

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv vnějšího prostředí na parametry akumulátorů

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na baterie a akumulátory vyráběné a používané v současnosti. Nejprve práce shrnuje základní parametry baterií a akumulátorů a metody pro jejich měření. Další část ukazuje reálné využití bateriových technologií na základě různých vlastností a konstrukce, a zabývá se také jejich ekonomickými parametry a stavem trhu s elektrochemickými zdroji energie obecně. Druhá část se věnuje laboratornímu měření a porovnání parametrů vybraných vzorků nejběžnějších typů baterií a akumulátorů, a to za běžných a také změněných podmínek vnějšího prostředí, a následně analýze vlivu těchto podmínek na sledované parametry.

Klíčová slova

Elektrochemický zdroj napětí, baterie, akumulátor, kapacita, gravimetrická hustota energie, kilowatthodina, ampérhodina, nabití akumulátorů, nabíjecí cyklus, použití akumulátorů, olověná baterie, lithiový článek, elektrický pohon, elektromobilita, IoT, bezpilotní letadlo, klimatická komora

Abstract

The bachelor thesis is focused on current battery and accumulator technology. First it presents basic battery parameters and methods of their measurement. Next part shows real use of these power sources based on their different attributes and designs. It also evaluates economical parameters and electrochemical power sources market in general. Second part is dedicated to laboratory tests of selected samples of common battery and accumulator types in normal and changed external environment conditions, followed by analysis of impact of these conditions on parameters of the samples.

Key words

Electrochemical voltage source, battery, accumulator, capacity, gravimetric energy density, kilowatthour, amphour, accumulator charge, charge cycle, accumulator use, lead-acid battery, lithium cell, electrical drive, electric vehicle, IoT, UAV, climatic chamber

Prohlášení

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

.....
podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Michal Hora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. et Ing. Petru Kašparovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady, připomínky a vedení práce. Dále mé díky patří také panu doc. Ing. Hammerbauerovi, p. Ing. Aleši Voborníkovi a p. Ing. Karlu Šimovi z KET ZČU za zapůjčení potřebných přístrojů. V neposlední řadě také p. Ing. Hirmanovi za umožnění přístupu a asistenci při provedení klíčových testů v klimatické komoře v RICE ZČU. Závěrem děkuji rodině a přátelům za podporu při psaní a tipy ke zpracování a také přítelkyni za pomoc s grafickou úpravou částí práce.

Obsah

1	ÚVOD	8
1.1	PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ ČLÁNEK, BATERIE.....	9
1.2	PARAMETRY AKUMULÁTORŮ	9
1.3	MĚŘENÍ A ZKOUŠENÍ AKUMULÁTORŮ.....	11
1.4	ZPŮSOBY NABÍJENÍ AKUMULÁTORŮ	12
2	BATERIE	14
2.1	BATERIE (PRIMÁRNÍ ČLÁNKY) POUŽÍVANÉ V SOUČASNOSTI	14
2.2	POROVNÁNÍ TECHNICKÝCH A EKONOMICKÝCH PARAMETRŮ.....	19
2.3	VYUŽITÍ BATERIÍ S OHLEDEM NA JEJICH VLASTNOSTI.....	20
3	AKUMULÁTORY	22
3.1	AKUMULÁTORY POUŽÍVANÉ V SOUČASNOSTI.....	22
3.2	POROVNÁNÍ TECHNICKÝCH A EKONOMICKÝCH PARAMETRŮ.....	29
3.3	VYUŽITÍ AKUMULÁTORŮ S OHLEDEM NA JEJICH VLASTNOSTI	30
4	LABORATORNÍ MĚŘENÍ PARAMETRŮ	34
4.1	PODMÍNKY A ZPŮSOB MĚŘENÍ	34
4.1.1	<i>Postup měření za normálních podmínek</i>	34
4.1.2	<i>Postup měření za změněných podmínek</i>	34
4.1.3	<i>Diagram zkoušky a schéma zapojení</i>	35
4.1.4	<i>Použité přístroje</i>	36
4.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	38
4.2.1	<i>Vybíjecí charakteristiky – baterie AA 3,6V</i>	38
4.2.2	<i>Vybíjecí charakteristiky – baterie D 3,6V</i>	39
4.2.3	<i>Vybíjecí charakteristiky – akumulátory Li-Ion 18650 3,6V</i>	40
4.2.4	<i>Vybíjecí charakteristiky – akumulátory Li-Pol 11,1V</i>	41
4.3	VIZUALIZACE ZJIŠTĚNÝCH PARAMETRŮ	42
4.3.1	<i>Shoda s výrobcem udanými parametry</i>	42
4.3.2	<i>Gravimetrická hustota energie – porovnání</i>	44
4.3.3	<i>Výkon za změněných podmínek – porovnání</i>	45
4.3.4	<i>Technologie Li-Ion vs. Li-Pol – porovnání při zátěži IC</i>	46
4.3.5	<i>Cena za kWh – porovnání</i>	47
	ZÁVĚR	48
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49
	PŘÍLOHY – OBSAH CD	1

