

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv vnějšího prostředí na parametry akumulátorů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Petr SVĚTLÍK**
Osobní číslo: **E18B0029K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Vliv vnějšího prostředí na parametry akumulátorů**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

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 bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. HAMMERBAUER, Jiří. Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. 2. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. 181 s. ISBN 80-7082-411-5.
2. 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.
3. 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 bakalářské práce: **Ing. et Ing. Petr Kašpar, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na primární články a sekundární články používané v současnosti. Skládá se ze dvou částí, v první části popisuje technologie jednotlivých typů článků a jejich předpokládaný rozsah využití. Druhá část je praktická a zabývá se vyhodnocením naměřených dat vybraných článků za běžných a za změněných okolních podmínek.

Klíčová slova

Baterie, akumulátor, článek, lithium, Li-ion, zdroj, olovo, elektrolyt, elektroda, separátor, elektromobilita, energetické úložiště

Abstract

This bachelor thesis is focused on primary and secondary cells used in present time. It is composed from two parts, in first part describes chemistry of cells and their assumed scope of use. The second part is practical and it is focused on analyse of measured values of chosen cells on usual and during changed surrounding conditions.

Key words

Battery, accumulator, cell, lithium, Li-on, power source, lead, electrolyte, electrode, separator, electromobility, energy storage

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

Podpis

V Plzni dne

Petr Světlík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. et Ing. Petru Kašparovi, Ph.D. za vedení práce a za pomoc se zpřístupněním laboratoře. Dále děkuji Ing. Martinu Hirmanovi, Ph.D. za poskytnutí laboratoře a klimatické komory. Můj dík patří i doc. Ing. Jiřímu Hammerbauerovi, Ph.D. a Ing. Alešovi Voborníkovi, Ph.D. za zapůjčení elektronických zátěží. V neposlední řadě děkuji Ing. Karlu Šímovi a Ing. Davidovi Kalašovi za zapůjčení multimetru Keithley a za proškolení na jeho ovládání.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 ELEKTROCHEMICKÉ ZDROJE PROUDU	12
1.1 Základní rozdělení elektrochemických zdrojů proudu	13
1.1.1 Primární články-obecně	13
1.1.2 Sekundární články-obecně	14
1.1.3 Palivové články	14
1.2 Parametry článků	14
1.2.1 Kapacita článku (C)	14
1.2.2 Napětí článku (U)	15
1.2.3 Energetická hustota	15
1.2.4 Specifická hustota energie	16
1.2.5 Výkonová hustota	16
1.2.6 Vnitřní odpor	16
1.2.7 Maximální počet cyklů	16
1.2.8 Skladovatelnost	16
1.2.9 Maximální trvalý vybíjecí proud	16
1.3 Konstrukční provedení článků a baterií	17
1.3.1 Válcová provedení	17
1.3.2 Knoflíková provedení	18
1.3.3 Prizmatické články	18
1.3.4 Provedení „pouch“	19
1.3.5 Ostatní provedení	19
2 PRIMÁRNÍ ČLÁNKY	20
2.1 Zinko-uhlíkové baterie	20
2.1.1 Leclanchéův článek	20
2.1.2 Moderní zinko-uhlíkové články	21
2.1.3 Alkalické články	23
2.2 Lithiové primární články	25
2.2.1 Lithium-thionyl chloridové články (LiSOCl ₂) (LTC)	25
2.2.2 Dioxid manganatový – lithium článek (LiMnO ₂)	26
2.2.3 Článek lithium-disulfid železnatý (Li-FeS ₂)	27
2.2.4 Ostatní lithiové primární články	27
2.3 Ostatní typy primárních článků	28
2.3.1 Zinko-vzduchový článek	28
2.3.2 Stříbro-oxidový článek	28
3 SEKUNDÁRNÍ ČLÁNKY (AKUMULÁTORY)	29
3.1 Olověné akumulátory	29
3.1.1 Olověný akumulátor se zaplavenými elektrodami	30
3.1.2 Olověný akumulátor AGM	31
3.1.3 Gelové akumulátory	32
3.2 Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd)	32
3.3 Nikl-metal hydridové akumulátory (NiMH)	33

3.4	Lithium-iontové akumulátory (Li-Ion)	35
3.5	Lithium-polymerový články (Li-pol, Li-po)	40
3.6	Akumulátory budoucnosti	41
3.6.1	Akumulátory s pevným elektrolytem (solid-state)	41
3.6.2	Lithium-sírové akumulátory (Li-S)	41
3.6.3	Grafen	42
3.6.4	Ostatní	42
4	PRAKTICKÁ ČÁST	43
4.1	Postup měření	43
4.2	Naměřené hodnoty a průběhy	46
4.2.1	Lithiové primární články	46
4.2.2	Li-ion články	50
4.2.3	Olověné baterie	53
4.2.4	Měření – shrnutí	56
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	60
	PŘÍLOHY	65

Seznam symbolů a zkratek

IoT.....Internet of Things.....Internet věcí

AMR.....Automatic meter reading.....Automatické odečty

BMS..... Battery management system.....Balancér

Úvod

Elektrochemické zdroje proudu (obecně zvané baterie) provázejí civilizaci od počátku používání elektřiny. Za několik staletí prodělaly významný rozvoj a jejich význam neupadá, ale právě naopak – nacházejí stále větší uplatnění zejména s rozvojem přenosné elektroniky, elektromobility, energetických úložišť, internetu věcí atd. V současné době se lze s velkou mírou jistoty domnívat, že poptávka po nich bude stále větší a spolu s ní se budou zvyšovat požadavky na jejich vlastnosti – zejména na výdrž (kapacitu), bezpečnost a u akumulátorů na rychlost dobíjení.

Následující práce se zaměří na zmapování trhu primárních a sekundárních článků. Popíše technologii a možnost využití těch nejběžnějších typů a dále se pokusí odhadnout jejich další možný technologický vývoj.

V praktické části bude úkolem změřit vybrané články za pokojové teploty a za snížených teplot a vyhodnotit jejich vlastnosti za takto rozdílných podmínek.

1 Elektrochemické zdroje proudu

Jako elektrochemické zdroje proudu označujeme zařízení, ve kterých dochází k přímé čili bez dalších mezistupňů, přeměně chemické energie v energii elektrickou. [1][2]

Během vybíjení v nich dochází k chemické reakci aktivních materiálů. Energie této reakce se uvolňuje v podobě stejnosměrného elektrického proudu. [1][2]

Základním stavebním kamenem elektrochemického zdroje proudu je galvanický článek. Tento článek se skládá ze záporné elektrody (anody), kladné elektrody (katody) a elektrolytu. Pro správnou funkci galvanického článku je důležité, aby obě elektrody byly prostorově oddělené a současně musejí být ponořené do elektrolytu. Pokud jsou tyto podmínky splněny, dochází k jevu, který se nazývá galvanismus. Galvanismus je elektrický jev, který nastane, pokud se střetnou dva různé vodiče elektriny. Při styku těchto dvou vodičů na nich vznikne elektromotorické napětí dané rozdílem potenciálů mezi vodiči. [1][2]

Anoda je tvořena z materiálu, který oxiduje během vybíjení článku a uvolňuje elektrony. Má záporný elektrodový potenciál E_A^0 . [1]

Katoda uvolněné elektrony přijímá. Je tvořena z materiálu s kladným elektrodovým potenciálem E_K^0 . [1]

Rozdíl výše zmíněných potenciálů nazýváme bezproudové napětí článku. Jedná se o napětí článku, kterým neprochází žádný proud a můžeme ho vyjádřit rovnicí:[1]

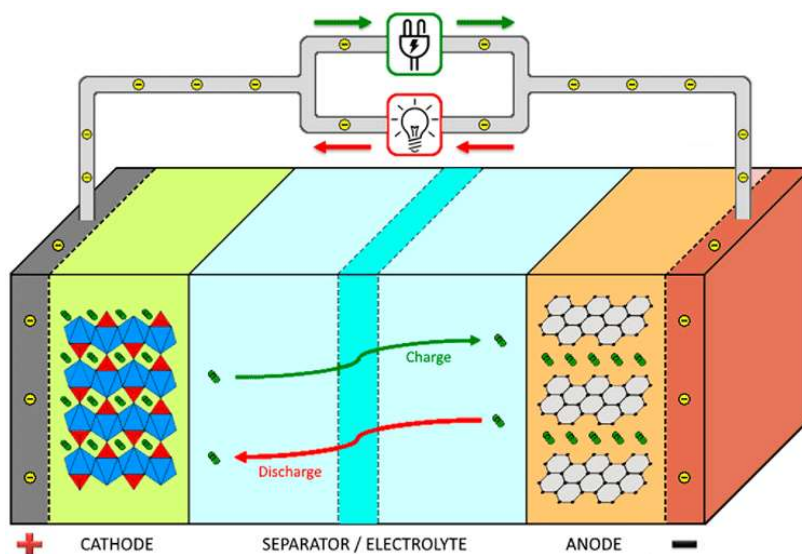
$$U_{ot} = E_K^0 - E_A^0 \quad (1.1)$$

Toto napětí je obvykle vyšší než pracovní napětí U , které je na článku, pokud jím prochází proud. [1]

Elektrolyt je látka, která se v roztoku štěpí na ionty (elektricky nabitě částice), které umožňují vedení proudu. Ionty dělíme na kationty, to jsou částice s kladným znaménkem a

na anionty, což jsou částice se záporným znaménkem. [1]

Separátor se používá pro prostorové oddělení elektrod. Je to polymerová pórovitá membrána, zvlhčená elektrolytem, která zabraňuje elektrickému zkratu mezi anodou a katodou. Separátor působí jako katalyzátor, který podporuje pohyb iontů mezi elektrodami. I přestože separátor propouští ionty, chová se jako izolant. [3]



Obr. 1.1: Galvanický článek [3]

1.1 Základní rozdělení elektrochemických zdrojů proudu

Základní rozdělení galvanických článků je podle principu a funkce. Z tohoto pohledu se dělí na primární články, sekundární články a palivové články. [1]

1.1.1 Primární články-obecně

Primární články jsou články jednorázové čili pouze na jedno vybití. Obsahují omezené množství aktivních materiálů účastnících se elektrochemických reakcí. Při spotřebování aktivních materiálů dojde k vybití článku, který tak ztrácí svoji funkčnost. [1]

1.1.2 Sekundární články-obecně

Sekundární články, známé též pod označením akumulátory, mají stejně jako primární články omezené množství reaktantů, po jejichž spotřebování dochází k vybití článku. Na rozdíl od primárního článku je možné reakční produkty převést zpět v aktivní materiály. Děje se tak za pomoci přivedení elektrického proudu z vnějšího obvodu. Dodávaná elektrická energie se v článku akumuluje ve formě chemické energie. Hlavním rozdílem oproti primárního článku je tedy možnost nabíjení. [1]

1.1.3 Palivové články

Palivový článek potřebuje pro svoji funkci kontinuální přívod paliva, které v článku reaguje s oxidačním činidlem a za vzniku různých sloučenin, v závislosti na typu použitého článku a paliva, dochází k produkci elektrické energie. [4]

Důležité je z článku odvádět reakční zplodiny. Dokud běží přívod paliva a odvod zplodin, články produkují elektrinu a lze je tedy teoreticky provozovat nekonečně dlouho. Životnost článků je však omezena opotřebením jeho jednotlivých komponent. [1]

1.2 Parametry článků

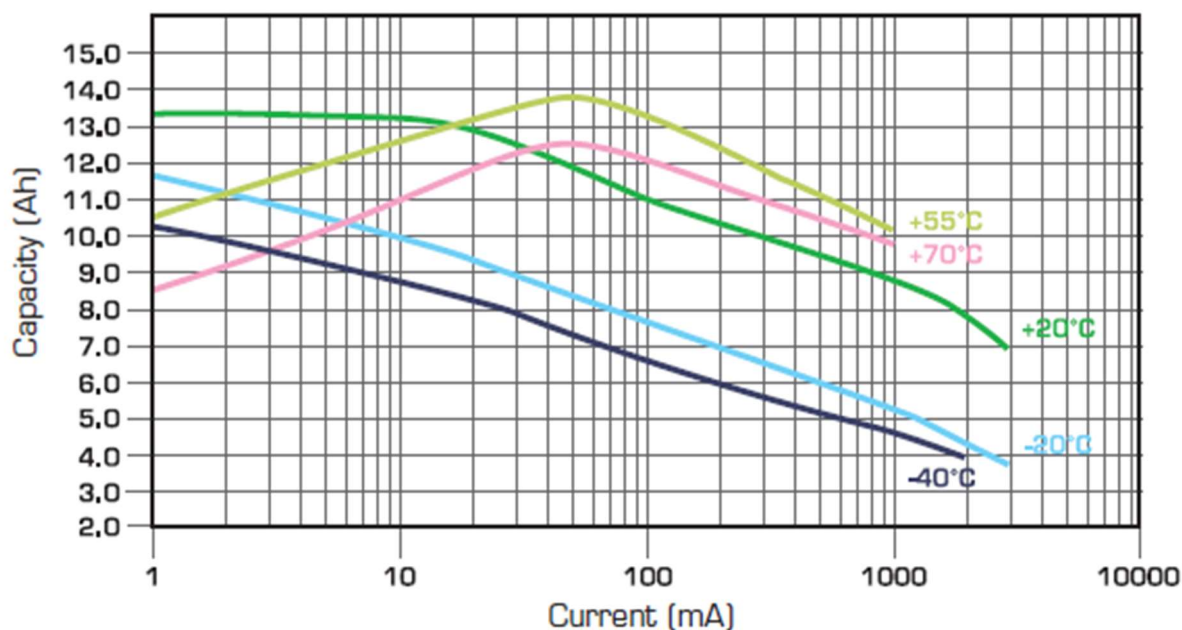
U článků a baterií rozlišujeme širokou škálu ať už čistě elektrických parametrů nebo elektrických parametrů vztažených na parametry například rozměrové.

1.2.1 Kapacita článku (C)

Kapacita článku je množství elektrického náboje, které může tento článek dodat při vybíjení. Kapacita se udává v ampérhodinách (Ah), případně v miliampérhodinách (mAh). U baterií pro elektromobily a pro energetická úložiště se kapacita uvádí ve watthodinách (Wh, kWh, MWh). [4]

Výrobce často uvádí kapacitu za konkrétních podmínek, jako například trvalý vybíjecí proud a okolní teplota. Při provozování článku za rozdílných podmínek se kapacita může výrazně lišit. Příkladem může být primární článek SAFT LSH 20, u kterého výrobce uvádí

kapacitu 13 Ah při okolní teplotě 20 °C a při konstantním vybíjecím proudu 15 mA. Pokud ovšem článek zatížíme větším proudem, nebo bude provozován v rozdílné teplotě, jeho kapacita se změní. Dobře to demonstruje graf z katalogového listu na obrázku 1.2.



Obr 1.2: Porovnání kapacity článku Saft LSH 20 při různých provozních teplotách a různém proudovém odběru.
Zdroj: <https://www.saftbatteries.com/>

1.2.2 Napětí článku (U)

Jmenovité napětí bývá uvedené na výrobku a je stanoveno normou. Jeho velikost se zhruba rovná průměrnému napětí při vybíjení za standardních podmínek. [4]

Skutečné napětí je napětí naměřené na svorkách článku a závisí na stavu nabití článku, okolní teplotě a na dalších faktorech. [4]

1.2.3 Energetická hustota

Energetická hustota je energie, která je vztažena na jednotku objemu článku. Energetická hustota je udávána ve watthodinách na krychlový decimetr případně na litr (Wh/dm^3). Tento parametr závisí na materiálech, ze kterých je článek vyroben a na jeho výrobním uspořádání. [6]

1.2.4 Specifická hustota energie

Je to energie udávaná na jednotku hmotnosti článku (Wh/kg), někdy se též udává jako energie vztažená na jednotku hmotnosti aktivní elektrody. [6]

1.2.5 Výkonová hustota

Výkonová hustota, je výkon článku vztažený na jednotku hmotnosti článku (W/kg). [6]

1.2.6 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor je odpor změřený na svorkách článku. Je závislý na úrovni vybití článku. Čím je baterie více vybitá, tím je větší vnitřní odpor. Čím je vyšší odpor, tím je horší tepelná stabilita, protože proud procházející článkem se mění na teplo, které článek zahřívá. Vnitřní odpor se udává zpravidla v miliohmeh (mΩ). [7]

1.2.7 Maximální počet cyklů

Též životnost, určuje, kolik cyklů vybíjení a nabíjení proběhne, než baterie začne ztrácet svoje požadované vlastnosti. [7]

1.2.8 Skladovatelnost

Skladovatelnost určuje, jak dlouho vydrží článek nabitý, pokud není používán. K jeho svévolnému vybíjení dochází v důsledku nežádoucích vlivů, jako je například koroze. Skladovatelnost je ovlivněna skladovací teplotou a vlhkostí. Skladovatelnost se zpravidla uvádí v měsících nebo rocích, podle druhu baterií. [6] [8]

1.2.9 Maximální trvalý vybíjecí proud

Jedná se o maximální trvalý proud, který může baterie dodávat do zátěže. Je to katalogová hodnota udávaná výrobcem. Pokud by došlo k jejímu překročení, může dojít ke zničení článku nebo k trvalému snížení jeho kapacity. [7]

Často se se vybíjecí i nabíjecí proudy uvádí v takzvaném *C-poměru* (angl. C-rate). Jedná se o bezrozměrné číslo vztažené ke jmenovité kapacitě článku. Je-li například jmenovitá

kapacita 1000 mAh a maximální vybíjecí proud je uveden jako 0,5C, znamená to, že je článek možné vybit proudem nejvýše 500 mAh. [7]

1.3 Konstrukční provedení článků a baterií

Pokud se budeme bavit o provedení, je důležité správně určit, jestli se jedná o článek nebo o baterii. Hovoříme-li o článku, pak se jedná o základní provedení elektrochemického zdroje – zjednodušeně jsou to elektrody, separátor a elektrolyt v pouzdře. Baterie je sestava více článků propojených dohromady. Nicméně mezi širokou veřejností je obvyklé používat výraz baterie i pro samostatné články.

