proudem $2,2 \text{ A}$, který u mnohých akumulátorů je provozní proud zmenší více jak desetkrát.

Dalším komponentem tentokrát zaručující stabilitu článku byly držáky akumulátorů. Jelikož olověné akumulátory byly vybaveny konektory FASTON pro kladný i záporný pól stačilo kabeláž proudových zátěží a multimetru přichytit k pólům akumulátorů. Oproti tomu články velikosti D a 18650 mají ploché vývody, a proto musely být vyhotoveny držáky, které zajišťovaly pevné uchycení kabeláže k vývodům akumulátorů. Držáky byly vytvořeny v programu Autodesk Fusion 360 následně připraveny pro tisk v programu Ultimaker Cura a vytištěny na 3D tiskárně. Ukázka modelu je na následujícím obrázku Obr. 16.



Obr. 16: Model držáku akumulátoru 18650.

Po vyhotovení všech potřebných komponent a dobití akumulátorů těsně před zahájením testů bylo možné zahájit zkoušky v klimatických komorách. Nabití akumulátorů těsně před měřením bylo důležité z důvodu možné ztráty kapacity vlivem skladování akumulátorů před měřením. Akumulátory byly připojeny k zátěžím a současně v paralelním zapojení i k multimetru přes multiplexorovou kartu, která umožňuje přepínání měřicího vstupu multimetru na vícero článků najednou. Multimetr byl spojen s laptopem, který byl vybaven programem KICKSTAR sloužící pro záznam naměřených hodnot a nastavení záznamu. Celé zapojení popisuje následující schéma na obrázku Obr. 17.



Obr. 17: Přibližné schéma zapojení obvodu pro měření článku v klimatické komoře.

Pro měření bylo potřeba několik zařízení. Klimatická komora Vötsch VCV³ 7060-5 umožňující vytvořit jak konstantní kladnou, tak i zápornou teplotu s definovanou vlhkostí, multimetr KEITHLEY 2700 pro měření průběhu napětí, stejnosměrná zátěž ITECH IT8512C pro zatížení článku konstantním proudem, kabeláž pro propojení článků se zátěžemi a multimetrem, multiplikační karta pro měření napětí na vícero článcích najednou a laptop s programem KICKSTAR pro kolekci dat.



Obr. 18: Kompletní použitá zařízení sloužící k měření akumulátorů v laboratořích RICE.



Obr. 19: Kompletní použitá zařízení sloužící k měření akumulátorů v laboratořích na katedře materiálů a technologií.

Před samotným měřením bylo nutné zvolit vhodné teploty v průběhu měření. Vybrané hodnoty teplot musely být zvoleny tak, aby co nejvíce odpovídaly testům měření provedené výrobcem uváděné v datových listech, ale také aby odpovídaly normám ČSN EN: 60068-2-1: Zkoušení vlivů prostředí-chlad a ČSN EN: 60068-2-2: Zkoušení vlivů prostředí – suché teplo. Bohužel ve většině datových listech výrobci neuváděli teploty přesně odpovídající normám výše uvedených a bylo nutné volit kompromis mezi teplotami norem a teplotami uvedených v datových listech.



Obr. 20: Ukázka zapojení akumulátorů během testu.

Dále bylo potřeba zajistit 100% nabití všech článků. Nabíjení muselo být provedeno těsně před samotným měřením, aby se neprojevil vliv samovybíjení. Po nabití bylo změřeno pro kontrolu napětí na prázdko pro ověření, zda hodnota odpovídá parametrům. U olověných akumulátorů vzhledem k jejich objemnějšímu charakteru bylo potřeba zajistit aklimatizaci, a to především v záporných teplotách. Mohlo by se totiž stát, že bez aklimatizace článků v chladu a okamžitým spuštěním testu by výsledné hodnoty byly zkreslené v důsledku tepelné kapacity materiálu, a tím pádem by teplota článku neodpovídala teplotě okolí v klimatické komoře. Z tohoto důvodu byly olověné akumulátory před spuštěním měření čtyři hodiny

aklimatizovány v záporné teplotě, ve které byly následně testovány. Dalším nastaveným parametrem mimo teploty byla vlhkost. V případě kladných teplot byla nastavena vlhkost na 40 % RH, což odpovídá normální vlhkosti vyskytující se v obytných prostorech. Při měření v záporných teplotách se vlhkost v klimatické komoře vysráží při ochlazování na požadovanou teplotu a odtokovým kanálkem odteče z komory pryč do nádob. Zbylá vlhkost je pak vymrazena vlivem záporných teplot v komoře a výsledkem je vlhkost v komoře 0 % RH.

10.1.1 Použité přístroje

Jak již bylo zmíněno pro zaručení správnosti měření bylo potřeba několik zařízení jejichž bližší popis se vyskytuje na následujících řádkách.

Klimatická komora



Obr. 21: Klimatická komora Vötsch VCV³ 7060-5.

Aby při testování byly akumulátory vystaveny po celou dobu testu stejných podmínek bylo potřeba použít klimatické komory. Klimatická komora použitá u současného měření byla od společnosti VÖTCH s označením VCV³ 7060-5. Zařízení umožňuje nastavení teplot od -75 °C až do 180 °C což pro testování akumulátorů dostačovalo [53]. Nastavená teplota v průběhu měření se vychylovala přibližně jen o $\pm 0,1$ °C až $\pm 0,5$ °C [53]. Dále komora

umožňovala nastavení vlhkosti. Výchylka vlhkosti podle datového listu je $\pm 1 \%$ až $\pm 3 \%$ [53].

Multimetr KEITHLEY 2700



Obr. 22: Použitý multimetr při měření KEITHLEY 2700.

Pro měření článků v klimatických komorách bylo důležité připojení muxovací karty pro měření vícero vstupů najednou v průběhu času, což výše vyobrazený multimetr splňoval. Multimetr byl schopný měřit s přesností 6,5 digitu, což zdaleka dostačovalo pro měření článků. Dále bylo důležité, že multimetr byl schopen komunikace s PC pro ukládání dat přes GPIB – USB.

Programovatelná elektronická zátěž

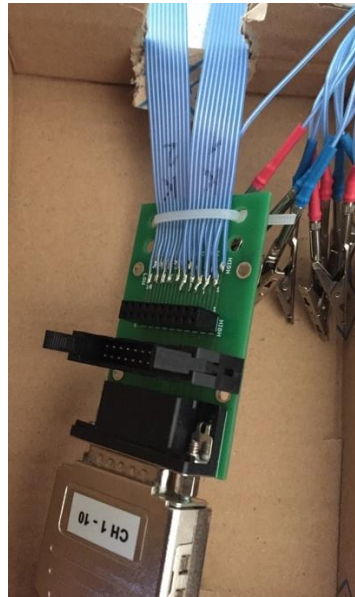


Obr. 23 Programovatelná elektronická zátěž ITECH 8512C.

Pro zaručení konstantní proudové zátěže článků byla použita programovatelná elektronická zátěž od výrobce ITECH. Zátěž je opatřena přímo programem pro testování napětí a je možné tak nastavit vypnutí zátěže při dosažení určitého napětí tzv. „cutoff voltage“ a samozřejmě zatěžovací proud. Vypnutí zátěže při dosažení spodního napětí velmi pomohlo při měření článků bez ochranného obvodu. Pokud článek není vybaven ochranným obvodem, při testu by se musel hlídat stav napětí a vypínat zátěž manuálně, protože při překročení referenčního minimálního napětí by článek byl nadměrně zatížen a docházelo by k nadměrnému opotřebení článku. V datovém listu lze dohledat potřebné informace k dopočítání maximální výchylky proudu při nastavení zatěžujícího proudu [54]. Výpočet je uveden níže.

$$0,05 \% \cdot 0,001 \text{ A} + 0,05 \% \cdot 6 \text{ A} = 3 \text{ mA} \quad (10)$$

Taková odchylka zatěžujícího proudu měření prakticky neovlivňuje, protože většinou bylo voleno proudové zatížení přibližně od 0,5 A až 2,5 A.

Výstup multiplexorové karty

Obr. 24: Výstup multiplexorové karty.

Jelikož se muselo měřit více hodnot napětí najednou pomocí jednoho multimetru bylo nutné použít multiplikační kartu. Karta byla propojena s multimetrem KEITHLEY 2700, kde probíhalo měření na třech kanálech se vzorkováním každých 60 sekund.

Sběrnice GPIB-USB KUSB-488B

Obr. 25: Převodník GPIB-USB KUSB-488B.

Převodník mezi sběrnicí GPIB a USB od výrobce KEITHLEY GPIB-USB KUSB-488B umožňovala plnou kompatibilitu s použitým multimetrem a propojeným laptopem. Měření tak mohlo být kontrolováno a hodnoty se zaznamenávají do paměti v laptopu v podobě .csv souborů.

10.2 Výsledky měření

V následující kapitole jsou blíže popsány vybrané akumulátory společně s výsledky a grafy s naměřenými hodnotami. Dále jsou naměřené výsledky shrnuty a porovnány s deklarovanými hodnotami výrobců. Vyhodnocení probíhalo na základě naměřených dat za pomoci výše popsané měřicí aparatury. Z každého průběhu vybíjení se vzal čas, kdy akumulátory docílily napětí charakterizující vybitý stav akumulátoru, respektive vypnutí elektronické programovatelné proudové zátěže ztěžující akumulátor. Z těchto hodnot a parametrů zkoušky byla následně dopočítána kapacita akumulátorů a porovnána s deklarovanými hodnotami. Pro výsledné zhodnocení bylo stanoveno kritérium 5 % maximální výchylky u standartních podmínek, kdy vypočtená kapacita by neměla tuto mez překročit.