1 Úvod

Moderní společnost je charakterizována neustálou potřebou energie. V minulosti byly jejími hlavními zdroji prakticky pouze fosilní paliva, která mají určité výhody i nevýhody. Jednou z hlavních výhod je bezesporu jejich relativně snadná transportovatelnost, kdy se v objemové a hmotnostní jednotce vyskytuje velké množství využitelné energie, u vozidel a letadel zároveň s postupným spotřebováváním paliva klesá celková hmotnost, což je velice výhodné. V posledních desetiletích se ovšem společnost soustřeďuje jak na změny v životním prostředí vyvolané neobnovitelnými zdroji, tak na vliv emisí ze spalování fosilních paliv na okolní prostředí a lidské zdraví (např. mikročástice jako odpadní produkt spalovacích procesů). Proto se snažíme najít co nejšetrnější zdroje energie, pokud možno obnovitelné. Pokud pomineme výrobu paliv ze zemědělských plodin a využití geotermální energie (omezeno lokálně), největší množství energie se nám daří získávat z vody, větru a slunečního záření ve formě elektrické energie, u posledních dvou jmenovaných ovšem nepravidelně a nesouvisle, což klade vysoké nároky na způsoby uchování energie do času spotřeby. Existují různé způsoby uchování, avšak největší zájem je o to, mít energii v kompaktní, co nejlépe transportovatelné formě.

Pánové Luigi Galvani a Alessandro Volta z Itálie se postarali o to, že galvanický článek je znám již od roku 1800, avšak rozměry a hmotnost v poměru k výkonu znemožňovaly jejich nasazení do náročných aplikací. Velkou roli hraje také ekonomické hledisko, ve kterém byly na dlouhou dobu fosilní zdroje jako zdroj přenosné energie prakticky bezkonkurenční. Přenosná energie ve formě nových výkonných baterií s vysokou hustotou energie v posledních desetiletích umožnila rychlý rozvoj mnoha odvětví lidské činnosti, jako je mobilní komunikace, výpočetní technika, lékařství (např. kardiostimulátory, snímače životních funkcí), jako pohon nejrůznějších systémů pro letectví a průzkum vesmíru, autonomních robotických systémů a v neposlední řadě i nové způsoby dopravy na neelektrifikovaných komunikacích (prozatím převážně osobní). Výzkum a zlepšování technologií uchování energie ve formě nejrůznějších druhů baterií a dalších elektrochemických zdrojů je tedy kritickým článkem v přechodu na obnovitelné zdroje energie, potřebné pro trvale udržitelný rozvoj technologií a společnosti obecně. Následující text bakalářské práce se věnuje moderním bateriím a akumulátorům a současnému stavu trhu s nimi.

1.1 Primární a sekundární články, baterie [1]

Elektrochemické zdroje proudu jsou obecně zařízení na přímou přeměnu chemické energie v elektrickou energii. Tyto zdroje stejnosměrného napětí se obvykle skládají z více článků, přičemž každý poskytuje napětí obvykle 1,2 – 4,4 V, pro získání potřebného napětí jsou propojeny do série. V galvanických člancích obecně dojde vlivem chemické reakce ke spotřebování celého množství reaktantů a články ztrácejí svoji funkčnost – tyto články nazýváme primární články.

Akumulátorový článek je tzv. sekundárním zdrojem stejnosměrného napětí. Má schopnost hromadit energii stejnosměrného proudu během jejich nabíjení a tu zpětným elektrochemickým procesem vydat – tento typ zdroje nazýváme sekundární články. Sestava z jednotlivých článků propojených sériově, paralelně i kombinovaně dohromady se nazývá baterie (primární články) a akumulátorová baterie (sekundární články).

Tato práce klade důraz spíše na sekundární články, neboť u veškerých náročnějších aplikací (kterých je většina) je ekonomicky i ekologicky nepřijatelné, abychom používali články, které není možné nabíjet a znovu použít, ať už se jedná o obrovské nároky na materiály, ale i energii spotřebovanou při výrobě a transportu a tím pádem značnou ekonomickou nevýhodnost a zátěž pro životní prostředí.

1.2 Parametry akumulátorů [1],[2],[3]

Akumulátory jsou hodnoceny z různých hledisek – elektrické parametry a parametry elektrochemické přeměny, fyzikální a mechanické vlastnosti, životnost a další. Zde je uveden přehled hlavních parametrů, veličin a jednotek používaných k těmto účelům:

Veličina / Parametr	Označení	Jednotka
Svorkové napětí – naprázdno/pod zátěží	U_0/U_z	V
Zatěžovací / Nabíjecí proud	I_z	A
Jmenovitá kapacita	C_{jm}	Ah
Vybíjecí kapacita	Q_v	Ah
Proudová zatížitelnost / Rychlost nabíjení*	C	-
Vnitřní odpor	R_v	mΩ
Samovybíjení	Δu	%/měsíc
Energetická hustota	-	Wh·m ⁻³

Gravimetrická hustota energie	-	Wh·kg⁻¹
Objemová hustota energie	-	Wh·l⁻¹
Počet cyklů (životnost)**	-	Cy
Skladovatelnost	-	roky
Cena za 1 kWh	-	USD/kWh nebo Kč/kWh
Cena za 1 cyklus	-	USD/Cy nebo Kč/Cy

Dalšími obecnými vlastnostmi a parametry akumulátorů jsou:

- Pracovní teplota nebo její rozsah [°C]
- Nominální napětí článku [V]
- Krátkodobá proudová přetížitelnost (10/30 sekund) [C_{max}]
- Tolerance přebíjení a hlubokého vybití, případně zkratu, funkce ochranných obvodů
- Bezpečnost provozu a chování článku při mechanickém poškození
- Konfigurace článků P (paralelní) a S (sériová)***