Základní provedení článku můžeme rozdělit na válcové, knoflíkové, prismatické a tzv. pouch (sáčkové) provedení. [53]

1.3.1 Válcové provedení

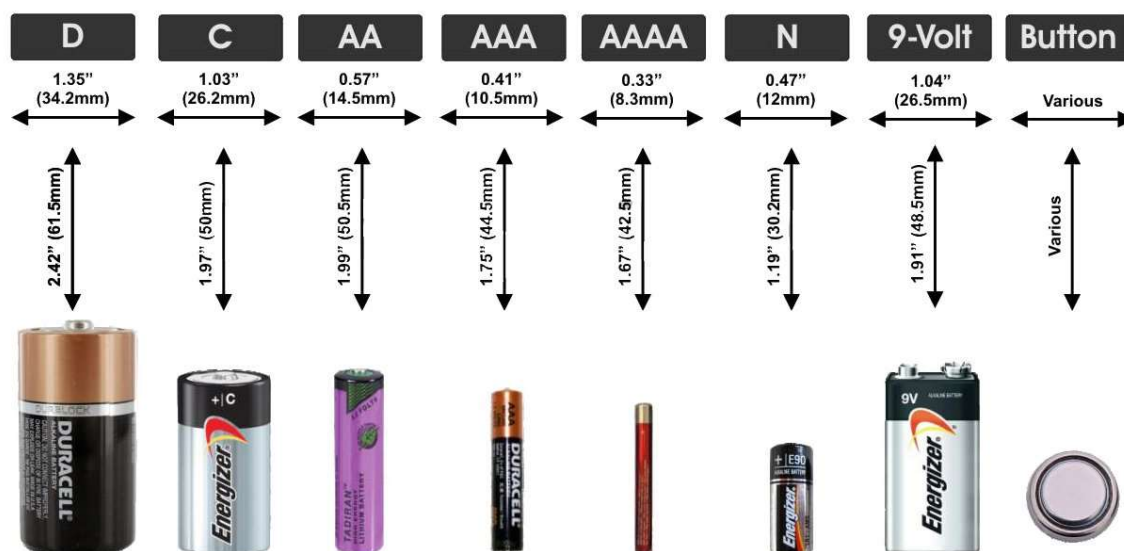
Je to nejběžnější provedení na trhu, které se využívá jak pro primární články, tak i pro akumulátory. Výhoda je mechanická stabilita, přetlaková pojistka a rozměry jsou stabilní i při teplotních výkyvech. V tabulce 1.1 je přehled rozměrů nejběžnějších článků. Z tabulky je zřejmé, že článků označených číselně lze z jejich označení určit rozměry – například článek 18650 má průměr 18 mm a délku 65 mm, poslední číslice určuje tvar, v tomto případě nula znamená válcové provedení. [53]

Tabulka 1.1: Rozměry několika vybraných válcových článků [53]

Označení	Rozměry \varnothing x délka (mm)
A	17 x 50
AA	14,5 x 50
AAA	10,5 x 44,5
AAAA	8,3 x 42,5
1/2 AAA	10,5 x 22
1/3 AAA	10,5 x 16
D	34,2 x 61,5
C	26 x 46
18650	18 x 65
26650	26 x 65
14500	14 x 50
21700	21 x 70

1.3.2 Knoflíková provedení

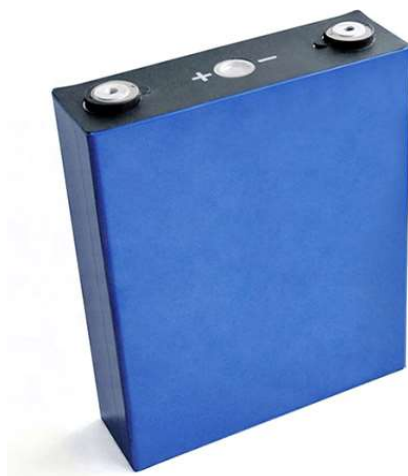
Tento tvar článků nachází uplatnění zejména v hodinkách, naslouchadlech, hračkách nebo jako zálohovací zdroje pro paměti. Mezi nejpoužívanější typ patří CR2032, z jehož označení můžeme opět vyčíst rozměry – průměr článku je 20 mm a výška 3,2 mm. [54]



Obr 1.3: Příklady provedení různých článků a baterií. Zdroj: <https://technoluxpro.com/en/batareiki/vidy.html>

1.3.3 Prizmatické články

Prizmatické články jsou konstruovány ve tvaru úzkého kvádru a nevyrábí se ve standardizovaných rozměrech, ale zpravidla na míru určenému zařízení. Využití tak mají zejména v mobilních telefonech nebo ve větších provedeních jako články baterií pro energetická úložiště. [53]



Obr. 1.4: Prismatický článek pro energetické úložiště. Zdroj: <https://www.gspower.com>

1.3.4 Provedení „pouch“

Toto provedení se používá zejména pro Li-pol technologii. Takové články jsou velmi ohebné, lehké a úsporné z hlediska prostoru.



Obr. 1.5: Článek v provedení "pouch". Zdroj: <https://batteryuniversity.com/>

1.3.5 Ostatní provedení

Mezi další provedení můžeme zařadit například 3R12, což je dnes už málo rozšířená baterie běžně označována jako „plochá“, která se uvnitř skládá ze tří 1,5 V článků. Mnohem populárnější je baterie PP3 známá jako 9 V baterie (na obrázku 1.3 druhá zprava), která je složená ze šesti 1,5 V článků, jejichž provedení může být různé v závislosti na výrobci, technologii atd.

2 Primární články

Jak už bylo výše zmíněno, hlavní vlastností primárních článků je, že jsou pouze na jedno použití – chemická reakce při vybíjení není vratná čili po vybití je není možné nabít.

Obecně mají primární články velkou kapacitu, vyšší specifickou hustotu energie a vyšší napětí naprázdno než sekundární články se srovnatelným chemickým složením. Dále mají vysoký vnitřní odpor, což omezuje jejich použití na aplikace, které nevyžadují velký proudový odběr. [6]

Mezi výhody primárních článků patří: vysoká hustota energie, dlouhá výdrž do vybití, cena, dlouhá doba skladovatelnosti. Nevýhody jsou: jednorázové použití, tím pádem i větší ekologická zátěž, limitovaný proudový odběr. [9]

Primární články se využívají v přenosných zařízeních, medicíně, hračkách, hodinkách atd. [9]

2.1 Zinko-uhlíkové baterie

Články založené na zinkových elektrodách jsou již více než 150 let nejpoužívanější primární zdroje. Jejich základní komponenty zůstávají od počátku stejné a než se dostaly do dnešní podoby, prošly pouze relativně malými úpravami. [6]

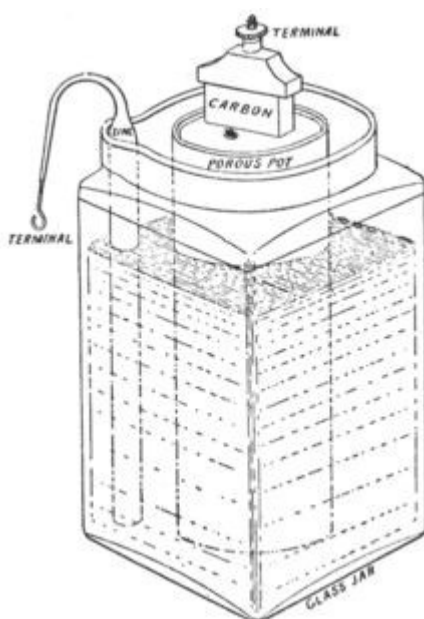
2.1.1 Leclanchéův článek

První primární článek byl vyvinut v roce 1866 Georgesem Lionelem Leclanchém a používal se primárně pro napájení telefonních přístrojů. Jedná se historicky o první baterie, kde byl použit chlorid amonný¹ (NH₄Cl) jako elektrolyt. Do té doby tvořily elektrolyt jen silné kyseliny. [6] [10]

V Leclanchéově článku je skleněná nádoba, který slouží jako hlavní nádoba baterie,

¹ V některé literatuře též zvaný jako salmiak

naplněný elektrolytem (chlorid amonný). Do elektrolytu je ponořena zinko-rtuťová tyčinka, která má funkci anody. Dále je nasypána směs oxidu manganického² (Mn_2O) s obsahem malého množství práškového uhlíku do pórovité nádoby a do této směsi se vloží uhlíková tyčinka. Tento celek dohromady tvoří katodu. Chemická reakce tvořící napětí vznikne po ponoření této naplněné pórovité nádoby do výše zmíněné skleněné nádoby obsahující elektrolyt a anodu. Napětí takového článku je 1,5 V a kapacita 224 Ah/kg. [6]



Obr 2.1: Nákres Leclanchéova článku z roku 1919. Zdroj: <https://cs.wikipedia.org/>

Zpočátku byl v komerčním využití Leclancheův článek používán pro domovní zvonky, ale postupně se stal zdrojem pro přenosná rádia, kapesní svítilny a telefony. Článek se v původním provedení již nepoužívá, nicméně se stal základem pro moderní primární články. [6]

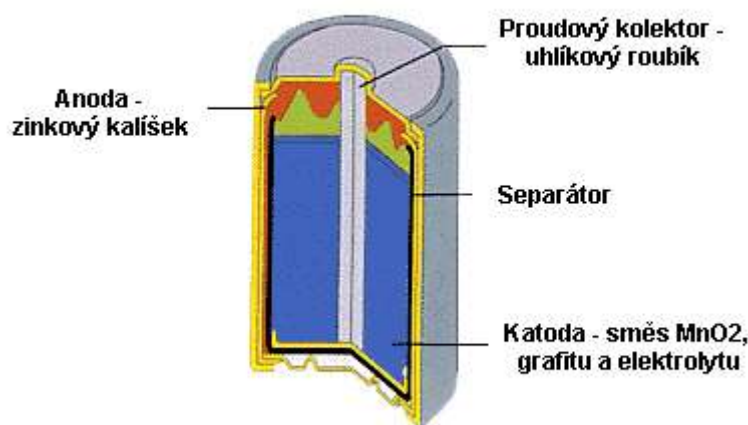
2.1.2 Moderní zinko-uhlíkové články

Nástupcem Leclanchéových článků se staly takzvané suché články. Suché, protože elektrolyt není tekutý, ale je proveden ve formě vlhčené pasty. Oproti původnímu provedení Leclanchéova článku, kdy byl tekutý elektrolyt v křehké skleněné nádobě, se nemusíme

² Ve starší literatuře zvaný burel

obávat citlivosti článku na mechanické poškození a můžeme ho v aplikacích umísťovat v různých polohách. [11]

Na obr. 2.2 je zobrazeno jedno z nejpoužívanějších provedení současných zinko-uhlíkových článků. Zinek zde funguje současně jako anoda i plášť článku. Katoda je složena z oxidu manganičitého, práškového uhlíku a elektrolytu. Elektrolyt tvoří buď chlorid amonný, případně (pro náročnější aplikace) chlorid zinečnatý s malým množstvím chloridu amonného³. Směs oxidu manganičitého a práškového uhlíku je navlhčena elektrolytem a vytvarována do válce s otvorem uprostřed. Do tohoto otvoru je zasunuta uhlíková tyčinka, která funguje jako sběrač proudu. Separátor tvoří buď celulózová vlákna, silný papír potažený cereální pastou nebo savý sulfátový papír. [6]



Obr 2.2: Běžné provedení současných zinko-uhlíkových článků. Zdroj: <http://www.battex.info/>

Napětí takového článku je mezi 1,5 V – 1,7 V, kapacita 40 Ah/kg a specifická hustota energie se pohybuje mezi 55-77 Wh/kg. [6]

Nevýhoda konstrukce takového článku je ta, že při chemické reakci dochází k uvolňování vodíku (H₂), který musí být absorbován, aby nedošlo k nárůstu vnitřního tlaku

³ Takové články se občas zařazují do samostatné podkategorie a označují se jako zinko-chloridové

v článku. Další nevýhodou jsou malá hustota energie a krátká skladovatelnost. [6]

Zinko-uhlíkové články mají využití v nenáročných aplikacích jako jsou hračky, dálkové ovladače, nástěnné hodiny a z toho vyplývá i jejich vyráběné provedení – články rozměru AA, AAA atd. Nejeftivnější využití kapacity mají zinko-uhlíkové články při krátkém vyšším proudovém odběru. Je-li doba mezi jednotlivými vybíjeními dostatečně dlouhá, kapacita roste. Proto tyto baterie mají uplatnění také ve fotografických blescích. [2]

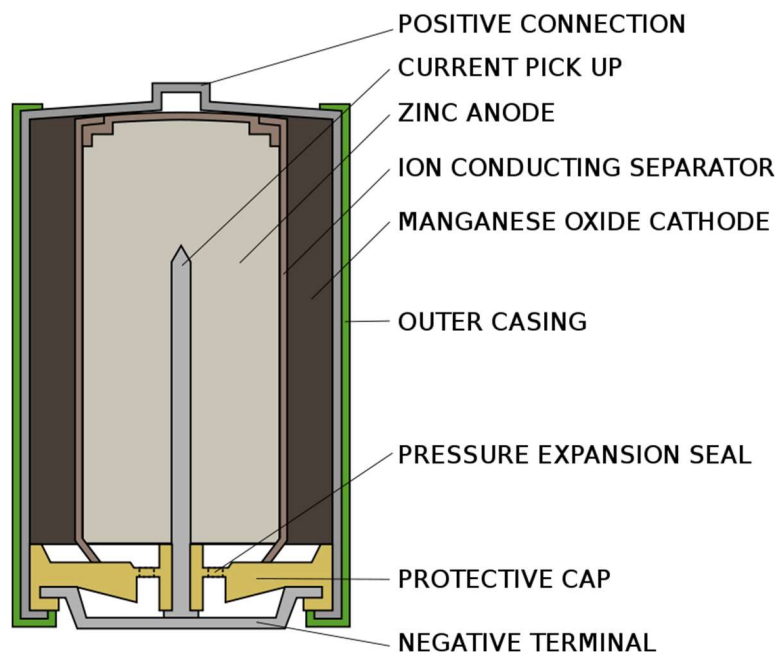
Ceny těchto článků v rozměrech AA, AAA začínají pod hranicí deseti korun. Z praktického hlediska má v současné době význam je použít například pro dálkové ovladače. Pro aplikace, kde je třeba trvalý odběr, je z pohledu ceny a výkonu výhodnější použít články alkalické

2.1.3 Alkalické články

Postupný vývoj zinko-uhlíkových článků cílil na vylepšení jejich skladovatelnosti a energetické hustoty pro jejich využití v náročnějších aplikacích a současně, aby byly šetrnější k životnímu prostředí. Tento vývoj vyústil ke vzniku alkalických baterií, z kterých se staly nejpoužívanější jednorázové baterie na trhu. [6]

Základ alkalických článků je stejný jako u zinko-uhlíkových baterií – elektrody tvoří zinek, uhlík a oxid manganičitý. Hlavní rozdíl je ale v použitém elektrolytu, který obsahuje hydroxid draselný (KOH). Draslík patří mezi alkalické kovy a dal tak i vzniknout pojmenování těchto článků. Hydroxid draselný má velkou vodivost a tím pádem má článek malý vnitřní odpor. V katodě je použit syntetický oxid manganičitý, což zvyšuje kapacitu článku, dále je v anodě použit jemný uhlíkový prášek, který má výborné vodivé a absorpční vlastnosti. Anodu zde tvoří vnější poniklovaný ocelový plášť a gelová směs, která se skládá z práškového mixu zinku a rtuti smíchaného s elektrolytem. Do této směsi je zasazen mosazný kolík, který funguje jako sběrač proudu a jehož druhý konec je spojen s anodovým pólem článku. Separátor je mikroporézní tkaný nebo plstěný materiál, případně je tvořen ze syntetických vláken, která jsou schopna odolávat vysokému pH alkalického elektrolytu. V porovnání se zinko-uhlíkovým článkem je alkalický článek konstruován „naruby“ – katoda je umístěna kolem anody, což vede k nižšímu vnitřnímu odporu a lepším difúzním

vlastnostem článku. [6]



Obr 2.3: Konstrukce alkalického článku. Zdroj: <https://cs.wikipedia.org/>

Napětí nezátíženého článku je 1,65 V, ale pro komerční účely se udává 1,5 V. Kapacita je více než 65 Ah/kg. Specifická hustota energie se pohybuje mezi 66-99 Wh/kg. [6]

Z výše uvedeného vyplývá, že kapacita je přibližně o 30% vyšší než klasických zinko-uhlíkových článků. Další výhodou alkalických článků je, že kapacita není příliš závislá na odebíraném proudu – mohou být dlouhodobě zatěžovány vyšším proudem. [2] [6]

Nevýhodou je, že zinek postupně koroduje v alkalickém elektrolytu, přičemž dochází, stejně jako u klasického zinko-uhlíkového článku, k uvolňování vodíku, který způsobuje tlak v článku. K potlačení této reakce se zinek leguje například rtutí nebo olovem, což ale k vede vyšší ekologické zátěži při výrobě a recyklaci. Dále je nutné konstruovat článek tak, aby mohlo docházet k samovolnému úniku plynu. [6] [12]

Vzhledem ke kapacitě, možnému proudovému zatížení a přijatelné ceně jsou alkalické články nejvíce prodávanými jednorázovými elektrochemickými zdroji na trhu. Nejčastěji se používají v dálkových ovladačích, hračkách, přenosné elektronice, kapesních svítilnách a

podobných aplikacích. Konstrukčně se nejvíce prodávají v provedení AA, AAA. [6]

Cena nejlevnějších alkalických článků se pohybuje přibližně do 10 Kč/ks do 30 Kč/ks. Jsou dostupné v obchodech s elektrem, v hypermarketech a supermarketech, v novinových stáncích atd.