10.2.1 Výsledky měření olověného akumulátoru LONG 12V

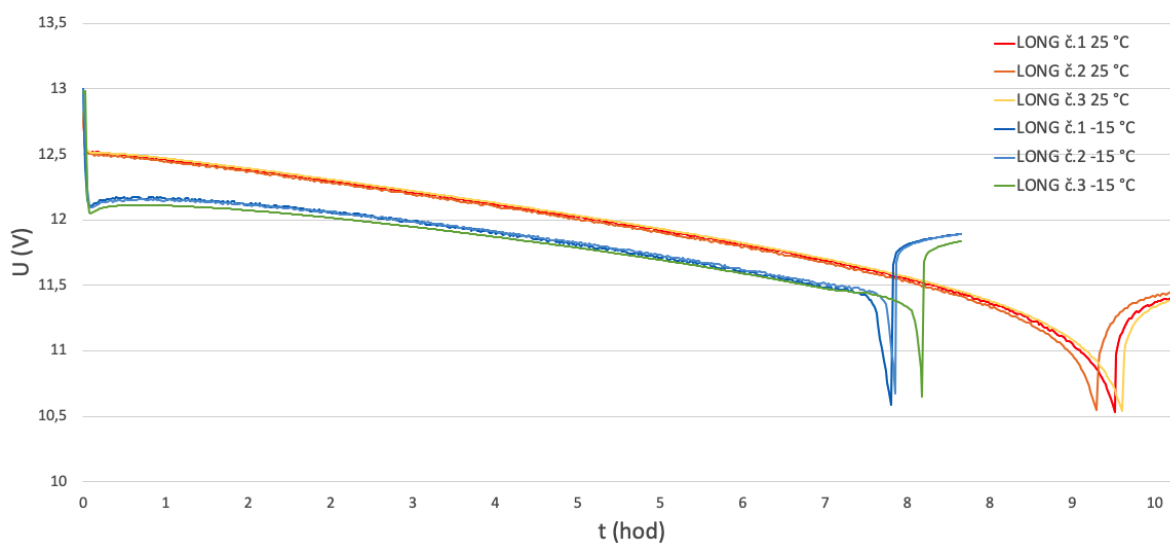
Na Obr. 27. je vyobrazen měřený akumulátor, dostupné parametry jsou v Tab 2.



Obr. 26 Olověný akumulátor Long WP7,2-12. Převzato z: [55].

Tab. 2: Parametry olověného akumulátoru Long WP7.2 -12 a parametry zkoušky.
Převzato z: [56].

Výrobce	Long
Typ	Olověný akumulátor
Katalogová kapacita (25 °C)	6,84 Ah ¹
Jmenovité napětí (V)	12
Hmotnost (g)	2400
Velikost (mm)	Délka = 151; Šířka = 65; Výška = 94
Zátěžový proud při měření (A)	0,684
Napětí při maximálním nabití (V)	12,8
Napětí pro vypnutí zátěže (V)	10,5



Obr. 27: Graf průběhu napětí při teplotě 25 °C a -15 °C olověného akumulátoru Long WP7,2-12.

¹ Deklarovaná kapacita pro proudovou zátěž 0,684 Ah z datového listu.

Tab. 3: Výsledky zkoušky olověného akumulátoru Long WP7,2-12 při 25°C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
LONG č.1	9,4 (9 hod. 24 min.)	6,43
LONG č.2	9,23 (9 hod.14 min.)	6,31
LONG č.3	9,46 (9 hod. 28 min.)	6,47
Průměr	9,36 (9 hod. 22 min.)	6,4

Tab. 4: Výsledky zkoušky olověného akumulátoru Long WP7,2-12 při – 15 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
LONG č.1	7,36 (7 hod. 22 min.)	5,03
LONG č.2	7,4 (7 hod. 24 min.)	5,06
LONG č.3	7,65 (7 hod. 39 min.)	5,23
Průměr	7,47 (7 hod. 28 min.)	5,1

Příklad výpočtu kapacity

$$C = I_Z \cdot t = 0,684 \cdot 9,4 = 6,43 \text{ Ah} \quad (11)$$

Kde:

C (Ah)... výsledná kapacita

 I_Z (A)... Zátěžový proud

t (hod.)... čas vybíjení (hod.)

Výpočet rozdílu kapacity za standardních podmínek

$$C_{RS} = C_D - C = 6,84 - 6,4 = 0,44 \text{ Ah} = 6,43 \% \quad (12)$$

Kde:

 C_{RS} (Ah)... kapacitní rozdíl za standardních podmínek C_D (Ah)... deklarovaná kapacita**Výpočet rozdílu kapacity za změněných podmínek**

$$C_{RZ} = 4,45 - 5,1 = +0,65 \text{ Ah} = +14,6 \% \quad (13)$$

Kde:

 C_{RZ} (Ah) ... kapacitní rozdíl za změněných podmínek (Ah)

Zhodnocení akumulátoru LONG WP7,2-12

Z naměřených dat a porovnání s deklarovanými hodnotami z datového listu [56] olovené články LONG WP7,2-12 neodpovídají deklarovaným hodnotám. Při zkoušce ve 25 °C a zátěži 0,684 A články dosáhly hodnoty napětí 10,5 V v průměru za 9 hodin a 22 minut, což odpovídá kapacitě 6,4 Ah. Výsledek se tedy liší s hodnotami v datovém listu o 0,44 Ah za normálních podmínek. I když rozdíl kapacit není tak značný byla překročena toleranční hranice 5 % a tím pádem akumulátor LONG WP7,2-12 neodpovídá teoretickým předpokladům za normálních podmínek.

V případě zkoušky za změněných podmínek, respektive při -15 °C akumulátory dosáhly napětí charakterizující vybití článků v průměru za 7 hodin a 28 minut, což odpovídá kapacitě 5,1 Ah. Výsledná kapacita ve změněných podmínkách při -15 °C je dokonce lepší než udává výrobce v datovém listu o 0,65 Ah což je kladný rozdíl 14,6 %.

10.2.2 Výsledky měření oloveného akumulátoru VIPOW 12V

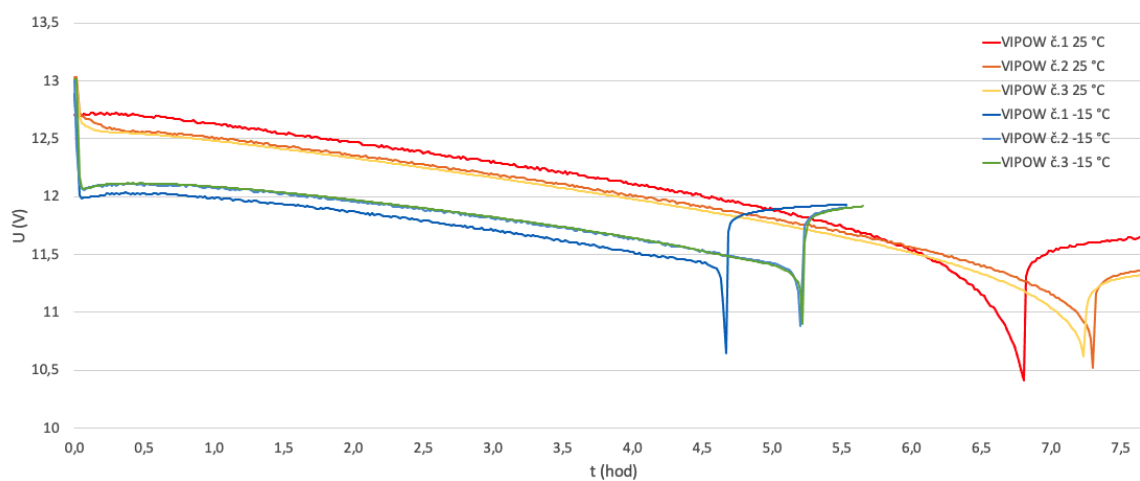
Na Obr. 28 je vyobrazen měřený akumulátor, dostupné parametry jsou v Tab. 5.



Obr. 28: Olovený akumulátor VIPOW 9 Ah. Převzato z: [57].

Tab. 5: Parametry olověného akumulátoru VIPOW a parametry zkoušky. Převzato z: [58].

Výrobce	VIPOW
Typ	Olověný akumulátor
Katalogová kapacita (25 °C)	8,55 Ah ²
Jmenovité napětí (V)	12
Hmotnost (g)	2500
Velikost (mm)	Délka = 15; Šířka = 65; Výška = 94
Zátěžový proud při měření (mA)	855
Napětí při maximálním nabití (V)	12,9
Napětí pro vypnutí zátěže (V)	10,5



Obr. 29: Graf průběhu napětí při teplotě 25 °C olověného akumulátoru VIPOW.

² Kapacita akumulátoru dopočítána z datového listu pro zatěžovací proud 0,855 A.