* – Proudová zatížitelnost článků a je vyjádřena tzv. poměrem C, který vyjadřuje poměr mezi proudem v A který můžeme odebírat a kapacitou daného článku v Ah. Články jsou obvykle charakterizovány více hodnotami parametru C:

- maximální proudovou zatížitelností C_{konst} , což je proud v A, který by měl být schopen článek souvisle dodávat až do stavu úplného vybití bez toho, aby došlo k jeho poškození
- maximální proudovou přetížitelností C_{max} , což je maximální proudová špička, obvykle omezená na 10 až 30 sekund, kterou je možné akumulátor přetížit bez jeho zničení, za předpokladu, že se do předepsané doby odebíraný proud sníží alespoň o tolik, aby nepřesahoval hodnotu C_{konst}
- doplňkovou hodnotou $C_{optimální}$, což je nejvyšší hodnota proudu, při které článek dokáže dodat maximum energie ze svojí nominální kapacity (záleží i na dalších parametrech jako např. provozní teplota).

** – Kapacita všech používaných akumulátorů se prakticky bez výjimek opotřebením snižuje. Životnost článku se obvykle určuje jako počet cyklů úplného nabití a vybití článku, předtím, než se jeho použitelná kapacita sníží na 80 % hodnoty nominální kapacity. U dnešních typů akumulátorů, bez paměťového efektu (tímto nedostatkem trpěly dnes ustupující akumulátory na bázi Ni, které se musely „formátovat“ úplným cyklem vybití a nabití) je obvykle životnost v cyklech počítána jako kumulativní hodnota dobité energie v Ah v poměru k nominální kapacitě, opět do snížení kapacity článku na 80 % nominální hodnoty. Sběr potřebných dat je obvykle realizován tzv. BMS systémem = Battery Management System.

*** – Například označení 10S3P znamená že v sérii je zapojeno 10 článků (aby bylo dosaženo potřebného napětí) a 3 tyto série jsou spojeny paralelně (pro dosažení potřebné kapacity, ale i proudové zatížitelnosti).

1.3 Měření a zkoušení akumulátorů [1]

1.3.1 Měření napětí naprázdno

Napětí naprázdno U_0 se měří při nezatíženém článku pomocí voltmetru s velkým vnitřním odporem a s odpovídající přesností. V případě požadavku vysoké přesnosti se používá přesných cejkovaných digitálních voltmetrů.

1.3.2 Měření vnitřního odporu

Vnitřní odpor R_v se měří voltmetrem s velkým vnitřním odporem tak, že nejprve změříme napětí naprázdno U_0 a potom změříme svorkové napětí U_z na zatíženém článku. Odpor zátěže musí být dimenzovaný na proudové zatížení článku, alespoň 0,1 C. Pro R_v platí následující vztahy:

$$I_z = \frac{U_z}{R_z} \quad I_z = \frac{U_0 - U_z}{R_v} \quad (1.1)$$

$$R_v = \frac{R_z(U_0 - U_z)}{U_z} [m\Omega] \quad (1.2)$$

Vnitřní odpor není konstantní a mění se za různých podmínek, obvykle nás zajímá změna během vybíjení, kdy se hodnota obvykle zvyšuje, což má za následek pokles pracovního napětí. Ke změně dochází také vlivem stárnutí, avšak tato veličina není dostatečným indikátorem stavu a zdraví baterie, tyto vlastnosti lze spolehlivěji zjistit při kontrolovaném nabíjení nebo vybíjení (např. měřením zotavovací doby po krátkém, velkém proudovém odběru).

1.3.3 Měření kapacity

Vybíjecí kapacita Q_v se určuje v ampérhodinách. Při měření za daných podmínek prostředí se článek vybíjí proudem, daným zatěžovacím odporem R [Ω]. Současně se měří svorkové napětí. Zmenší-li se svorkové napětí na mez určenou výrobcem jako charakteristické napětí pro vybitý stav, měření je ukončeno a je zaznamenán čas vybíjení t . Z údajů svorkového napětí během vybíjení lze určit průměrné svorkové napětí U_p . [V] Výsledná kapacita článku je dána vztahem:

$$Q_v = \frac{U_p \cdot t}{R} [Ah] \quad (1.3)$$

V praxi se dnes používá spíše tzv. „Coulomb counting“, který využívá k měření ampérsekund [As], získaných např. integrací údajů ze snímače proudu a napětí v čase. Používá se často nepřetržitě, po celou dobu životnosti akumulátoru, a to jak při vybíjení, tak

při nabíjení. Při tomto typu měření malá část energie procházející snímačem ztratí, případně jen ožné použít bezkontaktní sondu. Tento princip je dnes nejpoužívanější metodou, a je součástí většiny BMS (Battery Management System) akumulátorů na bázi litíh.

K přesnějšímu vyhodnocení kapacity a stavu akumulátoru se také používají další údaje, jakými jsou teplota (zahřívání), doba nabíjení, údaje o kapacitě z předchozích vybíjecích a nabíjecích cyklů. Vlivem stárnutí je i tento systém nutné kalibrovat, avšak právě díky údajům o předchozím vybíjecím cyklu je možné implementovat funkci „učení“ a díky tomuto systému, obvykle integrovanému přímo na akumulátoru, je možné poskytovat co nejpřesnější údaj o aktuálním nabití akumulátoru uživateli nebo řídicímu systému napájeného zařízení.