2.2 Lithiové primární články

Narůstající potřeba větší kapacity baterií při stejných nebo menších rozměrech vedla k vývoji lithiových článků. Lithium tvoří anodu, katoda je směs tvořená uhlíkem a aktivním materiálem například s oxidem manganičitým, chloridem thionylu atd. [6]

Základem lithiových článků je lithium. Lithium je nejlehčí kov o hustotě menší, než má voda. Elektrodový potenciál lithia je -3.05 V a kapacita 3860 Ah/kg. Nevýhoda lithia spočívá v tom, že velmi prudce reaguje s vodou a na vzduchu. Z tohoto důvodu není možné používat elektrolyty z vodných roztoků. Místo nich se aplikují organické elektrolyty, které mají menší vodivost, která zároveň vede k nízkému samovybíjení článků a tím pádem je možné používat lithiové baterie v zařízeních, u kterých se vyžaduje dlouhodobá výdrž. Vzhledem k reaktivnosti lithia, musí být články konstruované tak, aby nedošlo k jejich snadnému poškození a tím pádem nepřišly lithiové části do kontaktu se vzduchem nebo vodou. [6]

2.2.1 Lithium-thionyl chloridové články (LiSOCl₂) (LTC)

Článek je tvořen lithiovou fólií, která tvoří anodu a kapalnou směsí chloridu thionylu s uhlíkem tvořící katodu. Obě elektrody jsou umístěny v organickém elektrolytu, který obsahuje lithiové soli například lithium-tetrachloridohlinitan (Li(AlCl₄)). Kontaktem lithia s elektrolytem vzniká na povrchu anody takzvaná pasivační vrstva. Tato vrstva brání toku iontů mezi anodou a katodou, z čehož plyne velmi nízké samovybíjení článků a tím pádem dlouhá skladovatelnost. Tloušťka pasivační vrstvy narůstá s dobou uskladnění článku. Nevýhodou pasivace je riziko poklesu napětí článku při připojení zátěže po dlouhodobém skladování. [6] [13]

Jmenovité napětí naprázdno takového článku je 3,6 V. Specifická hustota energie se uvádí od 300 Wh/kg až po 710 Wh/kg. [6] [14]

Některé výhody jsou zjevné už z výše uvedeného, zejména se jedná o velkou energetickou hustotu a vyšší napětí článku. Další výhodou jsou ploché průběhy vybíjecích křivek, z toho vyplývá, že článek má tendenci držet konstantní napětí téměř až do vybití. [6] [14]

Lithium-thionyl chloridové články se používají tam, kde je vyžadován malý proudový odběr po dlouhou dobu. Mají využití v medicíně, v zařízeních pro internet věcí (IoT), v přístrojích pro dálkový odečet energií (AMR), v armádních přístrojích, v GPS atd. Tyto články patří mezi nejvýkonnější a nejúčinnější a měly by být používány pouze zkušenými uživateli. Z tohoto důvodu se nepoužívají v běžné spotřební elektronice a prodávají se spíše v obchodě specializovaných na prodej elektronických součástek anebo přímo na prodej baterií. [12] [14]

Na trhu existuje několik výrobců LiSOCl₂ článků. Jsou to například firmy Saft, Tadiran, Fanzo, Eve a další. Články jsou nejčastěji vyráběny v provedení C, D, 1/2AA, ale i například AA se speciálně upravenými vývody pro montáž do plošných spojů. Cenově se pohybují zhruba kolem 200-300 Kč (provedení C), 300-500 Kč (D), 50-100 Kč (1/2AA).

2.2.2 Dioxid manganitý – lithium článek (LiMnO₂)

Tyto články mají lithiovou anodu a katoda je tvořena manganem. V principu se jedná o články podobné lithium-thionyl chloridovým. Oproti LTC článkům mají nižší napětí 3-3,3V a také menší specifickou hustotu energie – přibližně 280 Wh/kg. Výhodou oproti LTC je vyšší bezpečnost článku. [12]

LiMnO₂ články se vyrábějí v různých válcových provedení a používají se, podobně jako LTC, v AMR aplikacích, v armádních zařízeních, v medicíně, ve fotoaparátech. Velmi často se prodávají v knoflíkovém provedení (například CR2032), které se používají pro dálkové ovladače, hodinky atd. [15]

Články v knoflíkovém provedení jsou dostupné pro běžné spotřebitele v kamenných i internetových obchodech s elektronikou, v supermarketech atd. Výrobci jsou například Panasonic, Varta, Murata, Energizer. Cenově se pohybují v řádu desítek Kč v závislosti na rozměrech. Válcová provedení se dají koupit, podobně jako LTC, ve specializovaných obchodech s elektronickými součástkami, v obchodech s fotografickým sortimentem atd. Vyrábí je například firmy Varta, Saft apod. cenově se pohybují kolem 300 Kč (rozměr 1/2AA), 100-200 Kč (rozměr 123A).

2.2.3 Článek lithium-disulfid železnatý (Li-FeS₂)

Tyto články patří mezi nejnovější technologii mezi primárními články. Mají jmenovité napětí 1,5 V a tím pádem jsou alternativou k alkalickým článkům. Oproti alkalickým mají vyšší kapacitu, kapacita je až 7x vyšší než u alkalických článků, a nižší vnitřní odpor. To umožňuje jejich použití v aplikacích, které vyžadují větší proudový odběr. Jejich další výhodou je výkon za nižších teplot a velmi nízké samovybíjení – jejich skladovatelnost je až 15 let. Nevýhodou jsou omezené možnosti přepravy zejména v letecké přepravě. Další nevýhodou je vyšší cena. Je také nutné dbát na správně připojenou polaritu, články se nesmí spojovat se články s rozdílnou technologií, jinak hrozí nebezpečí výbuchu článku. [12]

Jakožto alternativa k alkalickým článkům se LiFeS₂ nejčastěji vyrábějí v provedení AA nebo AAA. Využití mají například jako zdroje energie pro fotopasti, pro přenosné MP3 přehrávače, hračky. Tento typ článků vyrábí například společnosti Tinko, Minamoto, Energizer, GP batteries. Cenově se LiFeS₂ články pohybují od 50 Kč do 100 Kč. Jsou dostupné ve specializovaných obchodech.

2.2.4 Ostatní lithiové primární články

Mezi další články, se kterými se můžeme setkat patří například jsou články na bázi lithium-oxidu siřičitého (Li-SO₂). Jsou to články používané zejména pro armádní účely. Jmenovité napětí mají 2,8 V, specifickou energetickou hustotu 330 Wh/kg a mají široký teplotní rozsah. Dostupné jsou ve specializovaných internetových obchodech, ale jejich nabídka není příliš široká. [12]

Dále můžeme zmínit lithium-iodinové články, které mají využití výhradně jako zdroje pro kardiostimulátory, kde nahradily články zinko-rtuťové. Výhoda lithium-iodinových článků spočívá v dlouhé výdrži – dokáže napájet kardiostimulátor 5 až 10 let. [16]

2.3 Ostatní typy primárních článků

2.3.1 Zinko-vzduchový článek

U tohoto typu článků dochází k elektrochemické reakci vlivem kontaktu kyslíku ze vzduchu a zinku. Nové články se dodávají přelepené nálepkou, která zabraňuje přístupu vzduchu dovnitř článku. Po odlepení nálepky dojde během několika sekund ke spuštění elektrochemické reakce. Specifická hustota energie činí 300-400 Wh/kg, ale výkonová hustota je malá. Článek je velmi citlivý na změnu teploty a na vysokou vlhkost. Výhodou jsou nízké výrobní náklady. Kromě primárních existují také v nabíjecí verzi. [17]

Zinko-vzduchové články se používají zejména jako baterie do naslouchadel vyráběné v knoflíkovém provedení. Výrobci jsou například Energizer, Rayovac, GP Batteries. Dostupné jsou v prodejnách se zdravotnickými potřebami a v obchodech s elektronickými součástkami. Cenově se pohybují kolem 10-20 Kč za kus, prodávají se zpravidla v balení po více kusech.

2.3.2 Stříbro-oxidový článek

Tyto články se vyrábí kvůli vyšší ceně stříbra pouze v malých provedeních. Jmenovité napětí mají 1,6 V. Výhodou je malé samovybíjení, dlouhá výdrž, ploché vybíjecí průběhy. Oproti zinko-vzduchovým článkům mají lepší vlastnosti za nízkých teplot, na druhou stranu mají menší energetickou hustotu. [18]

Stříbro-oxidové články se používají zejména a k napájení hodinek a naslouchadel. Provedení je zejména knoflíkové. Cenově se pohybují v desítkách Kč za kus. Jsou dostupné v obchodech s elektronikou, v hodinářstvích atd. Vyrábí je většina výrobců baterií.

3 Sekundární články (akumulátory)

3.1 Olověné akumulátory

Olověné články jsou prvním vyvinutým typem akumulátorů. Byly vyvinuty již roku 1859 francouzským fyzikem Raymondem G. Plantém. Přestože je jejich historie poměrně dlouhá, stále patří mezi nejprodávanější akumulátory na trhu. [1] [6]

Základ olověného akumulátoru tvoří anoda z olova s pórovitou nebo houbovitou strukturou, zatímco katoda je vyrobena z porézního oxidu olovičitého (PbO_2), separátor je zpravidla mikroporézní polyethylen. Poréznost elektrod zvětšuje jejich aktivní plochu. Konstrukčně jsou elektrody provedeny ve tvaru mřížky. Jelikož je olovo příliš měkké, přidávají se do něj, pro zlepšení mechanických (i elektrických) vlastností, další prvky jako například antimon, cín, vápník. Obě elektrody jsou ponořeny do kyselého elektrolytu, čímž vzniká elektrochemická reakce, jejímž výsledkem je napětí článku 2,05 V. Specifická hustota energie se udává mezi 30-40 Wh/kg. [6] [19] [20]

Jednou z nevýhod olověných akumulátorů je riziko sulfatace. Sulfatace vzniká, pokud je akumulátor dlouhodobě skladován nenabitý. V takovém případě se mění amorfní síran olovnatý (PbSO_4), který vzniká redukcí elektrodového materiálu při vybíjení, na krystalický a začne se ukládat na anodě ve formě velkých krystalů, které tím pádem zmenší plochu aktivního materiálu a článek ztrácí svoje vlastnosti. Pokud trvá tento děj déle, je prakticky nevratný. Proto, pokud se setkáme bezúdržbovými bateriemi, nebude výraz bezúdržbový zcela přesný – je nutné hlídat úroveň nabití akumulátorů. [1] [21]

Podle využití můžeme olověné akumulátory dělit na startovací a trakční. Jak už název napovídá, startovací baterie se používají zejména v automobilech pro startování motorů. Takové akumulátory musejí být schopny dodat velký proud po krátkou dobu (jednotky sekund). Jejich vnitřní odpor je malý, čehož se dosahuje přidáním elektrodových desek pro zvětšení činné plochy. Konstrukčně se startovací baterie orientují spíše na okamžitý dodaný výkon než na kapacitu. [20]

Trakční baterie se vyrábějí pro trvalé dodávání energie čili je u nich důležitá kapacita a

co největší maximální počet cyklů. Zároveň se u nich, na rozdíl od startovacích akumulátorů, předpokládá hluboké vybití. Pro dosažení těchto vlastností se akumulátory vyrábějí s robustními elektrodami. Využití mají například v malých elektrických vozících, jako baterie v nouzových osvětleních, v zabezpečovacích systémech nebo v solárních elektrárnách. [20]

Trakční a startovací akumulátory se nesmí zaměňovat. Startovací baterie jsou velmi citlivé na hloubku vybití. Z tabulky 1 je zřejmé, že jsou-li vybité příliš, velmi výrazně to zkracuje jejich životnost. [20]

Na trhu jsou dostupné i tzv. duální baterie, které lze použít zároveň jako startovací i jako trakční.

Tabulka 3.1: Porovnání životnosti startovacích a trakčních olověných akumulátorů s ohledem na hloubku vybití [20]

Hloubka vybití	Životnost – startovací akumulátory	Životnost – trakční akumulátory
100 %	12–15 cyklů	150-200 cyklů
50 %	100–120 cyklů	400-500 cyklů
30 %	130–150 cyklů	Více než 1000 cyklů

3.1.1 Olověný akumulátor se zaplavenými elektrodami

Pokud je elektrolyt tvořen kyselinou sírovou (H_2SO_4), hovoříme o takzvaném zaplaveném akumulátoru. Zaplavený proto že elektrody jsou kompletně ponořeny v elektrolytu. Nevýhoda takového řešení spočívá v tom, že při nabíjení dochází k rozkladu vody v elektrolytu na vodík a kyslík, takže akumulátory musejí být konstrukčně řešeny tak,

aby mohlo přes ventil docházet k úniku těchto plynů ven. Zároveň tímto rozkladem dochází k poklesu elektrolytu, který tak musí být doplňován destilovanou vodou. Tento problém částečně řeší ventilem řízené akumulátory, kdy se vyvíjený kyslík z katody směřuje na anodu, kde se přeměňuje na vodu. Ventilem řízené akumulátory se označují též jako bezúdržbové. Výhodou zaplavených akumulátorů je snadná dostupnost na trhu, možnost hlubokého vybití a dobré vlastnosti za vyšších teplot. [20] [22]

Tento typ akumulátoru se vyrábí nejčastěji jako baterie s napětím 12 V, případně 6 V, 24 V atd. Využití má jak v provedení pro startovací, tak i pro trakční baterie. Na trhu existuje velká řada výrobců jako například Varta, Banner, Bosch a další. Startovací baterie se vyrábějí v kapacitách od cca 40 Ah až po 110 Ah. Cenově se nejčastěji pohybují v přepočtu od 30 Kč/Ah do 50 Kč/Ah. Dostupné jsou ve specializovaných obchodech, v prodejnách autodílů, ale i v supermarketech a dalších obchodech. Trakční baterie se vyrábějí ve stejných napěťových hladinách jako akumulátory startovací, ale rozsah kapacit je podstatně vyšší – až tisíce Ah. Výrobci jsou shodní jako u startovacích baterií i cenový rozsah je podobný. Je možné je koupit ve specializovaných obchodech.