Tab. 6: Výsledky zkoušky olověného akumulátoru VIPOW při 25°C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
VIPOW č.1	6,82 (6 hod. 49 min.)	5,8
VIPOW č.2	7,31 (7 hod. 19 min.)	6,25
VIPOW č.3	7,25 (7 hod. 15 min.)	6,2
Průměr	7,12 (7 hod. 2 min.)	6,09

Tab. 7: Výsledky zkoušky olověného akumulátoru VIPOW při -15 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
VIPOW č.1	4,68(4 hod. 41 min.)	4
VIPOW č.2	5,21 (5 hod. 13 min.)	4,45
VIPOW č.3	5,22 (5 hod. 13 min.)	4,46
Průměr	5,03 (5 hod. 2 min)	4,3

Příklad výpočtu kapacity

$$C = 6,82 \cdot 0,855 = 5,8 \text{ (Ah)} \quad (14)$$

Výpočet rozdílu kapacity za standartních podmínek

$$C_{RS} = 8,55 - 6,09 = 2,46 \text{ Ah} = 29 \% \quad (15)$$

Výpočet rozdílu kapacity za změněných podmínek

$$C_{RZ} = 5,301 - 4,3 = 1,001 \text{ Ah} = 18,8 \% \quad (16)$$

Zhodnocení akumulátoru VIPOW

Z testu v klimatické komoře za teploty 25 °C se ukázalo, že olověný akumulátor VIPOW neodpovídá předpokladům při proudové zátěži 0,885 A. Výrobce deklaruje při proudové zátěži 0,885 A výdrž přibližně 10 hodin tedy 8,85 Ah [58]. V testu byl průměrný vybíjecí čas 7 hodin a 2 minuty, což odpovídá hodnotě 6,09 Ah. Článek VIPOW tedy neodpovídá předpokladům udávaných výrobcem přibližně o 2,46 Ah respektive o 29 %.

V případě změněných podmínek je tomu obdobně, kde rozdíl mezi deklarovanou hodnotou za změněných podmínek při -15 °C je více jak 18 % tedy akumulátor se kapacitou liší o 1 Ah oproti údajům udávaných v datovém listu.

10.2.3 Výsledky měření akumulátoru GP 1100DH

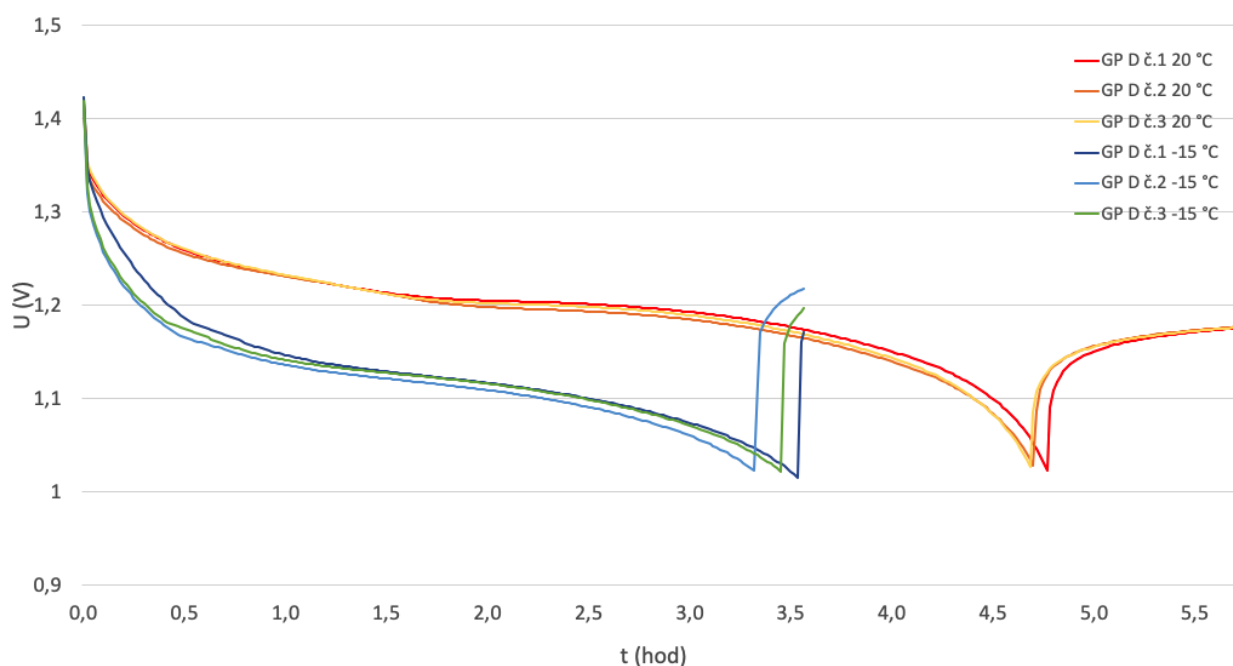
Na Obr. 30 je vyobrazen měřený akumulátor, dostupné parametry jsou v Tab. 8.



Obr. 30: Akumulátor GP 1100DH 11000 mAh. Převzato z: [59].

Tab. 8: Parametry akumulátoru GP 1100DH 11000 mAh. Převzato z: [59].

Výrobce	GP BATTERIES
Typ	NIMH
Katalogová kapacita (20 °C)	11 Ah
Jmenovité napětí (V)	1,2
Hmotnost (g)	179
Velikost (mm)	Šířka = 33; Výška = 63
Zátěžový proud při měření (mA)	2200
Napětí při maximálním nabití (V)	1,5
Napětí pro vypnutí zátěže (V)	1



Obr. 31: Graf průběhu napětí při teplotě 20 °C a -15 °C akumulátoru GP 1100DH.

Tab. 9: Výsledky zkoušky akumulátoru GP 1100DH při 20 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
GP D č.1	4,78 (4 hod. 47 min.)	10,52
GP D č.2	4,72 (4 hod. 43 min)	10,38
GP D č.3	4,7 (4 hod. 42 min.)	10,34
Průměr	4,73 (4hod. 44 min.)	10,41

Tab. 10: Výsledky zkoušky akumulátoru GP 1100DH při -15 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
GP D č. 1	3,55(3 hod. 33 min.)	7,81
GP D č. 2	3,33 (3 hod. 20 min.)	7,33
GP D č. 3	3,47 (3 hod. 28 min.)	7,63
Průměr	3,45 (3hod. 27 min.)	7,6

Příklad výpočtu kapacity

$$C = 4,78 \cdot 2,2 = 10,52 \text{ Ah} \quad (17)$$

Výpočet rozdílu kapacity za standardních podmínek

$$C_{RS} = 11 - 10,41 = 0,59 \text{ Ah} = 5,4 \% \quad (18)$$

Výpočet rozdílu kapacity za změněných podmínek³

$$C_{RZ} = 11 - 7,6 = 3,4 \text{ Ah} = 31 \% \quad (19)$$

Zhodnocení akumulátoru GP 1100DH

Výsledky měření akumulátoru GP 1100DH od výrobce GP BATTERIES nevyšly přesně podle hodnot udávaných v datovém listu. Při teplotě 20 °C a zátěži 2,2 A byl rozdíl oproti deklarované hodnotě o 0,59 Ah tedy pokles kapacity o 5,4 %. Při teplotě -15 °C což spadá do intervalu použití akumulátoru byl pokles dokonce 31 % tedy o 3,4 Ah. Lze tedy usuzovat, že akumulátor neodpovídá jmenovitým hodnotám udávaných výrobcem.

10.2.1 Výsledky měření akumulátoru MEXCELL D-D4000H

Na Obr. 32 je vyobrazen měřený akumulátor, dostupné parametry jsou v Tab. 11.

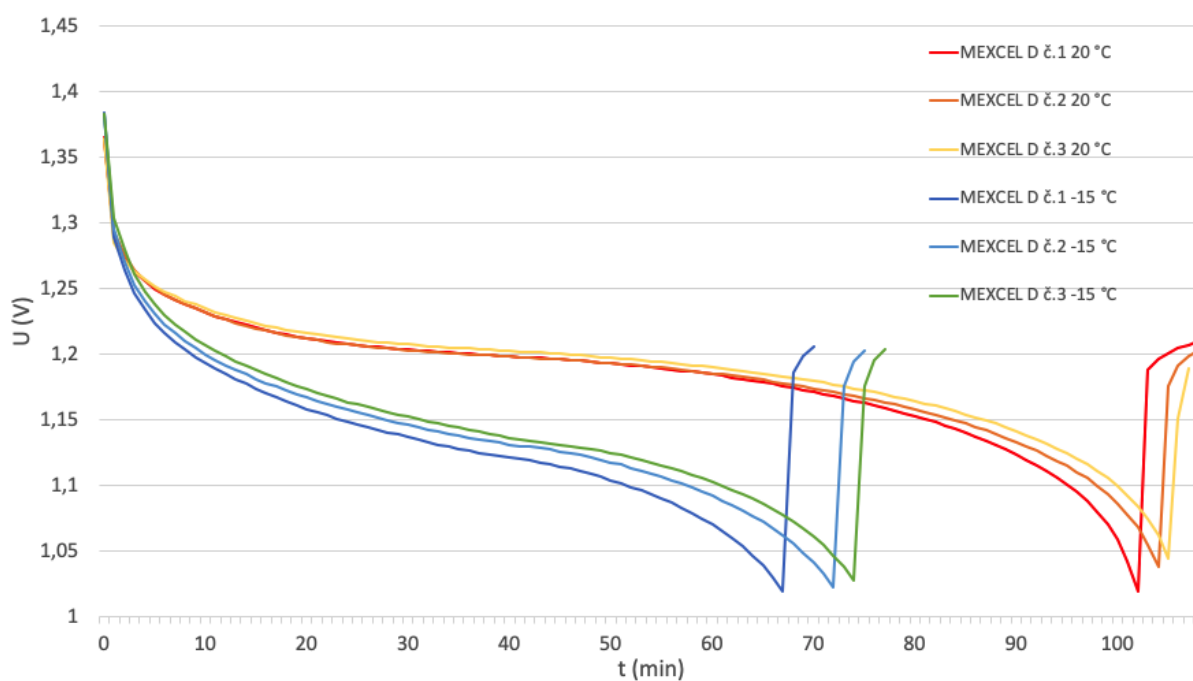


Obr. 32: Akumulátor D-D4000H 4000 mAh. Převzato z: [60].