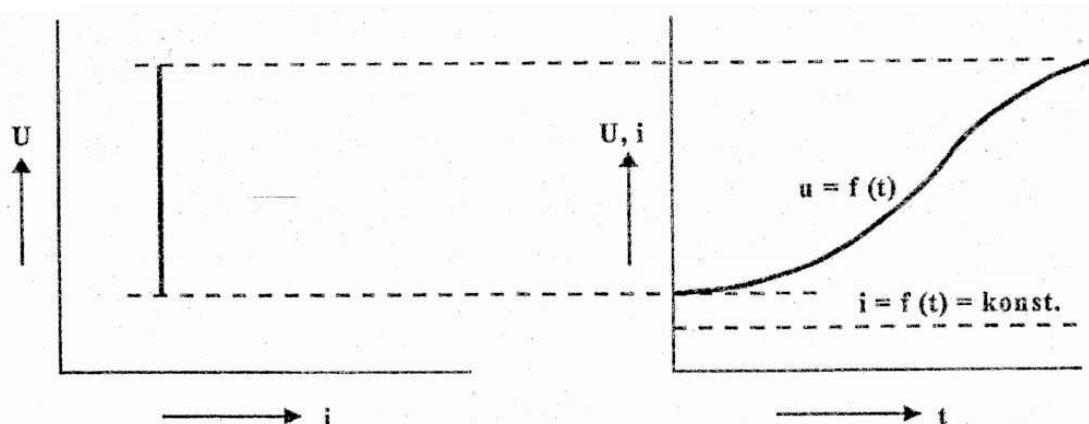
1.4 Způsoby nabíjení akumulátorů [1]

1.4.1 Nabíjení konstantním napětím (CV)

Tento typ nabíjení se používá hlavně u olověných dopravních a startovacích akumulátorů. Průběh proudu je charakteristický vysokou počáteční hodnotou, která postupně klesá, proto je vhodné jej (při nabíjení Pb akumulátoru) na začátku omezit na hodnotu kolem 0,6 – 1,2 C. Nabíjení je ukončeno v okamžiku kdy nabíjecí proud nepřesahuje 0,002 C.

1.4.2 Nabíjení konstantním proudem (CC)

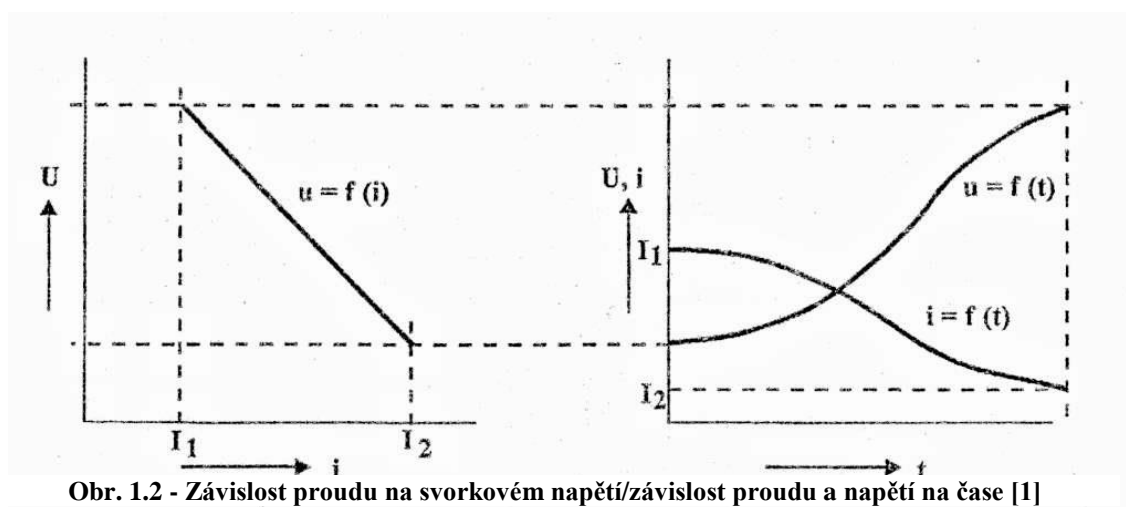
Nabíjení konstantním proudem se používá převážně při uvádění olověných článků do činnosti. Proud je omezen na určitou hodnotu, která je vhodně přizpůsobena vlastnostem článku. Sledování dobité kapacity je také velmi jednoduché, neboť stačí sledovat čas. Stejně tak nevzniká problém při změně počtu článků v sérii.



Obr. 1.1 - Charakteristika svorkového napětí v závislosti na proudu/na čase [1]

1.4.3 Nabíjení se zmenšujícím se výstupním proudem (CC-CV)

Tento, v současnosti nejrozšířenější typ nabíjení, nejprve probíhá na maximální hodnotě nastaveného proudu způsobem CC (konstantní proud), ukončení nabíjení se vyznačuje tím, že se zvětšujícím se svorkovým napětím akumulátoru (blížícím se maximálnímu konstrukčnímu napětí článku) se postupně zmenšuje nabíjecí proud na hodnotu v rozmezí přibližně $C/5$ až $C/20$. Tohoto způsobu nabíjení se využívá zejména u lithiových akumulátorů, u kterých je nezbytné nepřekračovat přesně stanovenou hodnotu maximálního napětí článku.