3.1.2 Olověný akumulátor AGM

Modernější řešení olověných článků představuje AGM technologie (z angl. absorbent glass mat). V těchto akumulátorech je elektrolyt nasáklý v netkané tkanině ze skelných vláken, tím pádem není v tekutém stavu. Výhodou takového uspořádání je možnost umístit akumulátor v libovolné poloze (nehrozí vylití elektrolytu), další výhodou AGM, oproti článku se zaplavenými elektrodami, je menší vnitřní odpor a tím pádem i vyšší maximální okamžitý proud a rychlejší nabíjení. AGM akumulátory se považují za bezúdržbové. [20] [21]

AGM baterie se konstrukčně vyrábějí ve stejných napěťových hladinách jako předešlý typ. Využití mají ve středně náročných aplikacích do kapacity přibližně 100 Ah. Používají se například jako motobaterie, v automobilech se start-stop systémy, jako baterie v záložních zdrojích (UPS), v zabezpečovací technice, nebo jako akumulátory pro karavany. U autobaterií jsou výrobci stejní jako u akumulátorů se zaplavenými elektrodami, baterie pro záložní zdroje jsou vyráběny například firmami Europower, BPower, Qoltec. AGM

baterie se cenově pohybují od cca 60 Kč/Ah do 100 Kč/Ah. Je možné je koupit ve specializovaných obchodech s autodíly, s bateriemi a s elektronickými součástkami. [20] [22]

3.1.3 Gelové akumulátory

Gelové olovené akumulátory fungují na stejném principu jako předešlé typy, ale liší se konzistencí elektrolytu, který je tvořen křemičitým gelem a kyselinou sírovou. Tento typ článků se taktéž označuje jako bezúdržbový.

Jejich výhodou jsou lepší vlastnosti než u AGM technologie při cyklech, kdy dochází k vybití na 20-80 %, dále lepší vlastnosti pro aplikace s menším výkonem a mají lepší odvod tepla, což vede k delší životnosti. Nevýhodou je vyšší vnitřní odpor, vyšší samovybití, horší vlastnosti při nižších teplotách a při vybití pod 20 % kapacity. [22] [23]

Gelové baterie se nejčastěji vyrábějí se jmenovitým napětím 6 V, 12 V, 24 V a s kapacitami přibližně do 200 Ah. Využití mají jako motobaterie a trakční akumulátory využívané například jako zdroj energie v karavanech a na lodích, dále jako akumulátory pro nouzová osvětlení, mobilní dopravní značení atd. Ceny se nejčastěji pohybují v rozmezí 90-110 Kč / Ah. Výrobou se zabývají například společnosti Varta, Banner, Goowei.

3.2 Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd)

Základ těchto článků je známý již více než sto let a jedná se tak o první prakticky využitelné alkalické akumulátory. Katodu ve vybitém stavu tvoří hydroxid nikelnatý (Ni(OH)_2), který se při nabíjení mění nikloxihydroxid (dvojmocný nikl přechází na trojmocný), zatímco anodu tvoří hydroxid kademnatý (Cd(OH)_2), který se nabíjením mění na kadmium. Elektrolyt je tvořen směsí hydroxidu draselného (KOH) a destilované vody. Jmenovité napětí takového článku je 1,2 V, specifická hustota energie 40-60 Wh/kg. [5]

Výhodou těchto článků je vysoká spolehlivost, možnost velkého proudové zatížení, téměř konstantní napětí až do vybití, možnost rychlého nabíjení, mechanická odolnost. Nevýhodami jsou menší specifická hustota energie a výkonová hustota. Mezi specifické

nevýhody NiCd se počítá tzv. paměťový efekt, což je jev, který vzniká při opakovaném (50x – 100x) vybíjení článku na malou, ale pokaždé stejnou, hloubku vybití. Tento proces mění krystalovou strukturu anody. V praxi se to projevuje jako náhlý pokles napětí (o 50-100 mV) při vybíjení. Ovšem hlavní nevýhodou je použití kadmia, které je vysoce škodlivé k životnímu prostředí, což vedlo k postupnému omezení NiCd akumulátorů na trzích v Evropské unii směrnicí 2013/56/EU. [5] [24]

I přes výše zmíněnou směrnici se dají akumulátory na trhu sehnat, ale zejména pro profesionální průmyslové využití nebo jako náhradní díl pro starší bezšňůrové nářadí. Prodávají se zpravidla jako tzv. akupacky (sestavy více kusů článků), případně jako jednotlivé články pro tyto sestavy. Takovéto akupacky se využívají zejména pro nouzová osvětlení, poplašné systémy a v medicíně. Je možné je koupit ve specializovaných obchodech.



Obr 3.1: Zálohovací NiCd akupack určený pro poplašnou sirénu. Zdroj: www.jabloshop.cz

3.3 Nikl-metal hydridové akumulátory (NiMH)

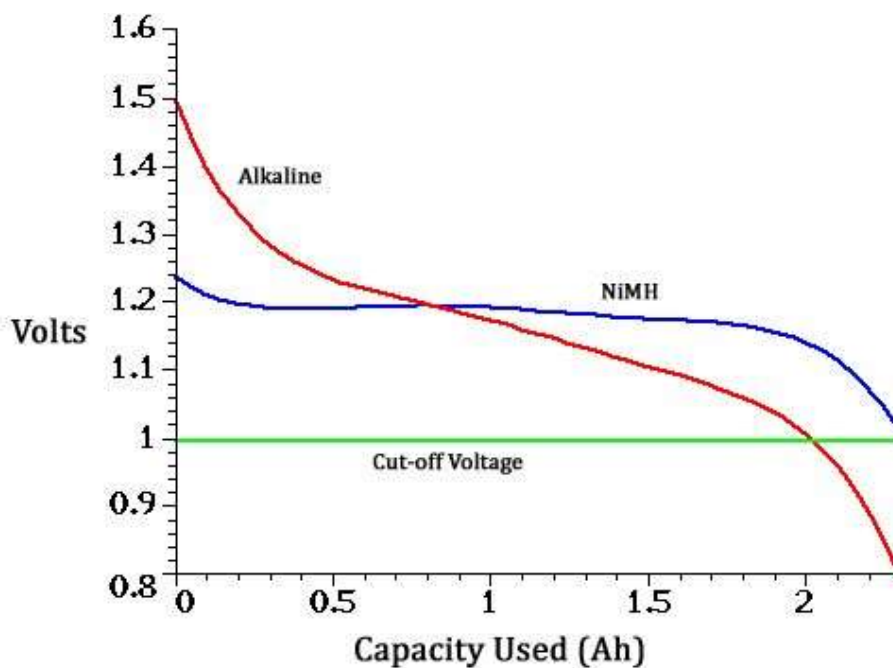
NiMH akumulátory byly vyvíjeny od sedmdesátých let minulého století jako náhrada za NiCd články. Důvodem je výše zmíněná ekologická zátěž. Katoda je, stejně jako u NiCd akumulátorů, tvořena hydroxidem nikelnatým, zatímco anodu tvoří elektrochemicky aktivní kovová slitina, která při nabíjení a vybíjení dokáže vázat a uvolňovat vodík. Tyto slitiny jsou obecně označovány jako AB, kde A znamená kov, jehož hydridy způsobují exotermickou reakci a B jsou kovy produkující endotermickou reakci. Varianty slitin jsou například AB, AB₂, A₂B, AB₅. Jako prvek A se ve slitinách používají například titan, zinek, hořčík a prvky

vzácných zemin, zatímco B může být železo, mangan, nikl atd. Elektrolyt je alkalický, zpravidla ho tvoří hydroxid draselný. Napětí jednoho článku je 1,2 V, specifická hustota energie 70-80 Wh/kg. [6] [25]

Ve srovnání s NiCd akumulátory mají NiMH větší energetickou hustotu, jsou šetrnější k životnímu prostředí a nepodléhají paměťovému efektu. Nevýhodami oproti NiCd je kratší životnost, větší samovybíjení – plně nabité akumulátory mohou za jeden měsíc ztratit až 30% nabitě kapacity a při dlouhodobém uskladnění vybitého akumulátoru, může dojít i k trvalé ztrátě kapacity. Výjimkou jsou články od firmy Panasonic, která nabízí pod názvem Eneloop NiMH články, které mají podstatně menší samovybíjení a vydrží uskladněny až 6x déle oproti běžným článkům. [26] [27]

Nikl-metal hydridové články nabízejí výrobci jako alternativu k alkalickým primárním článkům. Vyrábějí se tedy pro tyto účely v provedení AA, AAA atd. Nižší napětí oproti alkalickým článkům není problémem, protože, jak ukazuje obrázek 3.2, vybíjecí křivka NiMH má plochý průběh, zatímco napětí alkalické baterie klesá téměř lineárně. Výhodou oproti primárním článkům je možnost opakovaného použití, ale vzhledem k velkému samovybíjení je nevhodné je používat v aplikacích, které se používají méně často. NiMH akumulátory se používají také jako zdroje pro robotické vysavače, přenosné hudební přehrávače, ale i v elektromobilitě – jsou použity v hybridním automobilu Toyota Prius, kde 168 článků tvoří baterii o špičkovém výkonu až 27 kW. [28]

Kromě zmíněných AA a AAA provedení a jejich derivátů (1/3 AAA, 2/3 AAA atd.) se články vyrábějí v knoflíkových verzích, nebo v bateriích poskládaných z knoflíkových provedení. Články AA/AAA cenově začínají na 30 Kč/ks až po ceny kolem 100 Kč/ks. Dostupné jsou v obchodech s elektronikou nebo ve specializovaných prodejnách. Mezi výrobce patří Panasonic, Varta, GP batteries a další.

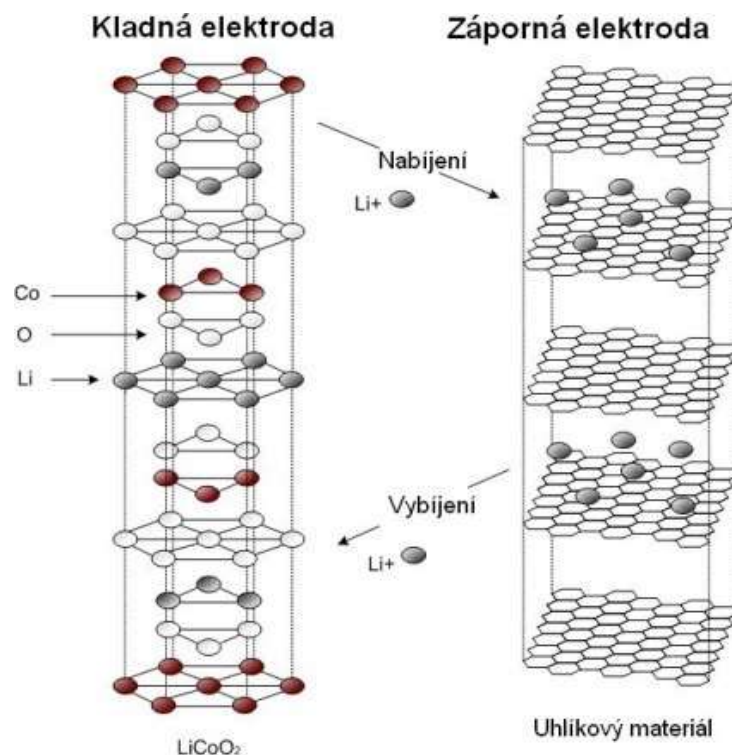


Obr 3.2: Porovnání vybíjecích křivek pro NiMH a alkalické články. Zdroj: http://www.stefanv.com/electronics/using_nimh.html

3.4 Lithium-iontové akumulátory (Li-Ion)

Lithium-iontové akumulátory v posledních letech zaznamenávají velký nárůst na trhu a téměř vytlačily NiCd, NiMH akumulátory a v některých aplikacích nahrazují i baterie olověné.

Princip článku spočívá v pohybu iontů lithia mezi elektrodami – při vybíjení proudí ionty z anody a difundují na katodě, při nabíjení je tento proces opačný. Elektrolytem je zpravidla lithium hexafluorofosfát (LiPF_6). Anoda je tvořena z uhlíku, katodu tvoří směs lithia a dalších kovů. Směs tvořící katodu určuje vlastnosti konkrétního článku. Jejich přehled je uveden v tabulce 3.2. [29] [32]



Obr 3.3: Základní princip lithiových akumulátorů. [29]

Tabulka 3.2: Přehled Li-ion akumulátorů podle složení elektrod [32]

Materiál elektrod	LiCoO ₂ katoda, uhlíková anoda	LiMn ₂ O ₄ katoda, uhlíková anoda	LiNiMnCoO ₂ katoda, uhlíková anoda	LiFePO ₄ katoda, uhlíková anoda	LiNiCoAlO ₂ katoda, uhlíková anoda	Katoda LMO nebo MNC, anoda Li ₂ TiO ₃
Zkratka	LCO	LMO	NMC, případně NCM, CMN, CNM, MNC, MCN	LFP	NCA	LTO
Jmenovité napětí	3,6 V	3,6V (3,7 V)	3,6 V (3,7 V)	3,2 - 3,3 V	3,6 V	2,4 V
Energetická hustota	150-200 Wh/kg	100-150 Wh/kg	150-220 Wh/kg	90-120 Wh/kg	200-260 Wh/kg	50-80 Wh/kg
Životnost	500-1000 cyklů	300-700 cyklů	1000-2000 cyklů	> 2000 cyklů	500 cyklů	3000-7000 cyklů
Poznámka	Dnes se již téměř nepoužívají	Spíše na ústupu z trhu	V současnosti nejvíce rozšířená technologie			Velmi malý podíl na trhu, specifické použití

Výhodami lithium-iontových akumulátorů jsou velká energetická hustota, hmotnost, nízké samovybití (1,5 – 3 % za měsíc), dlouhá životnost (stovky až tisíce cyklů), možnost rychlého nabití, nízké nároky na údržbu, napětí článku. [31]

Mezi nevýhodami se zmiňují bezpečnostní ohledy – při přebití, vystavení vysoké teplotě, nebo při zkratu může dojít k požáru nebo k explozi baterie. Z tohoto důvodu jsou často součástí článku i ochranné obvody nebo při předpokládaném větším zatížení bývají baterie chlazeny. Dalšími nevýhodami jsou například ztráta kapacity při příliš hlubokém vybití a omezené možnosti letecké přepravy. Problematické je také použití kobaltu (Co). Vzhledem k narůstající spotřebě baterií se předpokládá, že světové zásoby nebudou v budoucnu schopny pokrýt poptávku. Navíc je přibližně 60 % kobaltu vytěženo v Demokratické republice Kongo, což je země politicky velmi nestabilní a tamější těžba kobaltu je spojována s dětskou prací. [31] [33]

Li-ion akumulátory mají velmi široký rozsah použití. Využívají se jako akumulátory pro mobilní telefony, notebooky, elektrokola, elektronické cigarety, powerbanky, hudební přehrávače a pro spoustu dalších elektronických zařízení.