³ Z důvodu nedostatku informací v datovém listu je vypočtený rozdíl 31 % naměřené kapacity za změněných podmínek a kapacity udávané výrobcem ke standardním podmínkám.

Tab. 11: Parametry akumulátoru D-D4000 4000 mAh. Převzato z: [61].

Výrobce	MEXCEL
Typ	Nikl-Kadmium
Katalogová kapacita (20 °C)	4 Ah
Jmenovité napětí (V)	1,2
Hmotnost (g)	135
Velikost (mm)	Šířka = 33; Výška = 60,5
Zátěžový proud při měření (mA)	2000
Napětí při maximálním nabití (V)	1,4
Napětí pro vypnutí zátěže (V)	1



Obr. 33: Graf průběhu napětí při teplotě 20 °C a -15 °C akumulátoru MEXCEL D-D4000H.

Tab. 12: Výsledky zkoušky akumulátoru MEXCEL D-D4000H při 20 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
MEXCEL D č.1	1,78 (1 hod. 47 min.)	3,56
MEXCEL D č.2	1,82 (1 hod. 49 min.)	3,63
MEXCEL D č.3	1,85 (1hod. 51 min.)	3,7
Průměr	1,82 (1hod. 49 min.)	3,63

Tab. 13: Výsledky zkoušky akumulátoru MEXCEL D-D4000H při -15 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
MEXCEL D č.1	1,13 (1 hod. 8 min.)	2,26
MEXCEL D č.2	1,22 (1 hod. 13 min.)	2,43
MEXCEL D č.3	1,25 (1 hod. 15 min.)	2,5
Průměr	1,2 (1 hod. 12 min.)	2,4

Příklad výpočtu kapacity

$$C = 2 \cdot 1,78 = 3,56 \text{ Ah} \quad (20)$$

Výpočet rozdílu kapacity za standartních podmínek

$$C_{RS} = 4 - 3,63 = 0,37 \text{ Ah} = 9,25 \% \quad (21)$$

Výpočet rozdílu kapacity změněných podmínek⁴

$$C_{RZ} = 4 - 2,64 = 1,36 \text{ Ah} = 34 \% \quad (22)$$

Zhodnocení akumulátoru MEXCEL D-D4000H

Z naměřených dat a dopočítaných kapacit vyplývá, že akumulátor nesplňuje parametry uvedené v datovém listu. Za teploty 20 °C dosahují články v průměru 3,63 Ah což je více jak 9% pokles kapacity oproti deklarovaným hodnotám. U zkoušky při -15 °C články dosahují pouze 2,4 Ah což je 34 % pokles. I když akumulátor má deklarovanou provozní teplotu do -20 °C informace pro tak nízké teploty nejsou v datovém listu dostupné, ale z příslušných dat je pokles přiměřený předpokladům.

⁴ Z důvodu nedostatku informací v datovém listu je vypočtený rozdíl 34 % naměřené kapacity za změněných podmínek a kapacity udávané výrobcem ke standartním podmínkám.

10.2.2 Výsledky měření akumulátoru EMMERICH D 9000 MAH FT

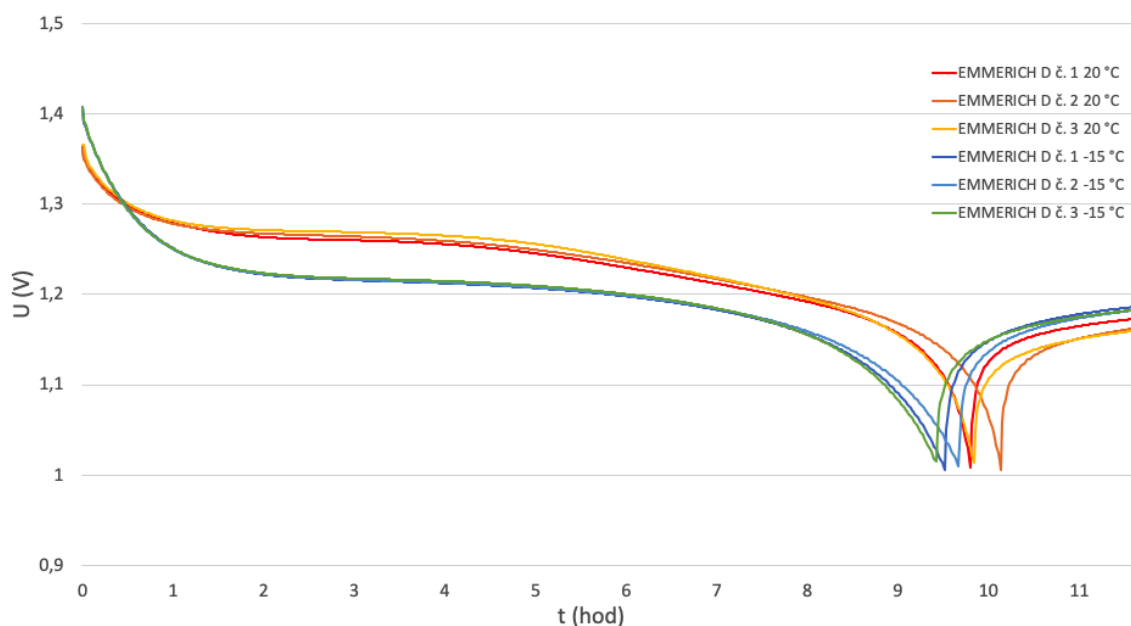
Na obrázku Obr. 34 je vyobrazen měřený akumulátor, dostupné parametry jsou v tabulce Tab. 14.



Obr. 34: Akumulátor EMMERICH D 9000 MAH FT – 1Z 9000 mAh. Převzato z: [62].

Tab. 14: Parametry akumulátoru EMMERICH D 9000 MAH FT – 1Z 9000 mAh. Převzato z: [63].

Výrobce	EMMERICH
Typ	Nikl-metal-hydrid
Katalogová kapacita (20 °C)	9000 mAh
Jmenovité napětí (V)	1,2
Hmotnost (g)	170
Velikost (mm)	Šířka = 32,5; Výška = 59,5
Zátěžový proud při měření (mA)	900
Napětí při maximálním nabití (V)	1,4
Napětí pro vypnutí zátěže (V)	1



Obr. 35: Graf průběhu napětí při teplotě 20 °C a -15 °C EMMERICH D 9000 MAH FT – 1Z.

Tab. 15: Výsledky zkoušky akumulátoru EMMERICH D 9000 MAH FT – 1Z při 20°C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
EMMERICH D č.1	9,85 (9 hod. 51 min.)	8,865
EMMERICH D č. 2	10,18 (10 hod. 11 min)	9,162
EMMERICH D č. 3	9,89 (9 hod. 53 min)	8,901
Průměr	9,97 (9 hod. 58 min)	8,98

Tab. 16: Výsledky zkoušky akumulátoru EMMERICH D 9000 MAH FT – 1Z při -15°C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
EMMERICH D č.1	9,53 (9 hod. 32 min)	8,57
EMMERICH D č. 2	9,68 (9 hod. 41 min.)	8,712
EMMERICH D č. 3	9,43 (9 hod. 26 min.)	8,487
Průměr	9,55 (9 hod. 33 min)	8,59

Příklad výpočtu kapacity

$$C = 9,53 \cdot 0,9 = 8,57 \text{ Ah} \quad (23)$$

Výpočet rozdílu kapacity za standartních podmínek

$$C_{RS} = 9 - 8,98 = 0,02 \text{ Ah} = 0,2 \% \quad (24)$$

Výpočet rozdílu kapacity změněných podmínek⁵

$$C_{RZ} = 9 - 8,59 = 0,41 \text{ Ah} = 4,5 \% \quad (25)$$

Zhodnocení akumulátoru EMMERICH D 9000 MAH FT – 1Z

Jak je vidět na obrázků Obr. 35 rozdíl mezi průběhy vybíjení článků při 20 °C a -15 °C je minimální. Konkrétně rozdíl v čase, kdy akumulátory docílily charakteristického minimálního napětí je pouhých v průměru 25 minut. Charakteristika kapacity při 20 °C se téměř neodchyluje od kapacit udávaných výrobcem a akumulátory lze považovat za shodné s hodnotami deklarovanými výrobcem. Zkouška v záporné teplotě vyšla s pouhým 4,5% rozdílem kapacit od kapacity při 20 °C. Takový pokles je opravdu minimální při rozdílu teplot 35 °C.

10.2.3 Výsledky měření akumulátoru LGABHE 21865

Na Obr. 36 je vyobrazen měřený akumulátor, dostupné parametry jsou v Tab. 1.