Typ nabíjení CC-CV je složitější na řízení, a proto je obvykle řízen jednoduchým mikropočítačem, u kterého je možné přesně programovat správný sklon a správné hodnoty nabíjecích veličin. Často je tento systém vlastností nabíječe nebo je přímo integrován v BMS akumulátoru.

Speciálním případem je mikroprocesorem řízené nabíjení staršího typu článků Ni-MH metodou „trickle-charge“, kdy je možné hlídat hodnotu delta-peak, která vyjadřuje rozdíl mezi konečným nabíjecím napětím článku a napětím naprázdno bez připojeného nabíjení – nabíječ v tomto případě spíná a vypíná nabíjení za účelem měření, v okamžik kdy je po určitém čase po rozpojení (např. 30 s) hodnota rozdílu svorkového napětí článku od konečné hodnoty plného napětí menší než nastavená referenční hodnota, nedojde již k dalšímu sepnutí nabíjení, čímž je nabíjení ukončeno. Tato metoda je mnohem přesnější než metoda využívající poklesu hodnoty proudu při nabíjení typu CV.

2 Baterie

2.1 Baterie (primární články) používané v současnosti

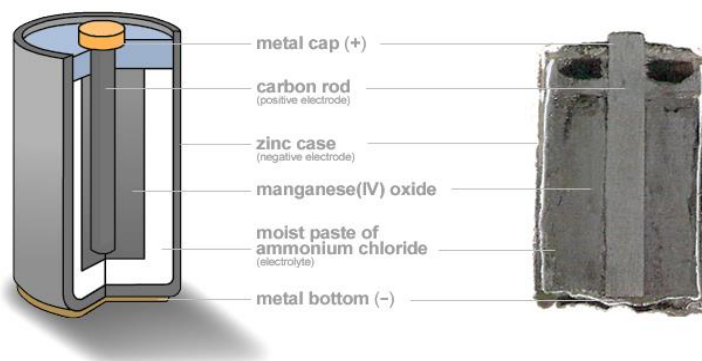
Primární články, také „nenabíjecí“ baterie, mají nezastupitelnou roli hlavně v přenosných, méně náročných zařízeních. K jejich výhodám patří dlouhá skladovatelnost a připravenost k použití, u „vyspělejších“ typů také vysoká hustota energie, značně převyšující sekundární články. Další nespornou výhodou je standardizace velikostí (AAAA, AAA, AA, C, D, 9V/E, CRxxxx...).

Existuje přes 25 druhů a chemických složení primárních článků, následující kapitoly popisují nejběžnější současné baterie a jejich klíčové vlastnosti, jedná se tyto typy:

- Zinko-uhlíkové baterie – Zn-C
- Alkalické baterie – Zn-MnO₂
- Lithiové baterie – Li-FeS₂
- Speciální lithiové baterie - Li-MnO₂, Li-SO₂, Li-SOCl₂

2.1.1 Zinko-uhlíkové baterie – Zn-C[3]

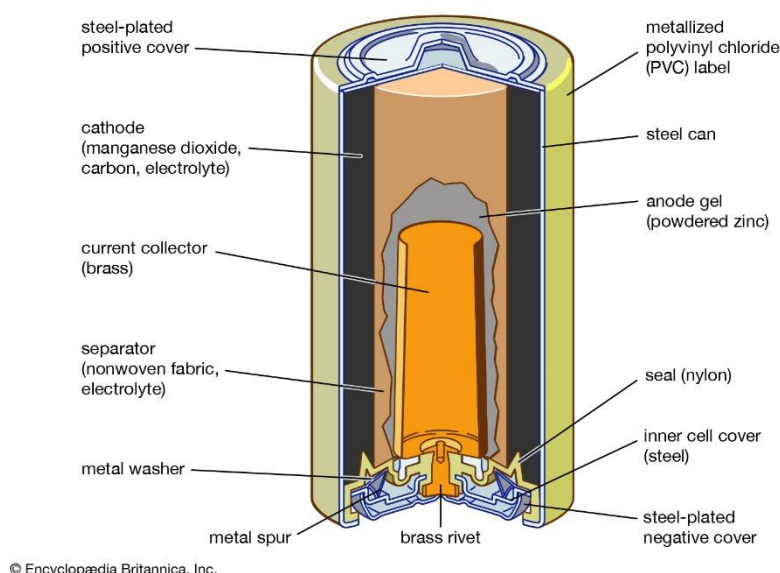
Jedny z prvních, nejlevnějších a notoricky známých baterií (také jako „suchý článek“), byly vynalezeny v roce 1859 Georgesem Leclanchém. Zinkový obal je zároveň katodou a práškový oxid manganičitý MnO₂ (burel), smíchaný s práškovým uhlíkem tvoří anodu. Elektrolyt tvoří chlorid amonný NH₄Cl (salmiak). Nominální napětí je 1,5V. Kromě ceny a dostupnosti nepřináší tento článek žádné velké výhody. Životnost a hustota energie je nízká, vysoký vnitřní odpor předurčuje tyto články jen k nenáročnému užití (dálkové ovladače, hračky, hodiny...). Nevýhodou je také možný únik elektrolytu, který je běžně nasáknut v anodě, avšak po vybití obsahuje množství vody – při vyčerpání tloušťky katody uniká kapalina a způsobuje oxidaci v přístroji.