Dalším důležitým oborem použití je elektromobilita. Li-ion akumulátory jsou použity prakticky ve všech současných elektromobilech a používají převážně technologii NMC. Výjimku tvoří mezi širokou veřejností známá automobilka Tesla, která používá pro své vozy články vyrobené firmou Panasonic typu NCA v rozměrech 18650 a u novějších modelů v provedení 2170. V budoucnu plánuje použít rozměry 4680 se zatím blíže neurčeným chemickým složením. [30]

Mezi moderní obor využití baterií patří energetická úložiště. Tyto systémy se používají například pro ukládání energie z obnovitelných zdrojů energie (OZE), nebo jako úložiště pro vyrovnávání energetických špiček, kdy se baterie nabíjí buď z OZE nebo během levnějšího tarifu a uložená energie se využije při pokrytí zvýšené spotřeby energie během energetických špiček. Těmito zařízeními pro průmysl i domácnosti se zabývá například česká firma AERS. Stále aktuálnější jsou i úložiště pro distribuční soustavu, které vyrábí například firma Siemens pod označením SIESTORAGE. Takové úložiště může mít kapacitu až několik

MWh. Pro energetická úložiště se používají akumulátory Li-ion nejčastěji v provedení LFP. Výhodou LFP oproti ostatním Li-ion akumulátorům je vyšší bezpečnost (menší riziko požáru), větší teplotní stabilita, delší životnost, menší dopad na životní prostředí. Nevýhodou je menší energetická hustota. Zajímavý výrobek (nejen) pro energetická úložiště nabízí česká firma HE3DA, která si patentovala technologii, která umožňuje nastavení tloušťky elektrod a tím i měnit požadované vlastnosti akumulátorů. Jejich výhodou by měl být velký výkon a vysoká bezpečnost. [34] [35] [36] [37]

Lithium-iontové akumulátory nacházejí své místo i v prostředcích veřejné dopravy. Jedná se zejména o baterie pro nezávislý pohon v tramvajích, trolejbusích, elektrobusech atd. Konkrétní uplatnění zde mají lithium-titanátové baterie (LTO). Tyto akumulátory mají sice malou energetickou hustotou, ale výhodné jsou velké nabíjecí a vybíjecí proudy (i více než 10C), tím pádem mohou být vystavěny velkým proudovým odběrům a je možné je i velmi rychle nabít. Dále mají velice vysokou životnost (tisíce až desetitisíce cyklů), široký rozsah pracovních teplot ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vyšší bezpečnost než u ostatních druhů Li-ion článků. Vylepšenou technologii LTO akumulátorů představila firma Toshiba pod označením SCiB. [38]



Obr 3.4.: Tramvaj 18T od Škody Transportation pro turecké město Eskişehir, která pro jízdu mimo trolej používá akumulátory LTO od firmy Altair nanotechnologies. Udávaný dojezd na baterie je do 5 km. [39]

Lithium-iontové akumulátory nacházejí své uplatnění i ve vesmírném programu. Například vozítko Perseverance, jenž přistálo na Marsu v únoru 2021, dopravilo na Mars vrtulník Ingenuity, který uskuteční první řízený let na cizí planetě. Tento vrtulník je napájen šesti Li-ion akumulátory SONY US18650VTC4 s technologií NMC. Jsou to konvenční články, které jsou na trhu běžně dostupné a jejichž výhodou je možnost velkého proudového zatížení. [40] [41]

Pokud se Li-ion články používají v mobilních telefonech, jedná se o prismatický článek vyrobený na míru danému zařízení. Pokud jde o konvenční provedení, dají se na trhu sehnat v knoflíkovém provedení používané například jako zdroje pro zálohování paměti, do hodinek a podobně, dále jsou běžná válcová provedení například 26650, 21700. Suverénně nejčastějším provedením jsou ale válcové 18650. Toto provedení je hojně využíváno jako jednotlivé články třeba pro elektrické cigarety tak i jako základ pro různé baterie například pro notebooky, elektrokola i například pro elektromobily. Takto uspořádaná baterie obsahuje kromě článků často i ochranné obvody nebo BMS, články bývají spojovány bodováním nebo jsou uloženy volně s dostatečným vzájemným kontaktem. [42]



Obr 3.5.: Složení náhradní baterie od firmy Lenoge pro notebooky DELL. Jak je vidět, je složena ze článků Samsung ICR18650-26J a z obvodu zajišťující správné nabíjení a vybíjení. [43]

Výrobci Li-ion akumulátorů je na trhu velké množství. Nejznámější jsou Panasonic, Samsung, LG, ale objevují se i výrobci neznámí. Články lze koupit ve specializovaných obchodech s elektronikou nebo v internetových obchodech. Ceny článků 18650 se pohybují od cca 100 Kč/ks až po zhruba 350 Kč/ks v závislosti na technologii, výrobci, nebo jsou-li například vybaveny ochranným obvodem. Ceny knoflíkových článků se pohybují kolem 200 Kč/ks. Při nákupu akumulátorů je nutné dbát na výběr prodejce. Jelikož je na trhu velká poptávka, objevuje se spousta neznámých výrobců i relativně zdařilých napodobenin produktů od známých společností. Některé kusy nabízejí i až neuvěřitelné parametry, typicky jsou to články 18650 s kapacitou kolem 15000 mAh, které se často objevují na zahraničních internetových obchodech. Reálná kapacita takového článku je však maximálně v rozsahu 3500-4000 mAh. Použití nevhodných akumulátorů může vést k poškození zařízení, požáru i ke zranění uživatele. [44]

3.5 Lithium-polymerový články (Li-pol, Li-po)

Elektrody Li-pol jsou shodné nebo podobné jako u Li-ion článků, proto mají i stejná napětí, hlavní rozdíl je ale v elektrolytu, který je mikroporézní, polymerový a má gelovou strukturu, zatímco u Li-ion článků je tekutý. Výhodné je konstrukční provedení Li-pol akumulátorů, protože pouzdro článku je měkké a tenké (fólie), což snižuje hmotnost výrobku a je možné ho vyrábět ve velmi tenkých variantách. [45]

Výhody lithium-polymerových článků, zejména ve srovnání s Li-ion, jsou tenké provedení s velkou kapacitou, možnost výroby různých tvarů článku dokonce i výroba článků, které je možné ohnout, dalším bonusem je menší hmotnost a podstatně větší bezpečnost. Nevýhodami jsou vyšší výrobní náklady, menší specifická hustota energie a kratší životnost. [45] [46]

Li-pol akumulátory se oproti ostatním typům článků nevyrábí ve standardizovaných tvarech. Mají použití například v dronech, v hračkách (RC modely), v přenosných reproduktorech, v ultratenkých noteboocích nebo v některých mobilních telefonech. Vyrábějí je například firmy Avacom, Green Cell, Cameron Simo a jiné. Ceny se pohybují od 100 Kč/1000 mAh do cca 450 Kč/1000 mAh.

3.6 Akumulátory budoucnosti

Lithiové akumulátory tvoří dominantní segment trhu a nadále se počítá, že se jejich podíl bude zvyšovat. Nicméně i přes jejich klady mají nevýhody, které mohou být do budoucna limitující – například použití kobaltu, problematika bezpečnosti a také energetická hustota potažmo kapacita, která je omezujícím faktorem pro dojezdové vzdálenosti elektromobilů. Opatrně se hovoří o použití akumulátorů jako zdroj energie pro leteckou dopravu. I v tomto směru bude třeba vylepšit jejich vlastnosti.

3.6.1 Akumulátory s pevným elektrolytem (solid-state)

Solid-state akumulátory jsou z pohledu elektrod podobné jako Li-ion, nebo Li-pol, ale zásadně se liší v elektrolytu, který má pevné skupenství. To přináší řadu výhod jako například bezpečnost, protože pevný elektrolyt je mnohem méně hořlavý než tekutý v Li-ion, dále větší energetická hustota, menší hmotnost a rychlé nabíjení. [47]

Tomuto druhu akumulátoru se předpovídá velká budoucnost zejména v elektromobilitě, nicméně zatím jsou to zdroje spíše ve fázi vývoje na úrovni jednotlivých článků. Jejich komerční využití se odhaduje v horizontu 5-10 let. Jejich vývojem se zabývají například firmy QuantumScape nebo Solid Power. [47]

3.6.2 Lithium-sírové akumulátory (Li-S)

Lithium-sírové akumulátory mohou nabídnout velký posun v energetické hustotě – teoreticky mohou nabídnout specifickou hustotu energie až 2600 Wh/kg. V praxi by to mohlo znamenat dojezd elektromobilů až 2000 km. U Li-S je anoda lithiová a katoda je tvořena cyklickou oktasírou (S₈), spíše ale směsmi síry a dalších prvků (například uhlíku), protože síra samotná je velmi málo vodivá. [48] [49]

Výhodou Li-S je tedy velká energetická hustota, dále vyšší bezpečnost než u Li-ion a také nízké výrobní náklady, rychlé nabíjení a dlouhá životnost. [49]

Li-S akumulátory zatím procházejí vývojem a nejsou komerčně rozšířeny. Jejich využití se předpokládá v elektromobilech, mobilních telefonech a energetických úložištích.

Vývojem Li-S akumulátorů se zabývají například firmy Brighsun New Energy, Polyplus nebo OXIS Energy. [48] [49]

3.6.3 Grafen

Grafen je materiál složený z hexagonálně poskládaných uhlíkových atomů, jehož základní vrstva je silná pouze jeden atom a označuje se proto jako dvoudimenzionální. Má výborné vlastnosti jako například vodivost lepší než zlato, tvrdost větší než diamant, je průhledný a velmi ohebný. Tyto vlastnosti ho předurčují jako materiál budoucnosti nejen pro baterie. [50]

Výhodou akumulátorů s grafenem by mělo být velmi rychlé nabíjení v řádech desítek sekund na 90% kapacity (v závislosti na kapacitě baterie), životnost až tisíce cyklů, nízká hmotnost, větší energetická hustota. [50] [51]

V současné době články využívající grafen nejsou komerčně dostupné, nicméně na jejich vylepšení a případném uvedení na trh pracují firmy jako Samsung, Huawei nebo Log 9 Materials. [51]

3.6.4 Ostatní

Kromě výše zmíněných akumulátorů se do budoucna ukazuje potenciální využití například u lithium-vzduchových článků. Probíhají také experimenty s náhradou lithia u Li-ion, které by mohl nahradit sodík. Tyto akumulátory nabízejí další pokrok, ale je stále nutné vyřešit řadu problémů, které brání v jejich komerční produkci. [52]

4 Praktická část

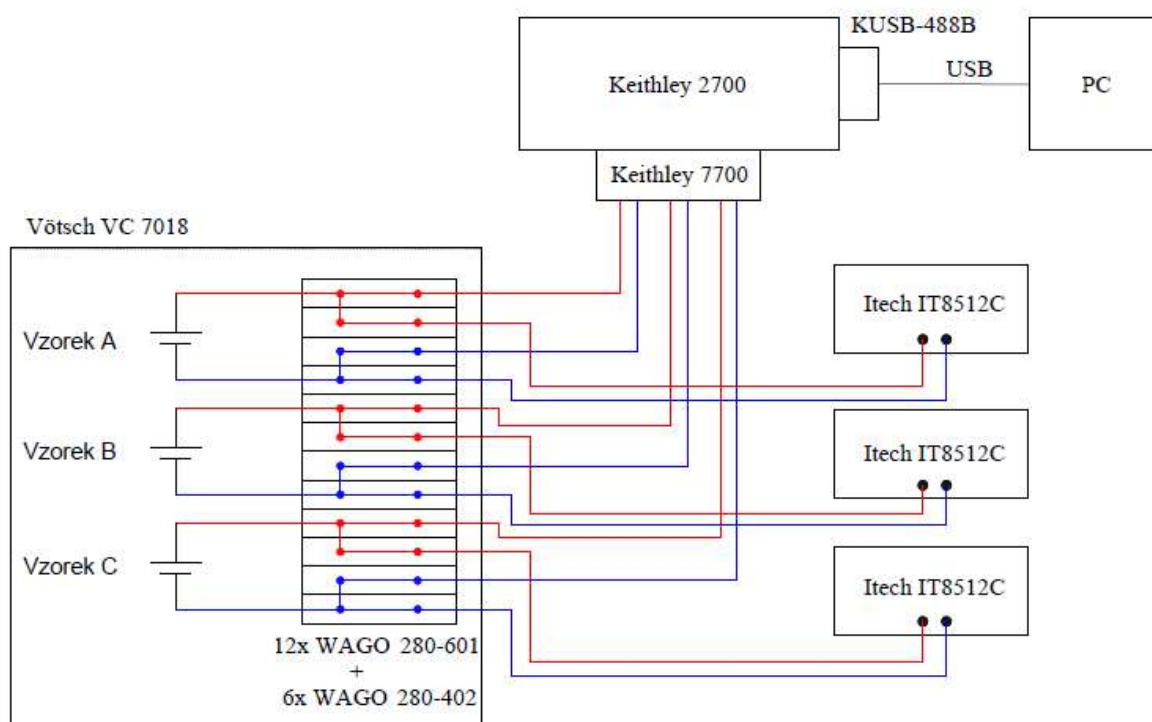
Praktická část je zaměřena na měření kapacit vybraných článků a baterií. Z naměřených hodnot je také možné dopočítat dodanou energii a hustotu energie článku.

4.1 Postup měření

Měření probíhalo na principu zatížení článků konstantním proudem po celou dobu vybíjení. Vybíjení je ukončeno při dosažení konečného napětí, které určuje výrobce a po jehož dosažení se článek označuje za vybitý. Výstupem z měření jsou vybíjecí křivky, z kterých je možné vyčíst dobu vybíjení a průběh napětí po celou dobu vybíjení. Výsledná kapacita je pak součinem vybíjecího proudu a doby vybíjení. Způsob měření vychází z norem ČSN EN 60086-1 ed.5, ČSN EN 62660-1 a ČSN EN 60254-1.

Měření za standardních podmínek probíhalo za pokojové teploty v laboratoři, za změněných podmínek v klimakomoře, ve které se nastavila požadovaná teplota. Vzorky za změněných podmínek bylo nutné aklimatizovat. U olověných akumulátorů trvala aklimatizace 4 hodiny, u ostatních článků 2 hodiny.

Při měření byly použity elektronické zátěže Itech IT8512C, které mají možnost nastavení odběru konstantního proudu. Pro zaznamenání průběhu vybíjecích křivek byl použit multimetr Keithley 2700, který byl připojen k počítači, kde se přes program KickStart zaznamenávaly naměřené průběhy, které bylo možné uložit ve formátu *.csv nebo *.xlsx. Protože probíhalo měření na více vzorcích najednou, byl multimetr osazen přídatným multiplexorem Keithley 7700. Pokud byly vzorky měřeny za změněných podmínek, byly umístěny do klimatické komory Vötsch VC 7018, na které byla nastavena příslušná teplota. Schéma měření je na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Schéma měření

Před měřením bylo změřeno napětí jednotlivých článků multimetrem Fluke 189. Vzorky byly umístěny do držáků a na elektronických zátěžích byla nejdříve nastavena hodnota konstantního vybíjecího proudu a dále navolena hladina konečného napětí stanovená výrobcem článku. V programu KickStart byl nastaven počet měřených kanálů a frekvence ukládání vzorků, poté bylo spuštěno zaznamenávání hodnot a následně byly zapnuty elektronické zátěže. Proud byl zátěžemi odebírán až do dosažení konečného napětí, kdy došlo k jejich automatickému vypnutí. Ukládání dat v počítači probíhalo průběžně automaticky a bylo ukončeno manuálně po vypnutí zátěží.



Obr 4.2: Měřicí sestava a klimakomora

Zatěžovací proudy byly voleny tak, aby naměřené hodnoty byly porovnatelné s údaji udávanými výrobcí vzorků, ale zároveň aby měření nebylo přehnaně časově náročné. Obdobně byly zvoleny i teploty – tedy opět pro porovnání s katalogovými listy a zároveň, aby odpovídaly použití napájeného zařízení v reálném provozu.

Z důvodu porovnání se měřily od každého typu článku tři vzorky. Měření probíhalo najednou na všechny třech vzorcích za stejných podmínek. Výjimkou bylo pouze měření na lithiových primárních článcích, kdy, z důvodu dostupnosti zátěží, byly při teplotách 0 °C a -20 °C měřeny pouze dva vzorky najednou a třetí vzorky byly měřeny dodatečně.

Při měření akumulátorů byly jednotlivé články používány opakovaně pro všechny teploty. Pro porovnání byly vždy stejné kusy měřeny na stejné pozici, tzn. že například

vzorek A je fyzicky stejný kus měřený pro každou teplotu. Mezi měřeními byly akumulátory dobíjeny. Lithiové akumulátory byly dobíjeny na zařízení Raytronic C60, které umožňuje nabití přednastaveným programem používajícím způsob nabíjení „konstantní proud-konstantní napětí“. Olověné akumulátory byly nabíjeny nabíječkou UltimateSpeed ULDG 5.0 A1, která nabíjela baterie konstantním proudem 0,8 A.