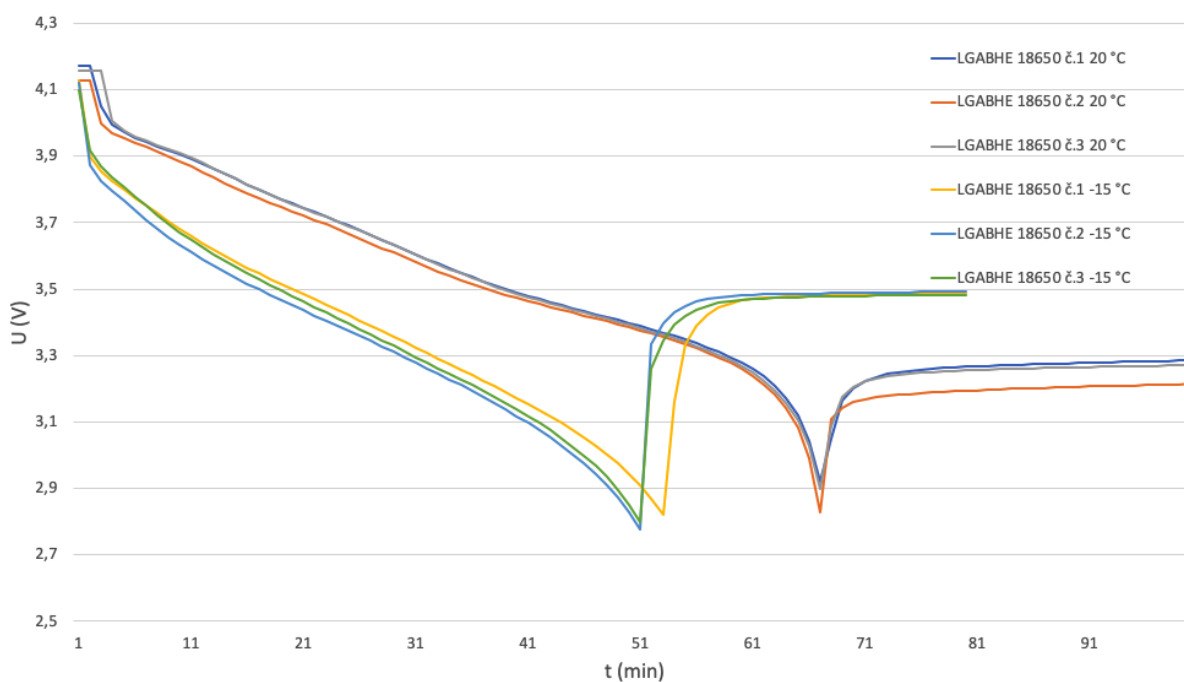


Obr. 36: Akumulátor LGABHE21865. Převzato z: [64].

⁵ Z důvodu nedostatku informací v datovém listu je vypočtený rozdíl 4,5 % naměřené kapacity za změněných podmínek a kapacity udávané výrobcem ke standartním podmínkám.

Tab. 17: Parametry akumulátoru LGABHE21865. Převzato z: [65].

Výrobce	APOWER
Typ	Lithium-iontová
Katalogová kapacita (20 °C)	2500 mAh
Jmenovité napětí (V)	3,7
Hmotnost (g)	50
Velikost (mm)	Šířka = 18; Výška = 650
Zátěžový proud při měření (mA)	2200
Napětí při maximálním nabití (V)	4,2
Napětí pro vypnutí zátěže (V)	2,75



Obr. 37: Graf průběhu napětí při teplotě 20 °C a -15 °C akumulátoru LGABHE 218650.

Tab. 18: Výsledky zkoušky akumulátoru LGABHE 218650 při 20 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
LGABHE 18650 č.1	1,12 (1 hod. 7 min.)	2,46
LGABHE 18650 č.2	1,12 (1 hod. 7 min.)	2,46
LGABHE 18650 č.3	1,12 (1 hod. 7 min.)	2,46
Průměr	1,12 (1 hod. 7 min.)	2,46

Tab. 19: Výsledky zkoušky akumulátoru LGABHE 218650 při -15 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
LGABHE 18650 č.1	0,88 (53 min.)	1,94
LGABHE 18650 č.2	0,85 (51 min.)	1,87
LGABHE 18650 č.3	0,85 (51 min.)	1,87
Průměr	0,86 (52 min.)	1,89

Příklad výpočtu kapacity

$$C = 1,12 \cdot 2,2 = 2,46 \text{ Ah} \quad (26)$$

Výpočet rozdílu kapacity za standartních podmínek

$$C_{RS} = 2,5 - 2,46 = 0,04 \text{ Ah} = 1,6 \% \quad (27)$$

Výpočet rozdílu kapacity za změněných podmínek⁶

$$C_{RZ} = 2,5 - 1,89 = 0,61 \text{ Ah} = 24,4 \% \quad (28)$$

Zhodnocení akumulátoru LGABHE 218650

Výsledek měření z důvodu nedostatečných informací v datovém listu nemůže být tak dobře porovnán s parametry udávaných výrobcem. Každopádně lithium-iontový akumulátor LGABHE by měl mít kapacitu okolo 2,5 Ah což se v testu za standartních podmínek, tedy při 20 °C potvrdilo. Výchylka od udávané hodnoty byla pouze 1,6 %, respektive akumulátory měly pouze o 0,04 Ah menší kapacitu, než je uvedeno. U testu při -15 °C byl tento pokles už poněkud významnější a to o 0,61 Ah což odpovídá 24,4 % poklesu. Celkově se doba vybíjení zkrátila o 15 minut. Lze tedy usuzovat že za standartních podmínek akumulátor odpovídá předpokladům.

10.2.4 Výsledky měření lithio-iontového akumulátoru TINKO IRC18650

Na Obr. 38 je vyobrazen měřený akumulátor, dostupné parametry jsou v Tab. 1.

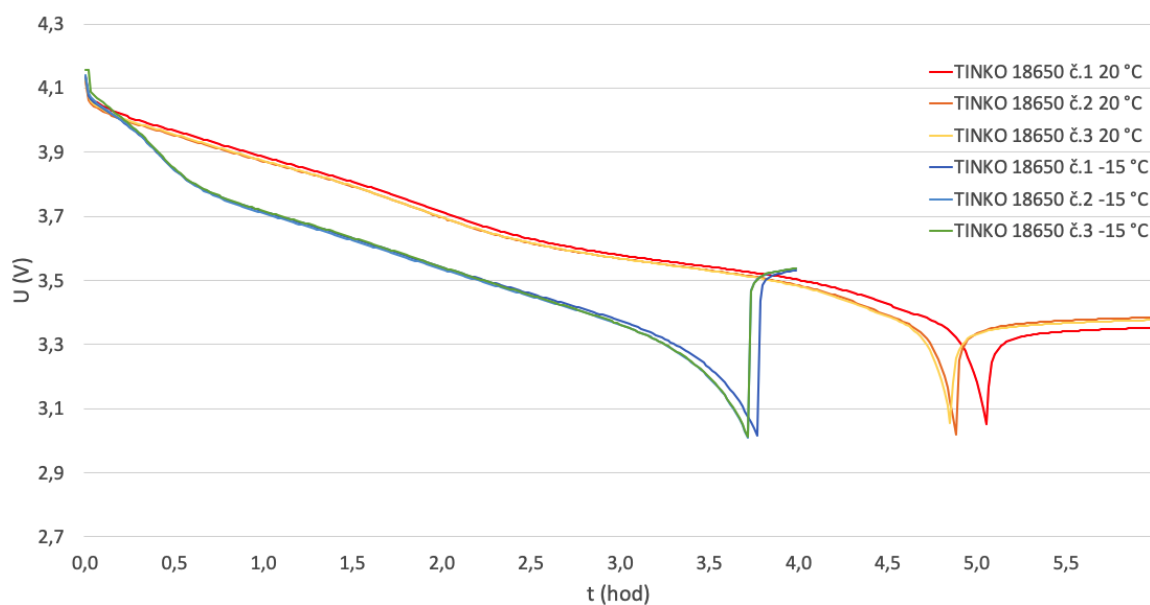
⁶ Z důvodu nedostatku informací v datovém listu je vypočtený rozdíl 24,4 % naměřené kapacity za změněných podmínek a kapacity udávané výrobcem ke standartním podmínkám.



Obr. 38: Akumulátor TINKO IRC18650. Převzato z: [66].

Tab. 20: Parametry akumulátoru TINKO IRC 18650. Převzato z: [67], [68].

Výrobce	TINKO
Typ	Lithium-iontový
Katalogová kapacita (20 °C)	2200 mAh
Jmenovité napětí (V)	3,7
Hmotnost (g)	44
Velikost (mm)	Šířka = 18,5; Výška = 65,5
Zátěžový proud při měření (mA)	440
Napětí při maximálním nabití (V)	4,2
Napětí pro vypnutí zátěže (V)	3



Obr. 39: Graf průběhu napětí při teplotě 20 °C a -15 °C akumulátoru TINKO IRC18650.

Tab. č. 21: Výsledky zkoušky akumulátoru TINKO IRC18650 při 20 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
TINKO 18650 č.1	5,06 (5 hod. 4 min.)	2,226
TINKO 18650 č.2	4,9 (4 hod. 54 min.)	2,156
TINKO 18650 č.3	4,86 (4 hod. 52 min.)	2,138
Průměr	4,94 (4 hod. 56 min.)	2,174

Tab. č. 22: Tab. č. 23: Výsledky zkoušky akumulátoru TINKO IRC18650 při -15 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
TINKO 18650 č.1	3,78 (3 hod. 47 min.)	1,66
TINKO 18650 č.2	3,73 (3 hod. 44 min.)	1,64
TINKO 18650 č.3	3,73 (3 hod. 44 min.)	1,64
Průměr	3,75 (3 hod. 45 min.)	1,647

Příklad výpočtu kapacity

$$C = 5,06 \cdot 0,440 = 2,226 \text{ Ah} \quad (29)$$

Výpočet rozdílu kapacity za standardních podmínek

$$C_{RS} = 2,2 - 2,174 = 0,026 \text{ Ah} = 1,18 \% \quad (30)$$

Výpočet rozdílu kapacity za změněných podmínek⁷

$$C_{RZ} = 2,2 - 1,647 = 0,553 \text{ Ah} = 25,13 \% \quad (31)$$

$$C_{RZ} = 1,54 - 1,647 = -0,107 \text{ Ah} = + 6,95 \% \quad (32)$$

Zhodnocení akumulátoru TINKO IRC18650

Udávaná kapacita akumulátoru TINKO IRC18650 dle datového listu je 2,2 Ah za standardních podmínek. Taková zkouška v klimatické komoře prokázala kapacitu akumulátoru 2,174 Ah což je rozdíl pouze 1,18 %. U testu za změněných podmínek, tedy v - 15 °C, což je v mezích provozních teplot akumulátoru, už tento pokles byl 25,13 %, který odpovídá kapacitě 1,647 Ah. Díky podrobnému datovému listu výrobce lze porovnat obě zkoušky s deklarovanými hodnotami. U standardních podmínek výrobce deklaruje provoz více jak 300 minut za stejných podmínek jako byl proveden test v klimatické komoře.