Obr. 2.1 – Stavba zinko-uhlíkového „suchého“ článku (zdroj: Wikipedia)

2.1.2 Alkalické baterie - Zn-MnO₂ [11] [12]

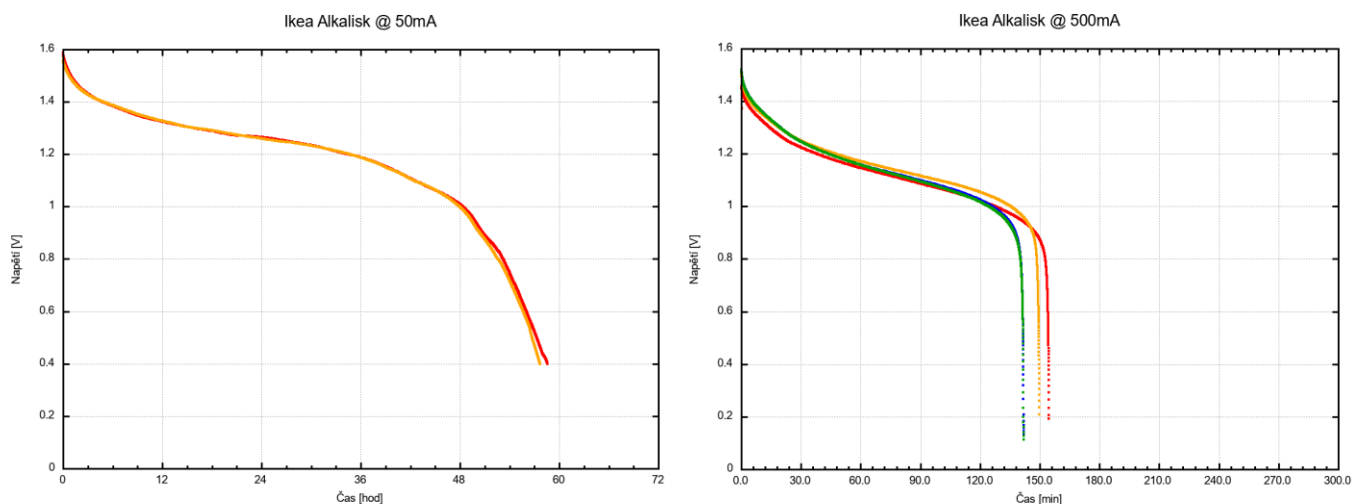
Alkalický článek je dnes nejběžnějším zdrojem energie, používá se prakticky všude, kde se dříve používaly zinko-uhlíkové nenabíjecí baterie. Chemická reakce mezi zinkem a oxidem manganičitým (který je čistější a hustější než původní směs ze suchého článku) nabízí 3-5x vyšší kapacitu ve stejné velikosti, nominální napětí je také 1,5V. Vlastnosti tohoto článku plně dostačují všem málo až středně náročným aplikacím, při vysoké zátěži pak kapacita výrazně klesá. Baterie je složena z uzavřeného ocelového válce, katoda je z MnO₂, oddělená membránou od Zn prášku v elektrolytu (KOH). Nespornou výhodou oproti předchozímu typu je obal článku, který nevstupuje do reakce, čímž se kromě kapacity eliminuje také druhý nejpalčivější problém zinko-uhlíkové baterie, kdy už nedochází k únikům elektrolytu - životnost se tím také zásadně prodlužuje. Díky vyjmenovaným vlastnostem, kvalitě, příznivé ceně a dostupnosti je toto dnes nejrozšířenější jednorázová nenabíjecí baterie.



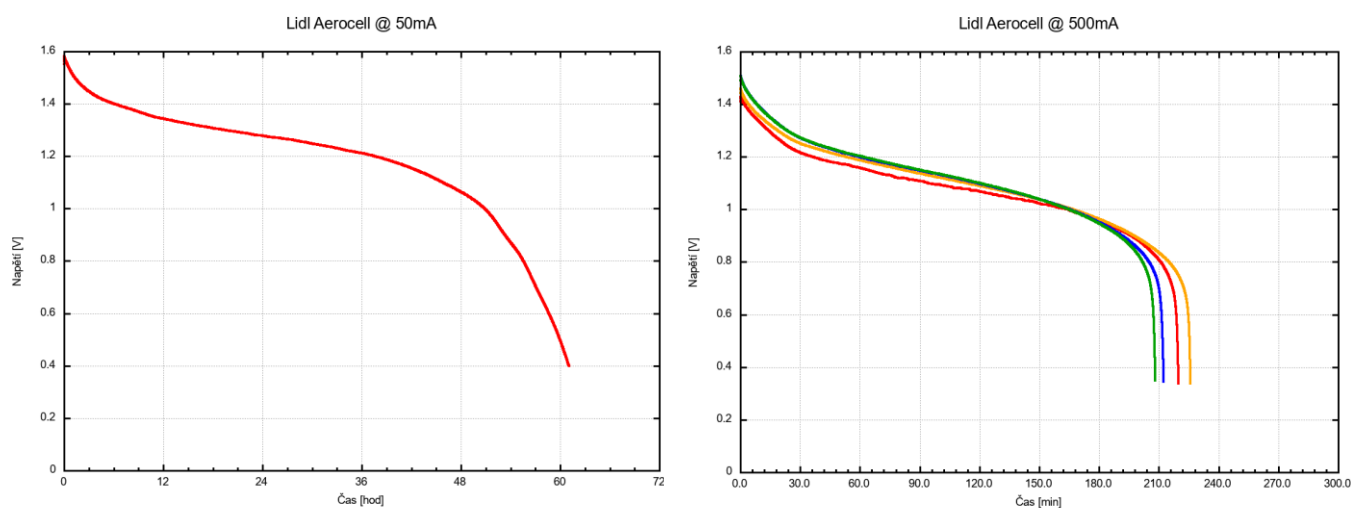
Obr. 2.2 – Stavba alkalického článku (zdroj: Encyklopedie Britannica)