4.2 Naměřené hodnoty a průběhy

4.2.1 Lithiové primární články



Fanzo ER34615M

Lithiový primární článek, LiSOCl_2

Velikost D

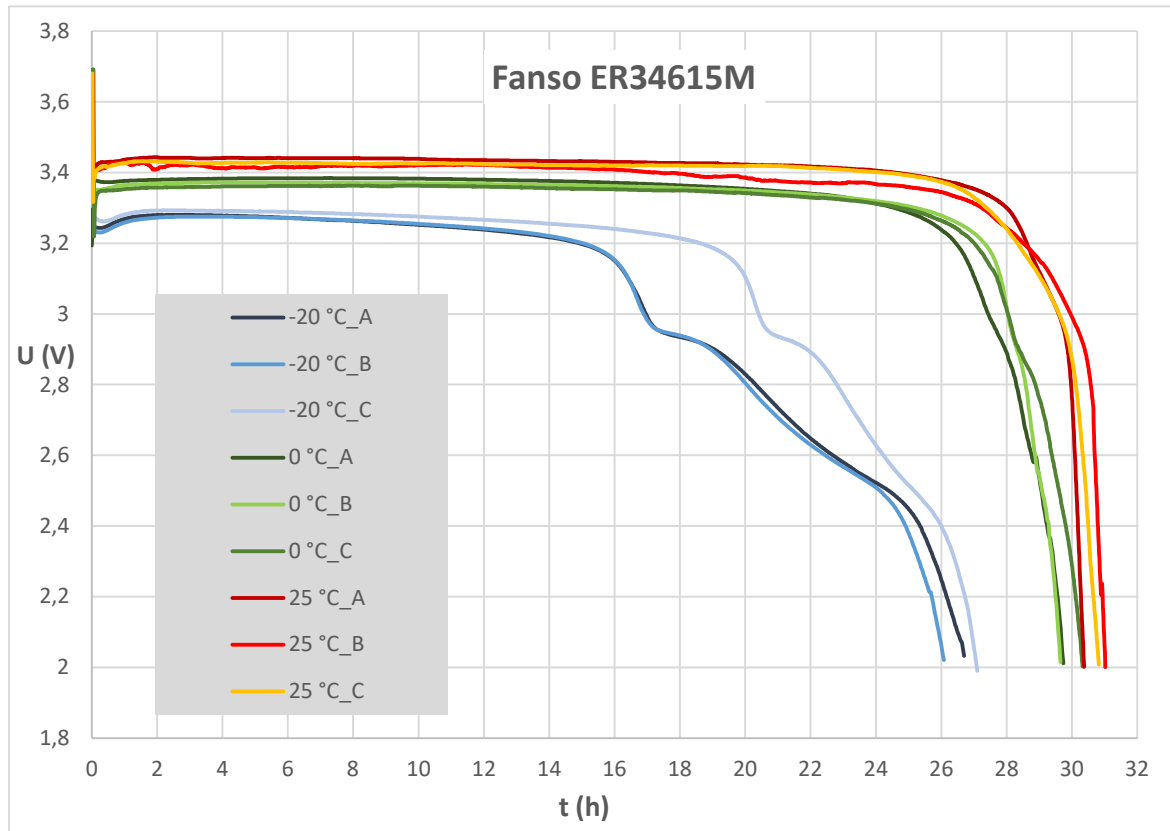
Katalogová kapacita 13000mAh při $+25\text{ °C}$ a 15 mA

Hmotnost 110 g

Jmenovité napětí 3,6 V

Zatěžovací proud při měření $I_z = 345\text{ mA}$

Konečné napětí 2 V



Obr. 4.3: Naměřené průběhy článku Fanzo ER34615M

Tabulka 4.1: Naměřené hodnoty kapacit Fanso ER34615M

Fanso ER34615M		Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C	Průměr	Hodnota v katalogovém listu
Q (mAh)	-20 °C	9208	8995	9350	9184	9000
	0 °C	10256	10227	10459	10314	10000
	25 °C	10477	10701	10632	10603	11000

**Saft LSH20**Lithiový primární článek, LiSOCl₂

Velikost D

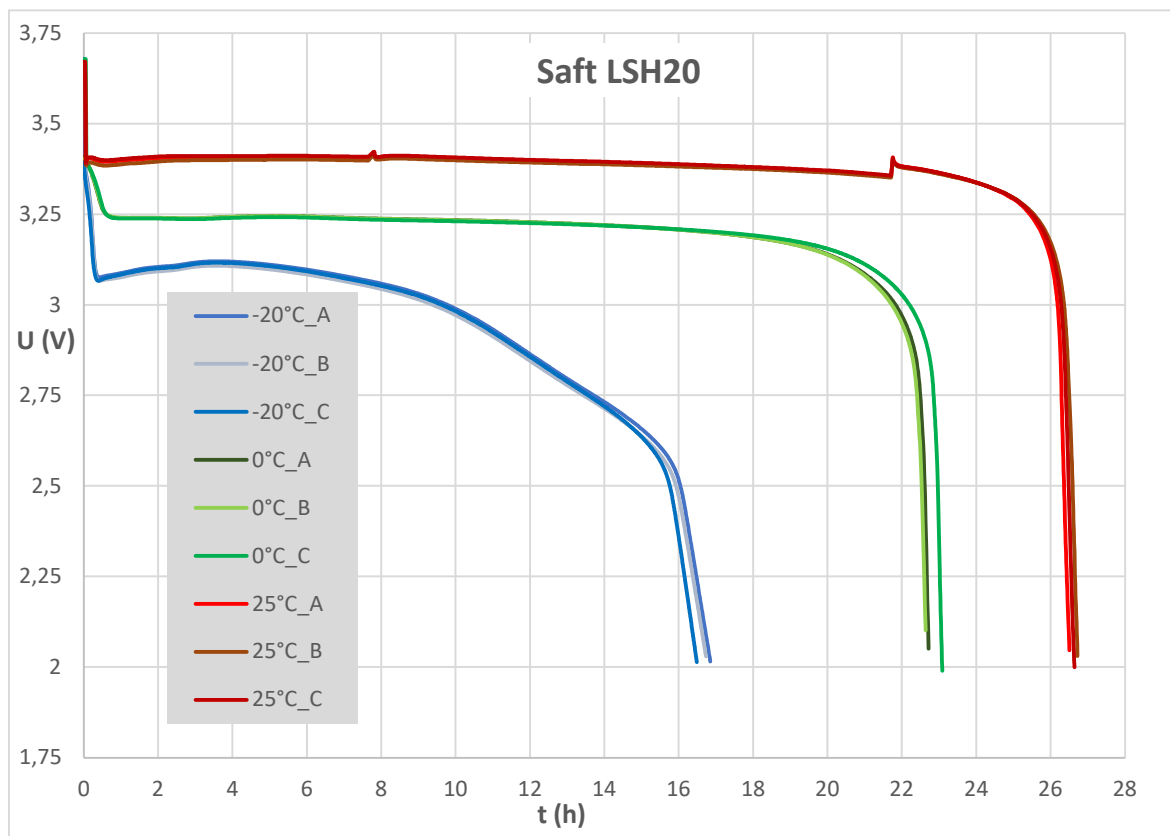
Katalogová kapacita 13000mAh při +25 °C a 15 mA

Hmotnost 100 g

Jmenovité napětí 3,6 V

Zatěžovací proud při měření I_Z = 350 mA

Konečné napětí 2 V



Obr 4.4: Naměřené průběhy článku Saft LSH20

Tabulka 4.2: Naměřené hodnoty kapacit Saft LSH20

Saft LSH20		Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C	Průměr	Hodnota v katalogovém listu
Q (mAh)	-20 °C	5897	5856	5769	5841	6500
	0 °C	7952	7923	8079	7985	7500
	25 °C	9277	9353	9324	9318	9900



Tekcell SB-D02

Lithiový primární článek, LiSOCl_2

Velikost D

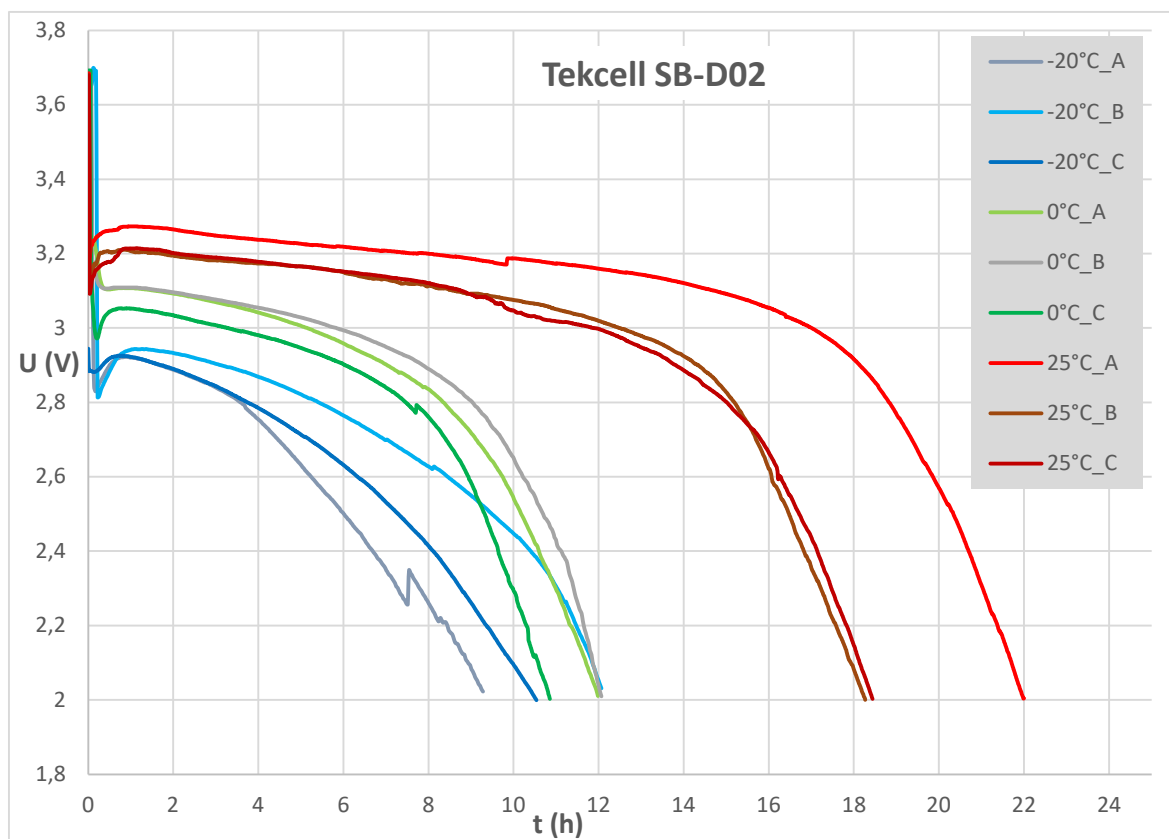
Katalogová kapacita 19000 mAh při +20 °C a 6 mA

Hmotnost 100 g

Jmenovité napětí 3,6 V

Zatěžovací proud při měření $I_z = 200 \text{ mA}$

Konečné napětí 2 V



Obr 4.5: Naměřené průběhy článku Tekcell SB-D02

Tabulka 4.3: naměřené hodnoty kapacit Tekcell SB-D02

Tekcell SB-D02		Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C	Průměr	Hodnota v katalogovém listu
Q (mAh)	-20 °C	1855	2412	2107	2125	3500
	0 °C	2396	2412	2170	2326	4500
	25 °C	4400	3653	3687	3913	5000

Články byly měřeny za podmínek v jejich popisu výše. Během měření článku Saft LSH20 při teplotě 25 °C došlo na univerzitě dvakrát k výpadku elektrické energie a tím pádem i k odpojení zátěží a přerušeni měření. Měření bylo navázáno (v grafu na obr. 4.4 je napojení poznat podle dvou špiček v časech přibližně 7,5 h a 21,5 h) a výsledný průběh je tak rekonstrukcí tří průběhů. Tvar křivky odpovídá teoretickému předpokladu i vypočítaná kapacita přibližně odpovídá katalogové hodnotě (rozdíl -6,8 %), nicméně výsledek může být zkreslen.

Podle teoretických předpokladů mají mít lithium-thionylové články plochý průběh vybíjecích křivek, což u prvních dvou typů při teplotách 25 °C a 0 °C je splněno, ale u teploty -20 °C není již průběh takto hladký (obr. 4.3 a 4.4). U článku Tekcell byl z časových důvodů zvolen vyšší proud než maximální katalogový, a to patrně ovlivnilo výsledné průběhy (obr 4.5). Křivky nemají tak plochý průběh, při teplotách -20 °C a 0 °C se prolínají a článek se tak jeví jako nestabilní.

Tabulka 4.4: Porovnání naměřených parametrů a ceny článků LiSOCl₄ při 25 °C

	Výkon P (W)	Energie (Wh)	Specifická hustota energie (Wh/kg)	Cena Kč	Cena Kč za kWh
Fanso	1,18	36,26	330,00	250,00	6894,65
Saft	1,19	31,61	316,18	360,00	11388,80
Tekcell	0,62	12,21	122,09	277,00	22686,32

4.2.2 Li-ion články



A123Systems APR18650M1

Li-ion, LiFePO4

Velikost 18650

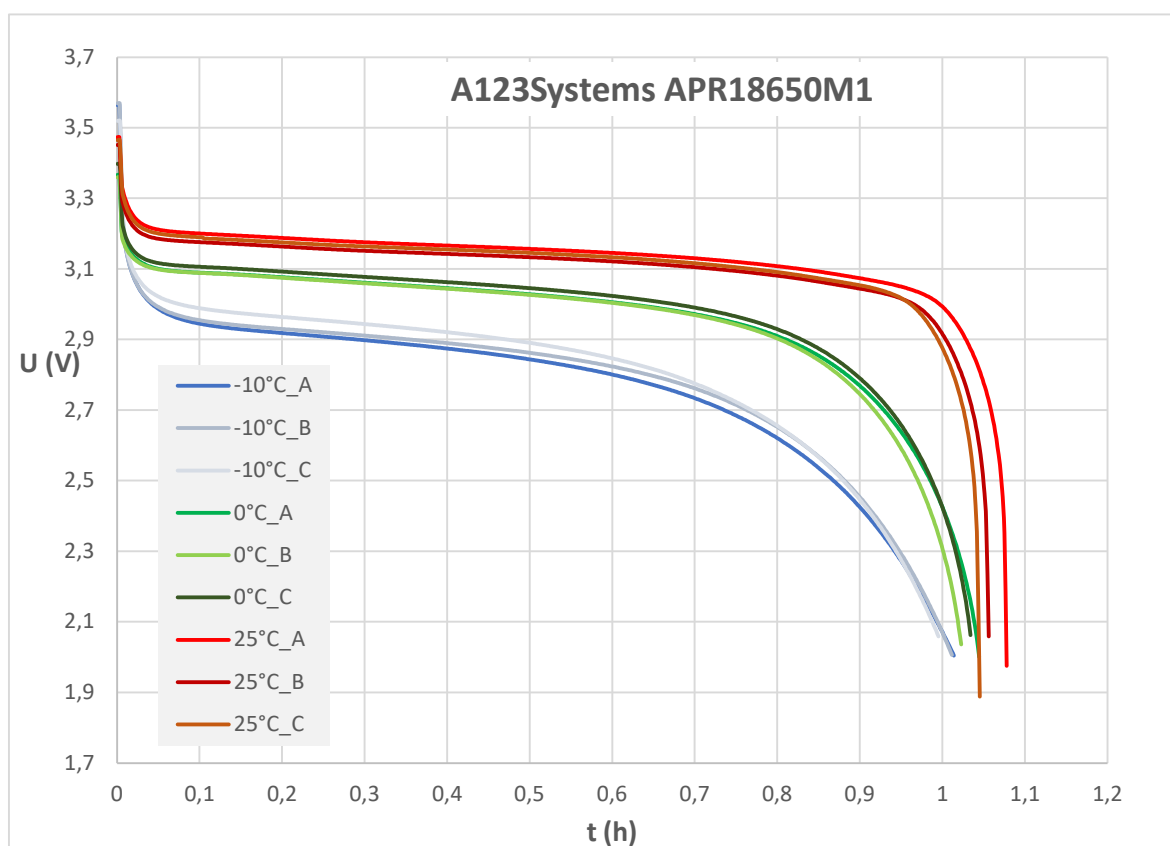
Katalogová kapacita 950 mAh

Hmotnost 40 g

Jmenovité napětí 3,3 V

Zatěžovací proud při měření $I_z = 950$ mA

Konečné napětí 2 V



Obr 4.6: Naměřené průběhy článku A123Systems APR18650M1

Tabulka 4.5: naměřené hodnoty kapacit A123Systems APR18650M1

		A	B	C	Průměr	Hodnota v katalogovém listu
APR18650M1						
Q (mAh)	-10 °C	963	961	945	956	Neuvedena
	0 °C	992	971	982	982	Neuvedena
	25 °C	1035	1003	993	1010	Neuvedena