⁷ Vypočtený rozdíl 25,13 % je vztažený ke kapacitě deklarované za standardních podmínek. Naopak rozdíl + 6,95 % je rozdíl kapacit, který byl možný dopočítat z dostatečných informací v datovém listu výrobce.

V záporných teplotách výrobce deklaruje provoz 210 minut. Výsledky obou testů naměřených v klimatických komorách se shodují s daty udávaných výrobcem.

10.2.1 Výsledky měření akumulátoru MOTOMA LCR18650-2000MAH

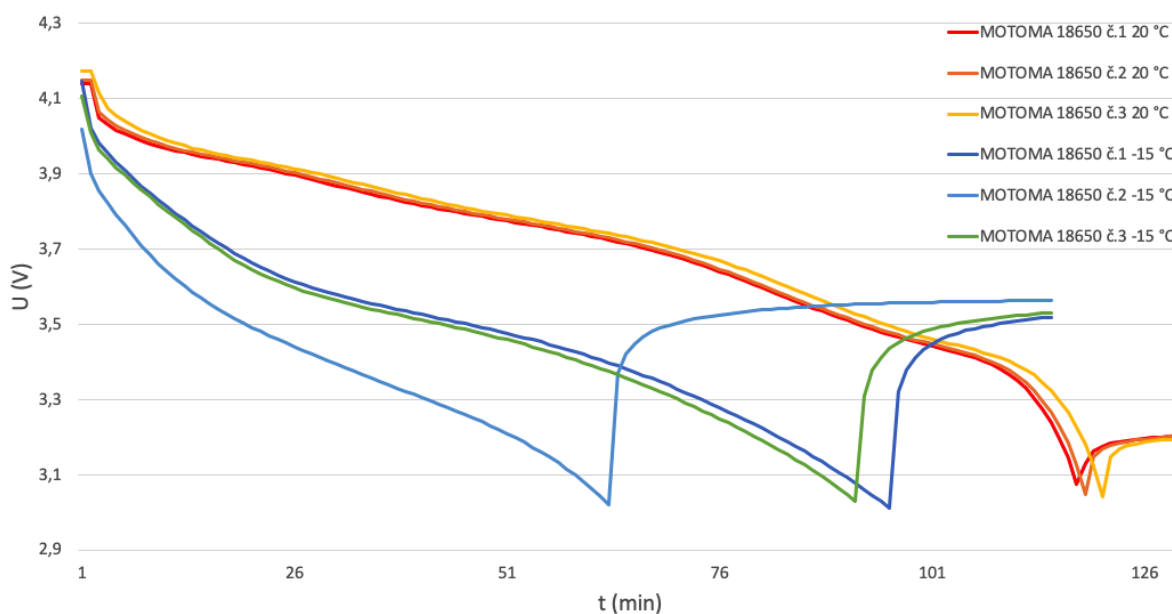
Na Obr. 40 je vyobrazen měřený akumulátor, dostupné parametry jsou v Tab. 24.



Obr. 40: Akumulátor MOTOMA LCR18650-2000MAH. Převzato z: [69].

Tab. 24: Parametry akumulátoru MOTOMA LCR18650-2000MAH. Převzato z: [70].

Výrobce	MOTOMA
Typ	Lithium-iontový
Katalogová kapacita (20 °C)	2000 mAh
Jmenovité napětí (V)	3,7
Hmotnost (g)	43
Velikost (mm)	Šířka = 18; Výška = 64,8
Zátěžový proud při měření (mA)	1000
Napětí při maximálním nabití (V)	4,2
Napětí pro vypnutí zátěže (V)	3



Obr. 41: Graf průběhu napětí při teplotě 20 °C a -15 °C akumulátoru MOTOMA LCR18650-2000MAH.

Tab. 25: Výsledky zkoušky akumulátoru MOTOMA LCR18650-2000MAH při 20 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
MOTOMA 18650 č.1	1,97 (1 hod. 58 min.)	1,97
MOTOMA 18650 č.2	1,98 (1 hod. 58 min.)	1,98
MOTOMA 18650 č.3	2,02 (2 hod. 1 min.)	2,02
Průměr	1,99 (1 hod. 59 min.)	1,99

Tab. 26: Výsledky zkoušky akumulátoru MOTOMA LCR18650-2000MAH při -15 °C.

	Vybíjecí čas (hod)	Kapacita (Ah)
MOTOMA 18650 č.1	1,6 (1 hod. 36 min.)	1,6
MOTOMA 18650 č.2	1,05 (1 hod. 3 min.)	1,05
MOTOMA 18650 č.3	1,53 (1 hod. 32 min.)	1,53
Průměr	1,4 (1 hod. 24 min.)	1,4

Příklad výpočtu kapacity

$$C = 1 \cdot 1,97 = 1,97 \text{ Ah} \quad (33)$$

Výpočet rozdílu kapacity pro standartní podmínky

$$C_{RS} = 2 - 1,99 = 0,01Ah = 0,5 \% \quad (34)$$

Výpočet rozdílu kapacity za změněných podmínek⁸

$$C_{RZ} = 2 - 1,4 = 0,6Ah = 30 \% \quad (35)$$

Zhodnocení akumulátoru MOTOMA LCR18650-2000MAH

Po dokončení testu a zhodnocení dat bylo zjištěno, že hodnoty udávané výrobcem [70] se s minimálními odchylkami shodují s hodnotami udávaných v datovém listu. Udávaná kapacita lithium-iontového akumulátoru za normálních podmínek (20 °C) se odlišuje od kapacity naměřené jen o 0,5 %. Takový rozdíl je možné zanedbat. U zkoušky za změněných podmínek výrobce udává změnu kapacity jen do 0 °C, která má být 60 % deklarované kapacity tedy 1,2 Ah. Kapacita zjištěná u zkoušky při -15 °C dosahovala 1,4 Ah což odpovídá poklesu 30 %. Takový pokles je dokonce menší, než je udávaný výrobcem u vyšší teploty 0 °C. Z dostupných informací z datového listu a po porovnání s naměřenými daty akumulátor odpovídá hodnotám udávaných výrobcem.

⁸ Z důvodu nedostatku informací v datovém listu je vypočtený rozdíl 30 % rozdíl naměřené kapacity za změněných podmínek a kapacity udávané výrobcem ke standartním podmínkám.

10.3 Zhodnocení vlastního měření

Cílem vlastního měření bylo zjistit odlišnosti udávaných parametrů akumulátorů s hodnotami naměřených vlastním měřením. Pro měření bylo využito několik zařízení. Klimatické komory Vötsch zaručující stálost teploty a vlhkosti v průběhu celé zkoušky. Stejnoseměrné zátěže ITECH zaručující konstantní proudovou zátěž akumulátorů. A pro samostatný záznam měření multimetr Keithley s multiplikační kartou a softwarovým vybavením v PC.

Prvotní postup měření musel být upraven, a to konkrétně kvůli úbytkům napětí na kabelech vedoucí od stejnosměrných zátěží k akumulátorům. U prvních zkoušek byly použity kabely s plochou průřezu $1,5 \text{ mm}^2$ jako tomu bylo u prací [71], [72]. Avšak takové kabely vnášely do měření velkou chybu v podobě úbytku napětí na vedení, což zapříčiňovalo dřívější vypnutí zátěží. U zátěží bylo totiž nastaveno automatické vypnutí při docílení určitého napětí, aby akumulátory nebyly podvybíjené a mohly být použity pro další zkoušky. Elektrická programovatelná zátěž tedy vypínala měření dříve z důvodu úbytku napětí, než bylo docíleno referenčního napětí, což zkracovalo celé měření. Chyba byla výraznější při větších proudových zátěžích. Proto byly všechny články přeměřeny s podstatně silnějšími kabely o ploše průřezu 16 mm^2 . Další opatření zpřesňující měření jsou popsány výše v textu.

Pro vyhodnocení akumulátorů byl měřen průběh napětí. Zaznamenána byla hodnota, kdy akumulátory docílily napětí charakterizující vybití článku. Dále byla dopočítána kapacita a porovnána s deklarovanou hodnotou kapacity výrobce. Měření probíhalo za standardních podmínek tedy za teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$ nebo $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a za změněných podmínek tedy $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. Konečné výsledky měření shrnují tabulky Tab. 27 a Tab. 28.

Tab. 27: Celkové zhodnocení měření akumulátorů za standardních podmínek.