Obr. 2.3 – AA baterie Ikea ALKALISK (4,5 Kč/ks, 1200-2800mAh) a Lidl AEROCELL (7,5 Kč/ks, 1700-3000mAh) – dvě z nejdostupnějších a nejkvalitnějších AA baterií na našem trhu (zdroj: IKEA, Lidl) [12]



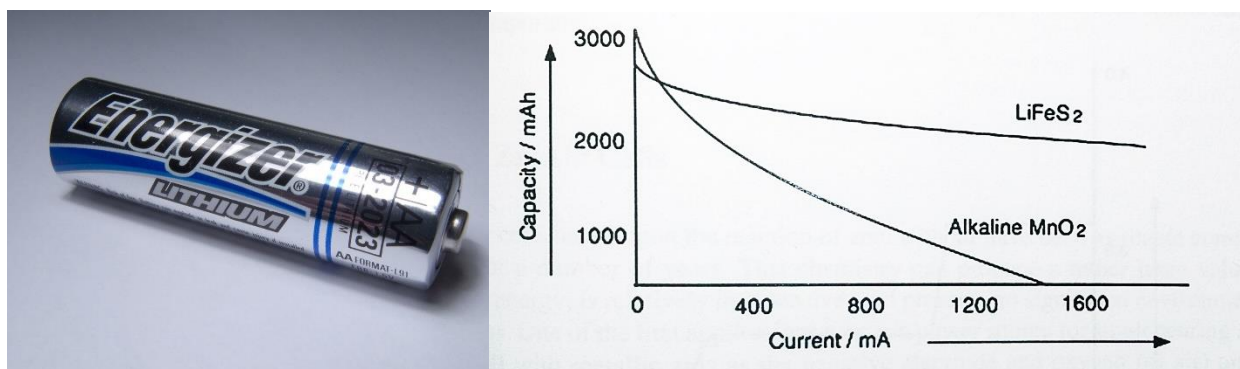
**Obr. 2.4 – Vybíjecí charakteristiky AA baterie Ikea ALKALISK
změřeno: 2870mAh @ 50mA / 1170mAh @ 500mA [12]**



**Obr. 2.5 – Vybíjecí charakteristiky AA baterie Lidl AEROCELL
změřeno: 3040mAh @ 50mA / 1730mAh @ 500mA [12]**

2.1.3 Lithiové baterie – Li-FeS₂ [11]

Dalším typem spotřební baterie je lithiový článek, ve kterém je anoda tvořena kovovým lithiem, nejčastěji ve formě prášku disulfidu železa FeS₂. Elektrolytem bývá lithiová sůl rozpuštěná v organickém rozpouštědle. Článek je dražší než předchozí alkalický typ, proto nachází uplatnění hlavně tam, kde jsou potřebné jeho výhody, kterými je zejména nižší vnitřní odpor (cca ¼ alkalického článku), což umožňuje dodávat větší vybíjecí proud. Napětí je o cca 0,1V vyšší než u alkalického článku a při vybíjení tolik neklesá, články mají také velkou životnost. Zmíněné vlastnosti předurčují využití hlavně ve fotoaparátech, které potřebují krátkodobě velký proud k nabití blesku, případně tam, kde nehraje roli cena.



Obr. 2.6 – AA baterie Energizer Lithium (vlevo) – 44Kč/ks, změřeno: 3400mAh@50-500mA [12]
Porovnání použitelné kapacity lithiové a alkalické baterie při vyšší zátěži (vpravo) [11]

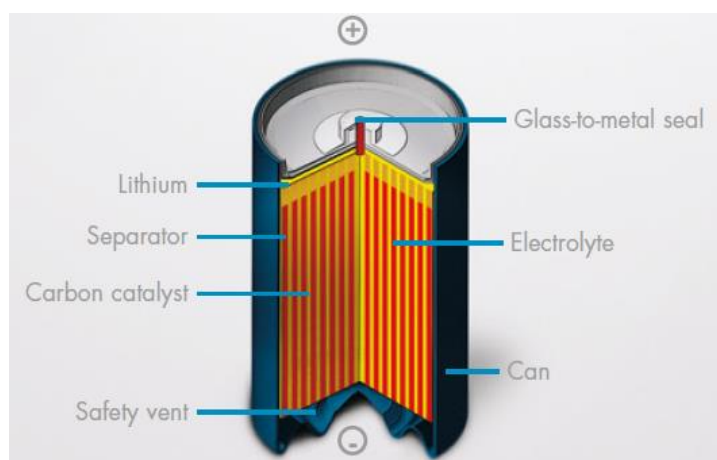
2.1.4 Speciální lithiové baterie – Li-MnO₂, Li-SO₂, Li-SoCl₂