Keppower ICR18650-320PCM

Li-ion

Velikost 18650 s ochranným obvodem

Uvnitř je LG ICR18650E1 a ochranný obvod

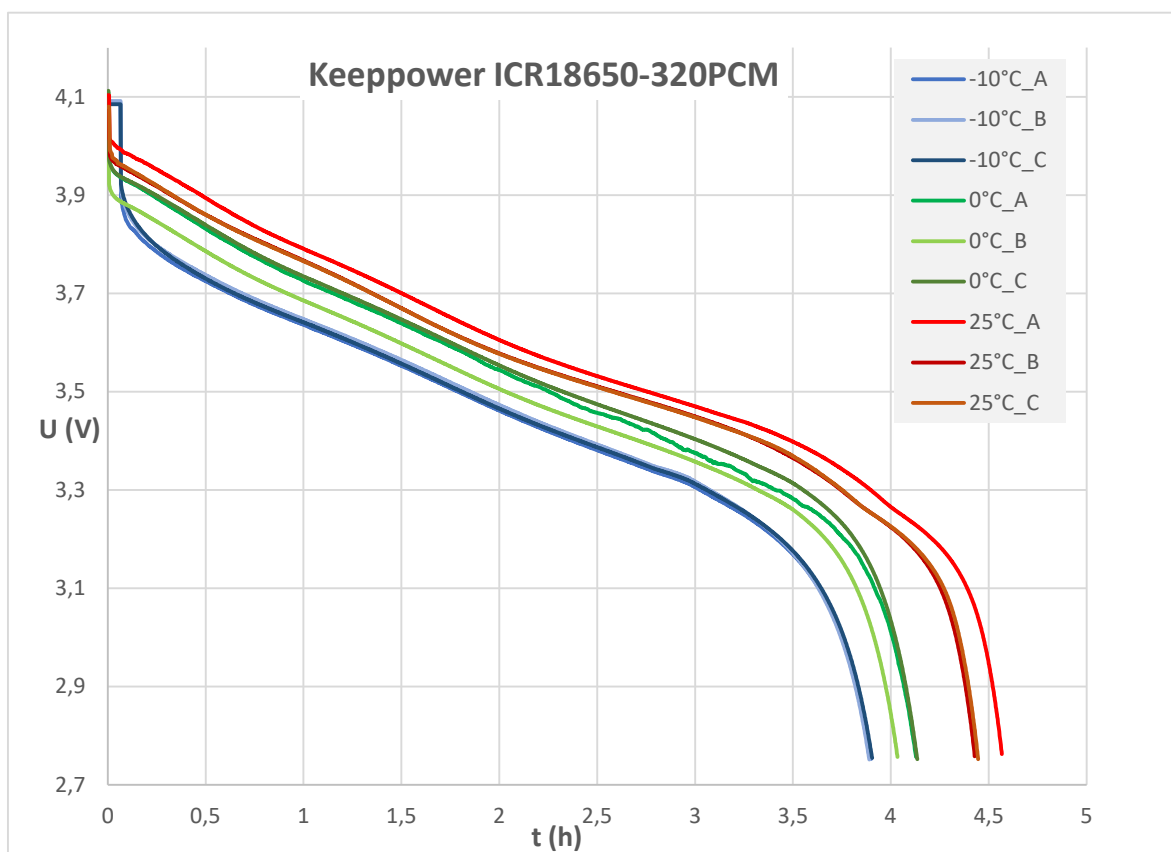
Katalogová kapacita 3200 mAh při 23 °C a 620 mA

Hmotnost 50 g

Jmenovité napětí 3,75 V

Zatěžovací proud při měření $I_z = 620$ mA

Konečné napětí 2,75 V



Obr 4.7: Naměřené průběhy článku Keppower ICR18650-320PCM

Tabulka 4.6: Naměřené hodnoty kapacit Keppower ICR18650-320PCM

Keppower ICR18650-320PCM		A	B	C	Průměr	Hodnota v katalogovém listu
Q (mAh)	-10 °C	2377	2370	2379	2375	2240
	0 °C	2642	2501	2563	2569	2560
	25 °C	2831	2745	2756	2778	3200



Samsung ICR18650-26JM

Li-ion

Velikost 18650

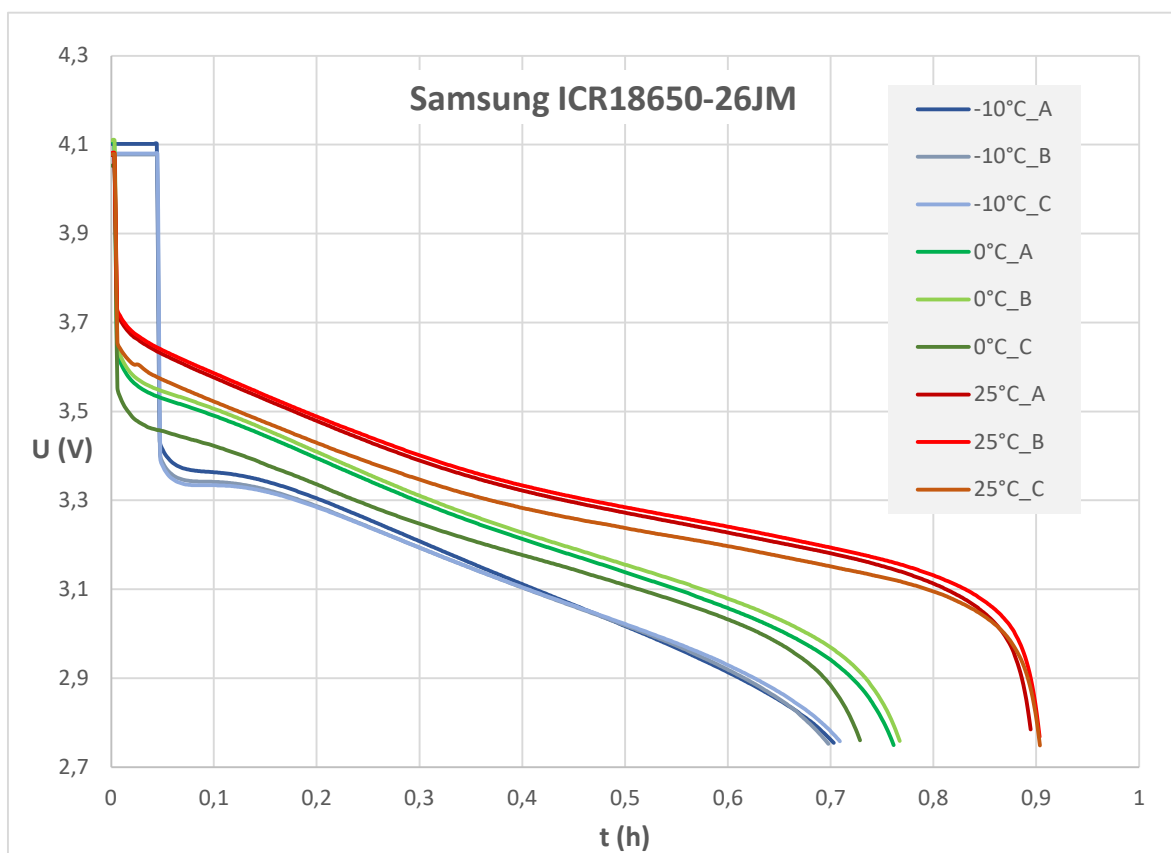
Katalogová kapacita 2600 mAh

Hmotnost 45 g

Jmenovité napětí 3,63 V

Zatěžovací proud při měření $I_z = 2600$ mA

Konečné napětí 2,75 V



Obr 4.8: Naměřené průběhy článku Samsung ICR18650-26JM

Tabulka 4.7: Naměřené hodnoty kapacit Samsung ICR18650-26JM

Samsung ICR18650-26JM		A	B	C	Průměr	Hodnota v katalogovém listu
Q (mAh)	-10 °C	1712	1698	1728	1712	1170
	0 °C	1979	1994	1894	1956	1872
	25 °C	2326	2348	2349	2341	2340

Průběhy křivek Li-ion článků odpovídají teoretickým předpokladům. Článek

APR18650M1 od A123Systems oproti zbylým dvou používá rozdílnou technologii katody (LFP), proto je jeho napětí nižší a křivky mají plochý průběh. Je vidět, že u tohoto článku je výsledná kapacita ovlivněna okolní teplotou velmi málo, průběhy se liší zejména velikostí napětí. Článek Keppower má výraznější odchylku při pokojové teplotě (-13,2 %) a článek Samsung má průměrnou kapacitu při teplotě -10 °C vyšší o 46 % než je katalogová hodnota.

Tabulka 4.8: Porovnání naměřených parametrů a ceny Li-ion článků při 25 °C

	Výkon P (W)	Energie (Wh)	Specifická hustota energie (Wh/kg)	Cena Kč	Cena Kč za kWh
A123Systems	2,99	3,16	79,10	191,00	60443,04
Keppower	2,20	9,86	198,26	236,00	23935,09
Samsung	8,55	7,70	170,84	104,00	13506,49

4.2.3 Olověné baterie



BPower BPE 5-12

Olověný akumulátor

Rozměry (mm) 90x70x107

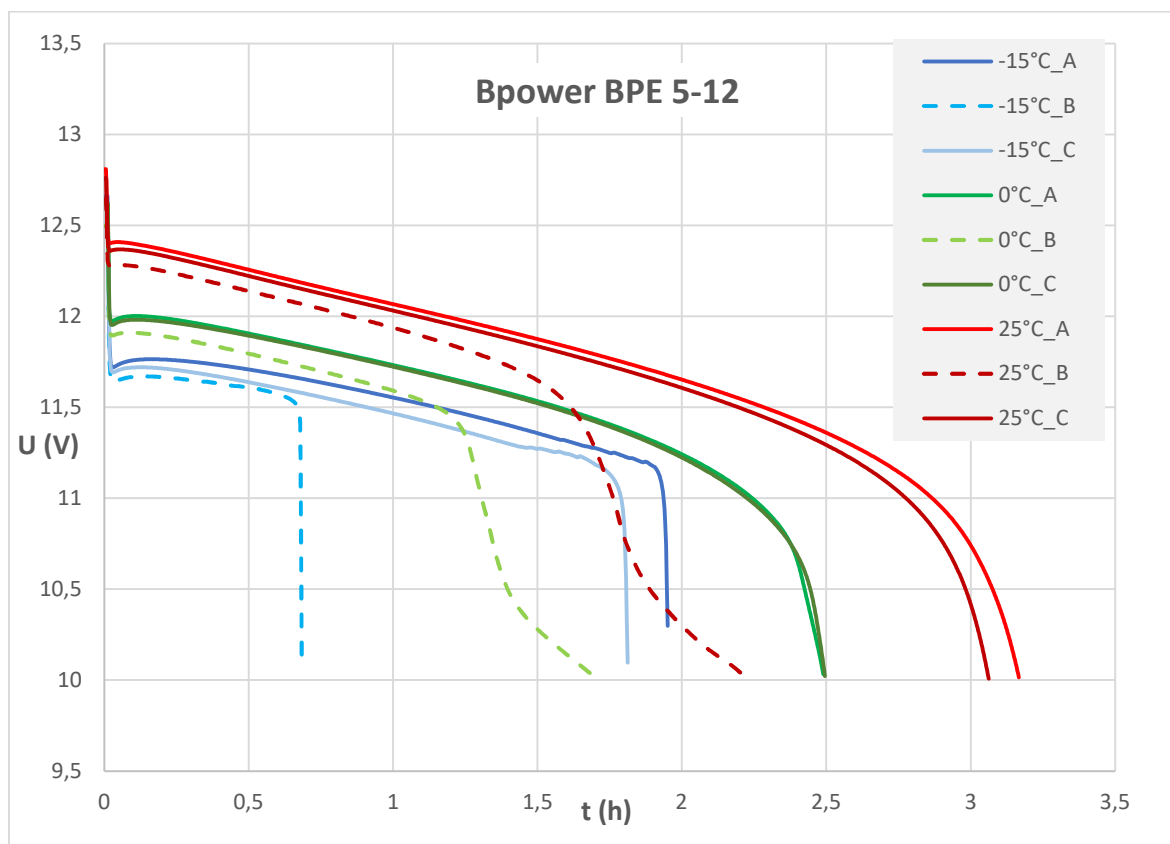
Katalogová kapacita 5 Ah

Hmotnost 1,9 kg

Jmenovité napětí 12 V

Zatěžovací proud při měření $I_z = 1,25$ A

Konečné napětí 10 V



Obr 4.9: Naměřené průběhy akumulátoru BPower BPE 5-12

Tabulka 4.9: Naměřené hodnoty kapacit BPower BPE 5-12

BPower BPE 5-12		A	B	C	Průměr	Průměr bez vzorku B	Hodnota v katalogovém listu
Q (mAh)	-15 °C	2437	855	2265	1852	2351	2500
	0 °C	3111	2132	3119	2787	3115	3000
	25 °C	3958	2778	3827	3521	3893	3500



Qoltec 53033

Olověný akumulátor

Rozměry (mm) 90x70x101

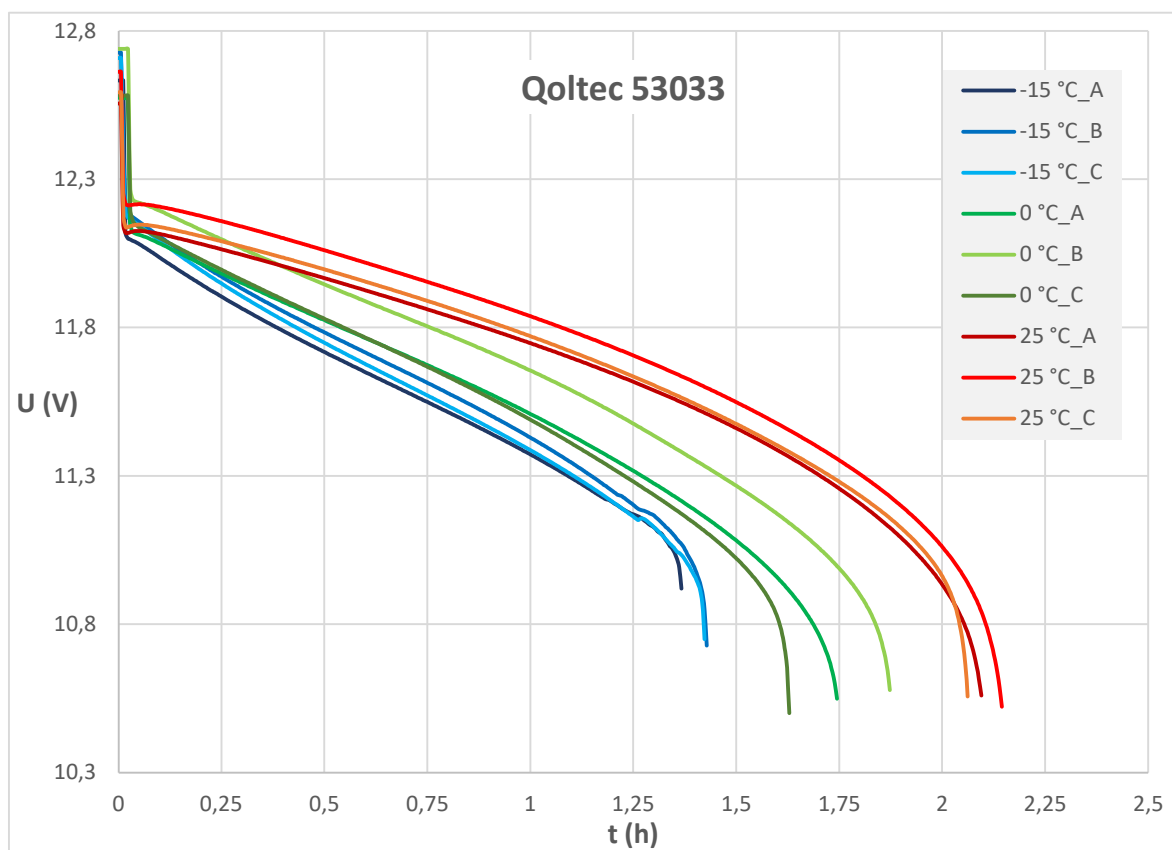
Katalogová kapacita 4,5 Ah

Hmotnost 1,5 kg

Jmenovité napětí 12 V

Zatěžovací proud při měření $I_z = 1,17$ A

Konečné napětí 10,5 V



Obr 4.10: Naměřené průběhy akumulátoru Qoltec 53033

Tabulka 4.10: Naměřené hodnoty kapacit Qoltec 53033

Qoltec 53033		A	B	C	Průměr	Hodnota v katalogovém listu
Q (mAh)	-15 °C	1599	1671	1665	1645	2457
	0 °C	2041	2191	1905	2046	2983
	25 °C	2451	2509	2412	2457	3510

U baterie BPower BPE 5-12 vidíme z obrázku 4.9, že všechny průběhy⁴ pro vzorek B jsou velmi nestandardní, a navíc rozdíly oproti předpokládané kapacitě jsou značné – nejvíce pro teplotu -15 °C, kde je naměřená hodnota o 65,8% nižší než katalogová a o 63,6% nižší než průměr ostatních dvou baterií. Vzhledem k tomu, že se jednalo vždy o stejný kus, můžeme se důvodně domnívat, že baterie je vadná. Bylo by zajímavé změřit parametry jejich jednotlivých článků a zjistit, jestli jsou vadné jen některé články, nebo je problém ve všech. Znamenalo by to ale destruktivní zásah do akumulátoru. Průběhy u ostatních vzorků u obou baterií mají předpokládaný tvar.