Název	Deklarovaná kapacita	Naměřená kapacita	Rozdíl	Teplota	Výsledek
LONG	6,84 Ah	6,4 Ah	6,43 %	25 °C	Nevyhovuje
VIPOW	8,55 Ah	6,09 Ah	29 %	25 °C	Nevyhovuje
GP D	11 Ah	10,41 Ah	5,4 %	20 °C	Nevyhovuje
MEXCEL D	4 Ah	3,63 Ah	9,25 %	20 °C	Nevyhovuje
EMMERICH D	9 Ah	8,98 Ah	0,02 %	20 °C	Vyhovuje
LGABHE 18650	2,5 Ah	2,46 Ah	1,16 %	20 °C	Vyhovuje
TINKO18650	2, 2 Ah	2, 174 Ah	1,18 %	20 °C	Vyhovuje
MOTOMA 18650	2 Ah	1,99 Ah	0,5 %	20 °C	Vyhovuje

U zkoušky akumulátoru za standardních podmínek nesplnilo toleranci 5 % čtyři z osmi akumulátorů. U Akumulátorů velikosti D od výrobců MEXCEL, GP BATTERIES a olověných akumulátorů LONG a VIPOW byl rozdíl větší, než je udávaná hranice 5 %. Z tohoto důvodu akumulátory MEXCEL D-D4000H, GP 11000DH, LONG WP7,2-12 a akumulátor VIPOW nesplňují technické parametry udávané v datových listech. Je nutné podotknout, že olověný akumulátor LONG WP7,2-12 a akumulátor GP velikost D tento požadavek nesplňují o 1,43 % a 0,43 %. Pro ověření kvality těchto článků by bylo potřeba podstoupit další testy, které by ověřily či vyvrátily naměřené hodnoty. Naopak s nejmenším rozdílem od deklarovaných kapacit vyšly akumulátory od společnosti EMMERICH velikosti D s nikl-metal-hydrid technologií a rozdílem pouhých 0,02 % a lithium-iontový akumulátor velikosti 18650 od výrobce MOTOMA s pouhým rozdílem 0,5 %.

Tab. 28: Celkové zhodnocení měření akumulátorů za změněných podmínek.

Název	Deklarovaná kapacita	Naměřená kapacita	Rozdíl	Teplota	Výsledek
LONG	4,55 Ah (7,2 Ah)	5,1 Ah	+14,6 %	-15 °C	Vyhovuje
VIPOW	5,301 Ah (8,55 Ah)	4,3 Ah	18,8 %	-15 °C	Nevyhovuje
GP D	Nedostupné (11 Ah)	7,6 Ah	31 %	-15 °C	x
MEXCEL D	Nedostupné (4 Ah)	2,4 Ah	34 %	-15 °C	x
EMMERICH D	Nedostupné (9 Ah)	8,59Ah	4,5 %	-15 °C	x
LGABHE 18650	Nedostupné (2,5 Ah)	1,89 Ah	24,4 %	-15 °C	x
TINKO18650	1, 54 Ah (2,2 Ah)	1,65 Ah	+ 6,95 % (25,13 %)	-15 °C	Vyhovuje
MOTOMA 18650	Nedostupné (2Ah)	1,4 Ah	30 %	-15 °C	x

Důkladnému vyhodnocení za změněných podmínek většinou bránil nedostatek informací udávaných výrobci v datových listech pro nízké teploty. U všech měřených akumulátorů výrobci udávají provozní teplotu přibližně až do -20 °C, avšak bez deklarovaných kapacit při takových provozních podmínkách. Z tohoto důvodu není možné porovnat shodnost s datovými listy výrobců a naměřených dat u většiny akumulátorů. Výsledky za změněných podmínek jsou dostupné v Tab. 28.

U akumulátoru LONG WP7,2-12, VIPOW a TINKO 18650 údaje dostupné byly. Zkouškou za změněných podmínek obstály akumulátory LONG WP7,2-12 a TINKO 18650, které hranici 5 % nepřekročily a tím pádem se naměřené hodnoty s hodnotami z datových listů shodují. Naopak tomu bylo u akumulátoru VIPOW, který parametr nesplnil a odchyluje se od deklarované kapacity za změněných podmínkách o více jak 18 %.

Zhodnocení a závěr

V současné době u bezdrátových zařízení je kladen zejména velký důraz na jednotlivé komponenty, jelikož určují celkovou spolehlivost zařízení. Práce se zabývá právě jednou z klíčových komponentů obsažených v bezdrátových zařízeních, kterým je zdroj elektrické energie tedy akumulátor.

V úvodu práce je rozebrána problematika akumulátorů od základního uspořádání přes jejich rozdělení až po charakteristické vlastnosti, mezi které je řazeno napětí, kapacita nebo stanovený vybíjecí proud. Navazujícím tématem v teoretickém úvodu pro podrobnější pochopení problematiky byly rozebrány vlivy působící na akumulátor, zejména teplota, způsob nabíjení a vybíjení akumulátorů. V neposledním bodě byla provedena rešerše trhu se zjištěním aktuálně dostupných akumulátorů. Na základě provedené rešerše byly poté vybrány akumulátory pro praktickou část, která byla hlavním stěžejním bodem diplomové práce.

V praktické části byly změřeny stanovené vybíjecí charakteristiky vybraných akumulátorů v klimatických komorách za stálých klimatických podmínek. Měřicí aparatura se skládala z klimatické komory pro zaručení stálosti prostředí, proudových zátěží pro zajištění konstantního vybíjecího proudu a přesného stolního měřicího multimetru s multiplexorovou kartou. Veškeré měření bylo ovládáno a zaznamenáváno počítačem připojeným přes USB převodník na sběrnici GPIB k multimetru.

Během prvních měření byla zjištěna chyba na měřicí aparatuře, která byla použita i v případě prací [71], [72] konkrétně na kabelech spojující zátěže a měřené akumulátory. Slabý průřez kabelů způsoboval chyby v měření v podobě úbytku napětí na vodičích. Nejvíce byla chyba znatelná u akumulátorů velikosti D s napětím 1,2 V, kdy úbytek byl tak velký, že způsoboval vypnutí proudové zátěže. Po úpravě měřicí aparatury kabely s větší plochou průřezu bylo měření zopakováno.

Měření probíhalo na základě normy ČSN EN: 60068-2-1 a ČSN EN: 60068-2-2. Z hlediska dostupných datových listů a hlavním cílem porovnat naměřené hodnoty s hodnotami udávanými výrobcem nebylo možné provést měření přesně podle norem a měření bylo nutné uzpůsobit. Akumulátory byly měřeny ve standardních pokojových podmínkách a dále ve změněných záporných teplotách.

Z naměřených hodnot shrnutých v tabulce Tab. 27 pro standardní podmínky vyplývá, že z osmi testovaných akumulátorů neodpovídá předpokladům polovina akumulátorů. Nejhuře vyšel olovený akumulátor VIPOW s 29% záporným rozdílem od hodnot

deklarovaných. Naopak nejlépe vyšel akumulátor EMMERICH velikosti D s pouhým rozdílem 0,02 % od deklarované hodnoty.

U zkoušky v záporných teplotách nebylo možné porovnat všechny akumulátory s deklarovanými hodnotami z důvodu nedostatku informací v datových listech. Pouhé tři akumulátory měly dostatečně obsáhlé datové listy, aby bylo možné posoudit výsledky i v záporných teplotách. Nejlépe vyšel olověný akumulátor LONG s kladným rozdílem 14,6 % od hodnoty deklarované. Naopak nejhůře vyšel olověný akumulátor VIPOW s rozdílem od deklarované hodnoty 18,8 %. Kompletní výsledky jsou blíže pospány v Tab. 28.

Akumulátory se nemusejí shodovat s deklarovanými hodnotami z vícero důvodů. Jednak se může jednat o skutečnou neshodnost s udávanými parametry, ale také se může jednat o chybu měření, vadné kusy nebo špatné podmínky skladování u dodavatele. Ke komplexnějšímu porovnání akumulátorů by bylo potřeba měření vícekrát opakovat, popřípadě sledovat charakteristiky u většího počtu akumulátorů z důvodu získání větší statistické výpovědi schopnosti.

Literatura

- [1] “Co jsou primární články, baterie a akumulátory,” [Online]. Dostupné z: <https://www.elektrowin.cz/cs/informace-pro-verejnost/kolobeh-elektrospotrebice/co-s-bateriemi-a-akumulatory/co-jsou-primarni-clanky-baterie-a-akumulatory.html>.
- [2] Bobby, “What are primaty batteries,” 2014,[Online]. Dostupné z: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/primary-batteries/>
- [3] “Different Types of Batteries and Their Applications,” 2019, [Online]. Dostupné z: <https://components101.com/articles/different-types-of-batteries-and-their-uses>.
- [4] M. Cenek, *Akumulátory a baterie*. 1996.
- [5] (Battery University), “Jak fungují palivové články.” 2018, [Online]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromotory-pohony-a-stroje/16987-jak-funguji-palivove-clanky>.
- [6] “GREENROCK Saltwater Battery,” 2021, [Online]. Dostupné z: https://www.bluesky-energy.eu/en/saltwater_battery/.
- [7] “Víte, jak funguje baterie?” [Online]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/17.php>.
- [8] C. Woodford, “Lithium-ion battery” 2020, [Online]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/how-lithium-ion-batteries-work.html#:~:text=All lithium-ion batteries work,stores energy during this process>.
- [9] “How Does Lithium-Ion Battery Work,” 2017, [Online]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/articles/how-does-lithium-ion-battery-work>.
- [10] A. Aktaş and Y. Kirçiçek, “Chapter 5 - Solar Hybrid Systems and Energy Storage Systems,” in *Solar Hybrid Systems*, A. Aktaş and Y. Kirçiçek, Eds. Academic Press, 2021, pp. 87–125.
- [11] “Battery Parameters,” 2020, [Online]. Dostupné z: <https://www.cellerite.com/post/battery-parameters>.
- [12] P. Hrzina, “Cykly a životnost baterie”, [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/21096-cykly-a-zivotnost-baterie>.
- [13] “What is C-Rate?,” 2021, [Online]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate>.
- [14] “Akumulátory a nabíjení.” [Online]. Dostupné z: <https://live.rotorama.cz/tutorial/akumulatory-a-nabijeni/>.