Tabulka 4.11: Porovnání naměřených parametrů a ceny olověných baterií při 25 °C

	Výkon P (W)	Energie (Wh)	Specifická hustota energie (Wh/kg)	Cena Kč	Cena Kč za kWh
Bpower	14,81	41,71	22,11	353,00	8462,39
Bpower bez vzorku B	14,79	46,06	24,41	353,00	7663,92
Qoltec	13,76	28,90	19,36	262,00	9065,74

4.2.4 Měření – shrnutí

Podle teorie se při nízkých teplotách zvyšuje viskozita elektrolytu, což snižuje jeho iontovou vodivost a zároveň také stoupá vnitřní odpor článků. Tím pádem je kapacita při takových teplotách nižší a klesá s klesající teplotou. [54]

Naměřené průběhy této teorii odpovídají, zároveň je i vidět nižší napětí při nižších teplotách, což je způsobeno vyšším vnitřním odporem.

Zajímavé je porovnání finanční výhodnosti jednotlivých technologií. Tabulka 4.12 porovnává pro měřené články vypočítanou nákladovou cenu za 1 kWh. U článků LiFEPO4

⁴ Pro větší přehlednost jsou průběhy vzorku B na obr. 4.9 vykresleny přerušovanou čarou.

se udávají jiné předpokládané vlastnosti (energetická hustota, napětí), proto je článek APR18650M1 v tabulce uveden samostatně pro porovnání s ostatními. Z tabulky je vidět, že LFP článek vychází oproti ostatním Li-ion článkům velmi nevýhodně. Proto by bylo vhodné v případné aplikaci použít levnější LFP článek – u stejného prodejce je v nabídce například LFP18650P-1100 od firmy JYH battery, jehož cena na 1 kWh podle katalogových hodnot vychází přibližně na 24900 Kč. Nevýhodou oproti APR18650M1 je menší maximální vybíjecí proud (11 A oproti 30 A).

Tabulka 4.12: Přepočet ceny jednotlivých technologií na 1 kWh

	Lithiové primární články	Li-ion články	LiFePO4	Olověné baterie
Cena za 1 kW	11 072,00 Kč	19 363,00 Kč	60 443,86 Kč	8 708,00 Kč

Dále můžeme porovnat předpokládané hodnoty kapacit s katalogovými. Na základě tabulky 4.13. můžeme konstatovat, že k určitým odchylkám dochází vždy. Nejlépe vychází primární článek Fanso, který u všech měřených teplot vykazuje odchylku kolem tří procent. Na druhou stranu olověná baterie Qoltec vykazuje pro všechny teploty kapacitu zhruba o třetinu nižší, než je hodnota katalogová. Zajímavé je, že tato odchylka je téměř konstantní pro všechny tři měřené teploty. Dále vidíme výraznou odchylku u Li-ion článku Samsung při teplotě -10 °C, kde naměřená kapacita byla téměř o polovinu vyšší než předpokládaná hodnota. Výrazné odchylky u článku Tekcell jsou patrně způsobeny vyšším proudovým odběrem (viz výše).

Z naměřených a vypočítaných hodnot vychází, že nejvýhodnější jsou primární lithiové články, z nichž nejlépe vychází Fanso ER34615M, u nějž jsou náklady na 1 kWh 6894 Kč a zároveň naměřené hodnoty jsou ze všech měřených vzorků nejbližší k předpokládaným katalogovým hodnotám. Jako nejdražší vycházejí akumulátory s lithiem. Může být ovšem mírně zavádějící porovnávat jednorázové a nabíjecí články.

Tabulka 4.13: Odchyly průměru naměřených hodnot oproti katalogovým hodnotám

		Odchyly oproti katalogu (%)		
		Nejnižší teplota	0 °C	25 °C
Primární lithiové	FANSO ER34615M	2,05	3,14	-3,61
	Saft LSH20	-10,14	6,46	-5,88
	Tekcell SB-D02	-39,3	-48,31	-21,73
Akumulátory lithiové	APR18650M1	Nejsou katalogové hodnoty	Nejsou katalogové hodnoty	Nejsou katalogové hodnoty
	Keppower ICR18650-320PCM	6,03	0,33	-13,2
	Samsung ICR18650-26JM	46,31	4,46	0,03
Akumulátory olověné	Bpower BPE 5-12	-25,91	-7,09	0,61
	Qoltec 53033	-33,06	-31,42	-29,99

Závěr

V první části je formou rešerše proveden přehled jednotlivých typů primárních a sekundárních článků a vhodnost jejich využití pro konkrétní aplikace. U primárních článků mají v současné době dominantu alkalické články, u sekundárních článků jsou nejvýznamnější akumulátory založené na lithiu – zejména technologie Li-ion. Zejména u akumulátorů bude velmi zajímavé sledovat jejich uplatnění na trhu. Vzhledem k rozvoji IoT, elektromobility a obnovitelných zdrojů, různým státním dotacím na boj s globálním oteplováním a restrikcím vůči fosilním palivům bude nejspíše následovat velmi významná poptávka právě po akumulátorech. Výrobci baterií plánují stavět velké továrny v Evropě, aby uspokojili poptávku především v oblasti elektromobility. Například Volkswagen chce otevřít až šest továren na výrobu baterií v Evropě a automobilka Tesla plánuje v Německu otevřít největší továrnu na výrobu baterií na světě. [55]

V souvislosti s poptávkou bude velmi zajímavé v příštích letech sledovat i technologický vývoj. Zda se uplatní akumulátory s pevným elektrolytem, Li-S technologie, nebo začne docházet k náhradě lithia jinou látkou, nebo se začne uplatňovat jiný směr?

V praktické části proběhlo měření vybraných článků za standardní okolní teploty a za snížených teplot. Měření nebylo primárně zaměřeno na ověření jmenovitých kapacit, jelikož by to znamenalo velkou časovou i finanční náročnost. Například pro primární článek Tekcell by vybíjení jmenovitým proudem trvalo přibližně 132 dní a dále norma doporučuje zkoušení na devíti kusech článků. Zvolená velikost parametrů pro zkoušení je tedy určitým kompromisem, který umožnil provést zkoušky v rozumném časovém a finančním rozsahu, ale zároveň aby naměřené hodnoty byly porovnatelné vzájemně i vůči hodnotám zadaným výrobcem.

Při měření se prokázalo, dle teoretických předpokladů, že nízké teploty mají negativní vliv na parametry. Z naměřených hodnot je také vidět, že ne vždy je naměřená hodnota rovna katalogové. Nejvíce se liší B vzorek akumulátoru BPower, ale zde se pravděpodobně jedná o vadný kus, jak již bylo výše zmíněno. Na výsledcích měření mohlo mít vliv například předešlý způsob a doba skladování, nepřesnost přístrojů atd.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CENEK, Miroslav et al. *Akumulátory a baterie*. 1.vyd. Praha: STRO.M s.r.o., 1996. 141 s.
- [2] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 2. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. 181 s. ISBN 80-7082-411-5.
- [3] Battery Separators – Types and Importance in the Performance of Battery. *Components101 - Electronic Components Pinouts, Details & Datasheets* [online]. [cit. 17.09.2020]. Dostupné z: <https://components101.com/articles/battery-seperators-types-and-importance>
- [4] Palivové články – princip funkce a dělení. *OEnergetice.cz - denní zpravodajství z energetiky* [online]. [cit. 17.9.2020]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/palivove-clanky-princip-funkce-a-deleni>
- [5] MAREK, Jiří a STEHLÍK, Luděk. *Hermetické akumulátory v praxi*. 1.vyd. Praha: IN-EL s.r.o., 2004. 140 s. ISBN 80-86230-34-4
- [6] AIFANTIS Katerina E. et al. *High energy density lithium batteries*. 1. vyd. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA ©2010. 265 s. ISBN 978-3-527-32407-1
- [7] A Guide to Understanding Battery Specifications. *MIT Electric Vehicle Team* [online]. [cit. 10.2.2021]. Dostupné z: https://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf
- [8] How long should batteries last? *Battery Universe Blog* [online]. [cit. 11.2.2021]. Dostupné z: <https://www.batteryuniverse.com/blog/tags/shelf-life/>
- [9] Primary batteries. *DoITPoMS* [online]. [cit. 16.2.2021]. Dostupné z: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/primary.php>
- [10] Zinc Carbon Battery |Types of Zinc Carbon Battery | Advantages and Disadvantages. *Electrical 4 U* [online]. [cit. 17.2.2021]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/zinc-carbon-battery/>
- [11] Dry Cell Battery. *Lumen Learning* [online]. [cit. 22.2.2021]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/boundless-chemistry/chapter/batteries/>
- [12] Choices of Primary Batteries, *Battery university* [online]. [cit. 25.2.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/choices_of_primary_batteries

- [13] Passivation of Lithium Thionyl Chloride Batteries. *Jauch Blog* [online]. [cit. 2.3.2021]. Dostupné z: <https://www.jauch.com/blog/en/passivation-lithium-thionyl-chloride-batteries/>
- [14] Advantages and Special Characteristics of Lithium Thionyl Chloride Batteries. *Jauch Blog* [online]. [cit. 2.3.2021] Dostupné z: <https://www.jauch.com/blog/en/advantages-and-special-features-of-lithium-thionyl-chloride-batteries/>
- [15] Lithium – Manganese Dioxide Battery (Li-MnO₂) Batteries. *GlobTek, Inc.* [online]. [cit. 6.3.2021]. Dostupné z: <https://en.globtek.com/lithium-manganese-dioxide-battery-li-mno2-batteries/>
- [16] Pacemaker Replacement Due to Low Battery. *Verywellhealth.* [online] [cit. 7.3.2021] Dostupné z: <https://www.verywellhealth.com/pacemaker-low-battery-replacement-1746230>
- [17] Alternate Battery Systems. *Battery university* [online]. [cit. 7.3.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/alternate_battery_systems
- [18] Zinc/Silver Oxide Batteries. *The Electropaedia.* [online]. [cit. 7.3.2021]. Dostupné z: https://www.mpoweruk.com/silver_oxide.htm
- [19] Lead Acid Batteries. *PVEducation* [online]. [cit. 11.3.2021]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries>
- [20] How does the Lead Acid Battery Work? *Battery university* [online]. [cit. 11.3.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries
- [21] Sulfation and How to Prevent it. *Battery university* [online]. [cit. 16.3.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/sulfation_and_how_to_prevent_it
- [22] Comparing deep-cycle flooded batteries to VRLA batteries. *EneRa* [online]. [cit. 11.3.2021]. Dostupné z: <https://www.enera.eu/en/products/batteries/comparing-deep-cycle-flooded-batteries-to-vrla-batteries/>
- [23] Gel Lead Acid Battery. *Battery university* [online]. [cit. 16.3.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_201b_gel_lead_acid_battery
- [24] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2013/56/EU. *EUR-Lex* [online]. [cit. 20.3.2021]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32013L0056>

- [25] Ni-MH technical handbook, industrial batteries for professionals. *Panasonic* [online]. [cit. 21.3.2021]. Dostupné z: https://www.tempelgroup.com/catalogos/energia/catalogo_baterias_nimh_panasonic.pdf
- [26] Nickel Metal Hydride (NiMH). *Accutronics* [online]. [cit. 21.3.2021] Dostupné z: https://www.accutronics.co.uk/pages/nickel_metal_hydride_cell_technology.html
- [27] Nickel-based Batteries. *Battery university* [online]. [cit. 21.3.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries
- [28] The ultimate guide: Toyota Prius battery life, cost and warranty. *Green cars report*. [online]. [cit. 21.3.2021] Dostupné z: https://www.greencarreports.com/news/1059907_the-ultimate-guide-toyota-prius-battery-life-cost-and-warranty
- [29] TICHÝ, Jiří. *Lithiové akumulátory-Přehled základních typů a jejich vlastností*. [online]. [cit. 28.3.2021]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [30] JOHNSON, K. Scott. *Here's what Tesla will put in its new batteries*. [online]. [cit. 28.3.2021]. Dostupné z: <https://arstechnica.com/cars/2020/09/heres-what-tesla-will-put-in-its-new-batteries/>
- [31] What are the advantages and disadvantages of Lithium-ion battery? [online]. [cit. 28.3.2021]. Dostupné z: <http://kinstarbattery.com/Service/faq/16>
- [32] Types of Lithium-ion. *Battery university* [online]. [cit. 3.4.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion
- [33] KOBIE, Nicole. *A Cobalt Crisis Could Put the Brakes on Electric Car Sales*. [online] [cit. 3.4.2021]. Dostupné z: <https://www.wired.com/story/a-cobalt-crisis-could-put-the-brakes-on-electric-car-sales/>
- [34] ZABLOCKI, Alexandra. *Fact Sheet | Energy Storage (2019)*. [online] [cit. 3.4.2021]. Dostupné z: <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>
- [35] Rekordní kapacita SIESTORAGE od Siemens. *Oficiální stránky firmy Siemens*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/energo/cesky-siemens-doda-nejvetsi-bateriovy-akumulacni-system-v-ceske-republice>
- [36] Advantages of Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) batteries in solar applications explained. *Solar builder*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z:

- <https://solarbuildermag.com/batteries/advantages-of-lithium-iron-phosphate-lifepo4-batteries-in-solar-applications-explained/>
- [36] O nás. *HE3DA*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://www.he3da.com/o-nas>
- [37] Česká technologie HE3DA boří limity současných lithiových baterií. E.ON Energy globe. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://www.energyglobe.cz/temata-a-novinky/-a121491--NdMt4kHU/ceska-technologie-he3da-bori-limity-soucasnych-lithiovych-baterii>
- [38] DIOPAN, Václav. *Lithium-titanátové baterie: opomíjená technologie s velkým potenciálem?* [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/lithium-titanatove-baterie-opomijena-technologie-s-velkym-potencialem>
- [39] Škoda zahájila dodávky tramvají do tureckého Eskişehiru, testy proběhnou v Bratislavě. *Československý dopravák*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/2018-3-8-koda-zahjila-dodvky-tramvaj-do-tureckho-eskiehiru-testy-probhnou-v-bratislav/>
- [40] Quick Facts. *MARS helicopter tech demo*. [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupné z: <https://mars.nasa.gov/technology/helicopter/#Quick-Facts>
- [41] BALARAM, Bob et al. *Mars Helicopter Technology Demonstrator*. [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupné z: https://rotorcraft.arc.nasa.gov/Publications/files/Balaram_AIAA2018_0023.pdf
- [42] IDELAH, Imad. *Li-ion Cell Types*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://news.inventuspower.com/blog/li-ion-cell-types>
- [43] DELL E6420 laptop battery unboxing & disassembling. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://lenoge.wordpress.com/2016/06/28/dell-e6420-laptop-battery-unboxing-disassembling/>
- [44] 5 Easy Ways to Spot a Counterfeit 18650 Battery. *Healthcabin blog*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://www.healthcabin.net/blog/5-easy-ways-to-spot-a-counterfeit-18650-battery/#How to Avoid Buying Counterfeit 18650 Batteries>
- [45] What is a Lithium Polymer Battery. *Electronic notes*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-

- [technology/li-ion-lithium-polymer-battery.php](#)
- [46] Cashify Explains: Difference Between Lithium-Ion And Lithium Polymer Batteries? *Cashify*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://www.cashify.in/difference-between-lithium-ion-and-lithium-polymer-batteries>
- [47] MOTAVALLI, Jim. *The Eternal Promise of Solid-State Batteries*. [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://www.autoweek.com/news/green-cars/a35367888/the-eternal-promise-of-solid-state-batteries/>
- [48] ZHAO, Xiaohui et al. *Lithium/Sulfur Secondary Batteries: A Review*. [online]. [cit. 8.4.2021]. Dostupné z: <https://www.jecst.org/journal/view.php?number=68>
- [49] Umožní nová baterie dojezd až 2 000 km pro elektromobily? *Solarninovinky.cz*. [online]. [cit. 8.4.2021]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/umozni-nova-li-s-baterie-dojezd-az-2-000-km-pro-elektromobily/>
- [50] How does Graphite Work in Li-ion? *Battery university*. [online]. [cit. 10.4.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/bu_309_graphite
- [51] Graphene batteries: Introduction and Market News. *Graphene-Info*. [online]. [cit. 10.4.2021]. Dostupné z: <https://www.graphene-info.com/graphene-batteries>
- [52] Future Batteries. *Battery university*. [online]. [cit. 10.4.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries
- [53] Basic Electronics 28 – Geometries and standard sizes of batteries. *Engineers garage*. [online]. [cit. 10.4.2021]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/featured/articles-basic-electronics-battery-packs-standard-sizes/>
- [54] MA, Shuai et al. *Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review*. [online]. [cit. 23.4.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007118307536>
- [55] Volkswagen v Evropě chystá továrny na baterie, uvažuje i o Česku. *Auto.cz*. [online]. [cit. 25.4.2021]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/volkswagen-v-evrope-chysta-tovarny-na-baterie-uvazuje-i-o-cesku-138406>

Přílohy

Přílohy byly odevzdány v elektronické podobě a obsahují:

- Katalogové listy měřených vzorků
- Manuály použitých přístrojů
- Tabulky naměřených hodnot