- [15] P.-R. Micheael, "How Does Temperature Affect Battery Performance?," 2020, [Online]. Dostupné z: <https://www.cedgreentech.com/article/how-does-temperature-affect-battery-performance>.
- [16] T. Kazda, "Vliv nízké teploty na kapacitu vybraných li-ion akumulátorů." 2021, [Online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21683-vliv-nizke-teploty-na-kapacitu-vybranych-li-ion-akumulatoru>.
- [17] J. Hammerbauer, *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. ZČU Plzeň, 1996.
- [18] "LONG baterie 12V 7,2AH F2 (WP7.2-12)." , [Online]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/445697/calculating-battery-current-during-charging-in-cccv>.
- [19] J. Shepard, "How to read battery discharge curves," 2021, [Online]. Dostupné z: <https://www.batterypowertips.com/how-to-read-battery-discharge-curves-faq/>.
- [20] D. N. Wong, D. A. Wetz, A. M. Mansour, and J. M. Heinzl, "The Influence of High C Rate Pulsed Discharge on Lithium-ion Battery Cell Degradation," p. 6, 2015.
- [21] R. M. ARENDÁŠ Miroslav, *Nabíječky a nabíjení*. BEN, 2005.
- [22] S. J. (Blue P. S.r.o.), "Testování bateriových systémů," 2019, [Online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/testovani-bateriovych-systemu--3985>.
- [23] K. V. Aifantis Katerina, Hackney Stephan, *High Energy Density Lithium Batteries*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.. KGaA Weinheim, 2010.
- [24] Tinymce, "Voltages," 2012, [Online]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/li-ion-and-lipoly-batteries/voltages>.
- [25] "Advantages of Primary Batteries." 2021, [Online]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/primary_batteries.
- [26] "Alkalické baterie." , [Online]. Available: <http://www.battex.info/primarni-clanky-a-baterie/zinkove-primarni-clanky/alkalicke-baterie>.
- [27] V. Sapru, "The World of Alkaline Batteries." , [Online]. Dostupné z: <https://www.batterypoweronline.com/markets/batteries/the-world-of-alkaline-batteries/>.
- [28] "Zinc Carbon Battery/Types of Zinc Carbon Battery/ Advantages and Disadvantages," 2020, [Online]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/zinc-carbon-battery/>
- [29] "baterie a akumulátory v domácnosti echnologie baterie" [Online]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/technologie-1/baterie-a-akumulatory-v-domacnosti->

- technologie-baterii.aspx.
- [30] “Baterie a akumulátory v domácnosti. technologie baterií,” 2013, [Online]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/technologie-1/baterie-a-akumulatory-v-domacnosti-technologie-baterii.aspx>.
- [31] A. Manual, “Energizer Battery Specs.,” p. 17, 2004.
- [32] “choices of primary batteries” 2019, [Online]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/choices_of_primary_batteries.
- [33] “Lithium-Thionyl Chloride batteries.” , [Online]. Dostupné z: <https://en.globtek.com/lithium-thionyl-chloride-li-socl2-batteries/>.
- [34] “Li-SOCL2 batteries.” , [Online]. Dostupné z: <http://gebc-energy.com/en-US/Product-46.html>.
- [35] “What is a lithium.ion battery and how does it work?” , [Online]. Dostupné z: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>.
- [36] S. ho Joo, S. M. Shin, D. ju Shin, and J. P. Wang, “Development of recycling technology to recover valuable metals from lithium primary and ion batteries,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 229, p. 9, 2015, doi: 10.1177/0954405414567521.
- [37] M. Rutnik, “Everything you need to know Samsung Galaxy,” 2021, [Online]. Available: <https://www.androidauthority.com/samsung-galaxy-note-20-1108635/>.
- [38] J. Pavlis, “Li-Pol-akumulatry,” 2011.
- [39] “Olověné akumulátory a gelové baterie.” , [Online]. Dostupné z: <https://www.emerx.cz/olovene-akumulatory-a-gelove-baterie.html>.
- [40] P. Šrubařová, “Pokročilé technologie olověných akumulátorů - gel a AGM,” 2018, [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/16815-pokrocile-technologie-olovenych-akumulatoru-gel-a-agm>.
- [41] P. Šrubařová, “Jak funguje olověný akumulátor,” 2017, [Online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>.
- [42] “Lithium Battery Overview,” 2019, [Online]. Dostupné z: <https://www.batterystuff.com/kb/articles/battery-articles/lithium-battery-overview.html>.
- [43] V. Křivka, “Velkokapacitní úložiště elektrické energie pomocí železnice (ARES - Advanced Rail energy Storage),” 2020, [Online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/velkokapacitni-uloziste-elektricke-energie-pomoci-zeleznice-ares-advanced-rail-energy-storage--17478>.

- [44] “The world’s first big battery is even bigger,” 2020, [Online]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/videos/hornsdale>.
- [45] “HPR Open day (Postponed),” 2021, [Online]. Dostupné z: <https://hornsdalepowerreserve.com.au/hpr-open-day/>.
- [46] P. Hrzina, “Solární energie v praxi,” 2018, [Online]. Dostupné z: <https://soundcloud.com/sciencecafe/export-2>.
- [47] K. Vladimír, “Velkokapacitní úložiště elektrické energie pomocí železnice (ARES - Advanced Rail Energy Storage),” 2020, [Online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/velkokapacitni-uloziste-elektricke-energie-pomoci-zeleznice-ares-advanced-rail-energy-storage--17478>.
- [48] “What you need to know about electromobility,” 2021, [Online]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/electromobility/>.
- [49] “Trends and developments in electric vehicle markets,” 2021, [Online]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets>.
- [50] A. M. Bernardes, D. C. R. Espinosa, and J. A. S. Tenório, “Recycling of batteries: A review of current processes and technologies,” *J. Power Sources*, 2004, doi: 10.1016/j.jpowsour.2003.12.026.
- [51] P. Vytlačil, “Recyklace lithium-ion baterií,” 2018, [Online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/recyklace-lithium-ion-baterii-uvod#comments>.
- [52] “A second life for batteries: from energy usage to undustrial storage,” 2020, [Online]. Dostupné z: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/a-second-life-for-batteries-from-energy-usage-to-industrial-storage/>.
- [53] “INSTALLATION AND OPERATION MANUAL, Temperature and Climatic Test Systems.” 2010.
- [54] Itech Eletronics, “DC Programmable Electronic Loads Series IT8500plus User ’ s Manual.” p. 65, 2015.
- [55] “Long baterie 12V 7,2 Ah f2-wp7212.” , [Online]. Dostupné z: <https://www.avacom.cz/long-baterie-12v-7-2ah-f2-wp7212>.
- [56] “Datasheet - Long Wp7.2-12,” vol. 2, no. V. pp. 7–8.
- [57] “Baterie olověná 12V 9Ah VIPOW.” , [Online]. Dostupné z: <https://www.tipa.eu/cz/baterie-olovena-12v-9ah-vipow/d-131499/?gclid=CjwKCAjw87SHBhBiEiwAukSeUXM5US0o8N3afba->

- 8gvQBPIA8Vmd5ZKNuXVcVOJxaSQWhKEZys4SFBoCjHwQAvD_BwE.
- [58] “Datasheet VIPOW 9Ah 12V.” 2013.
- [59] “Datasheet GP1100DH.” .
- [60] “Mexcel D-D4000H speciální akumulátor Velké mono odolné vůči vysokým teplotám, Flat-Top Ni-Cd 1.2 V 4000 mAh.” , [Online]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/mexcel-d-d4000h-specialni-akumulator-velke-mono-odolne-vuci-vysokym-teplotam-flat-top-ni-cd-12-v-4000-mah-1490414?&vat=true>.
- [61] “Datasheet MEXCEL D-D4000H.” p. 4000.
- [62] “Emmerich Mono ZLF speciální akumulátor Velké mono pájecí špička ve tvaru Z Ni-MH 1.2 V 9000 mAh.” , [Online]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/emmerich-mono-zlf-specialni-akumulator-velke-mono-pajeci-spicka-ve-tvaru-z-ni-mh-12-v-9000-mah-255047?&vat=true>.
- [63] “Datasheet EMMERICH NIMH AKKU D 9000 MAH FT-1Z.” p. 27.
- [64] “LGABHE21865.” , [Online]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/r574-nabijeci-clanek-li-ion-icr18650-37v2600mah-lgabhe21865/>.
- [65] “Datasheet AXCOS Lgabhe 21865.” .
- [66] “TINKO IRC18650.” , [Online]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/r554a-nabijeci-clanek-li-ion-icr18650-37v2000mah-tinko/>.
- [67] “Datasheet TINKO 18650.” .
- [68] “Datasheet AXCOS GmbH TINKO IRC 18650.” .
- [69] “MOTOMA 18650”, [Online]. Dostupné z: https://www.tipa.eu/cz/baterie-nabijeci-li-ion-18650-37v-2000mah-3c-motoma/d-174929/?gclid=EAIaIQobChMIxdKU3L6Q8wIVc0aRBR1XfA1SEAQYAiABEgK KLPD_BwE.
- [70] “Datasheet MOTOMA 18650.” .
- [71] P. Světlík, “Vliv vnějšího prostředí na parametry akumulátorů,” 2021.
- [72] M. Hora, “Vliv vnějšího prostředí na parametry akumulátorů,” 2019.

Přílohy

- LONG naměřená a zpracovaná data.xlsx
- VIPOW naměřená a zpracovaná data.xlsx
- MEXCEL naměřená a zpracovaná data.xlsx
- EMMERICH naměřená a zpracovaná data.xlsx
- GP naměřená a zpracovaná data.xlsx
- MOTOMA naměřená a zpracovaná data.xlsx
- LGABHE naměřená a zpracovaná data.xlsx
- TINKO naměřená a zpracovaná data.xlsx