- *Li-SO₂* [2]

Lithiové články s oxidem siřičitým byly poprvé vyrobeny v roce 1960 firmou Honeywell, elektrolyt je vysoce vodivý a skládá se z LiBr a SO₂. Hlavní výhodou je, že tyto články jsou schopny dodávat velké proudové pulzy (30-60A), hustota energie je také velmi příznivá. U tohoto článku se při vysoké zátěži musí hlídat přehřívání, proto obvykle obsahují vypínací separátory a používají se i pojistky a nadproudové ochrany. Využití našly hlavně v armádě a medicíně, postupně jsou však nahrazovány bateriemi Li-MnO₂ s podobnými vlastnostmi.

- *Li-MnO₂* [11]

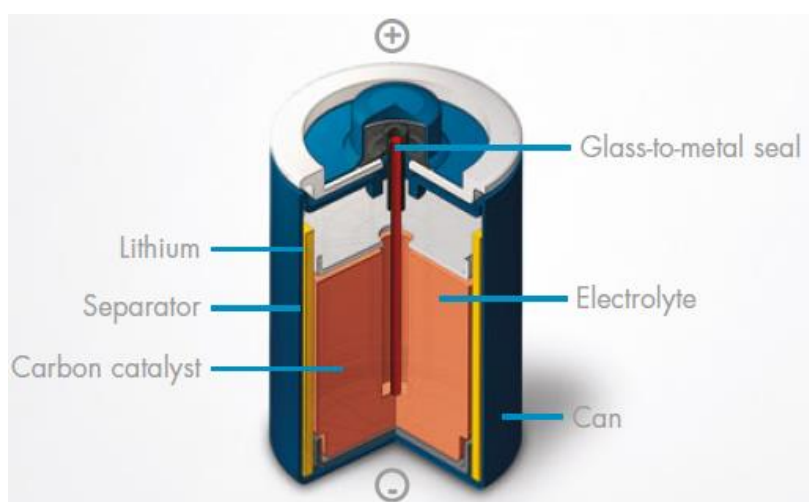
Nejběžnější lithiová baterie, z této skupiny má nejnižší výrobní náklady, jedná se o velmi trvanlivý článek, i v náročných podmínkách. Při náhlé změně odběru má minimální odezvu napětí i po dlouhém skladování, oproti předchozímu typu je také podstatně bezpečnější.



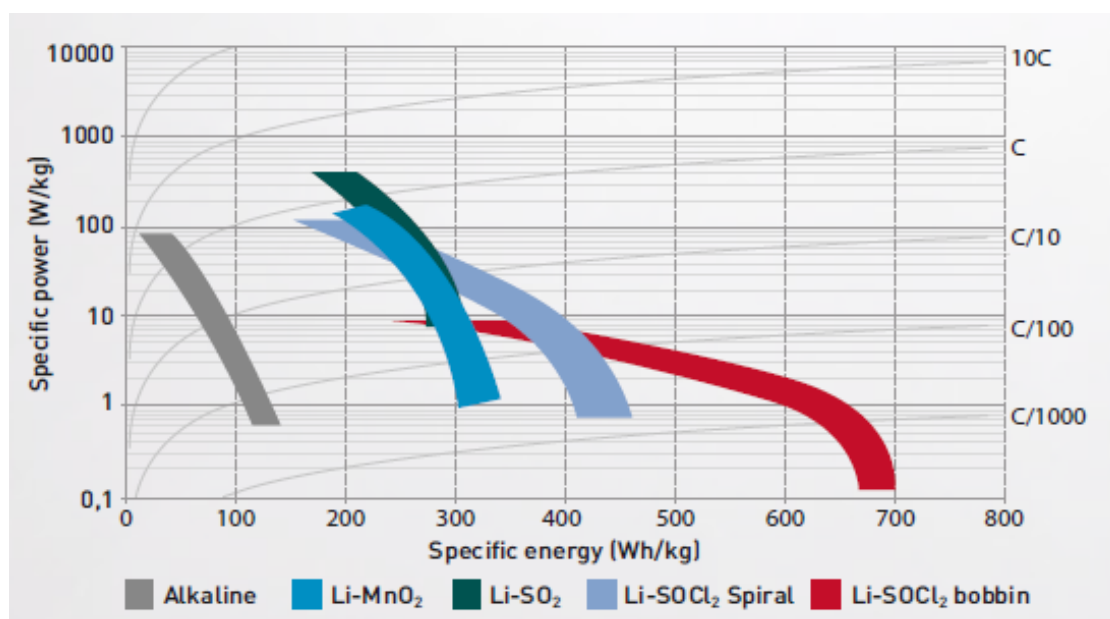
Obr. 2.7 – Vnitřní struktura článků se spirálovitými elektrodami typu Li-SO₂ a Li-MnO₂ (zdroj: SAFT)

- ***LiSOCl₂ (Lithium-thionylchloridový článek) [2]***

Tento článek byl poprvé vyroben v r. 1968, byl nadále vylepšován a v současnosti je to jeden z nejmodernějších primárních článků. Dosahuje velmi vysoké hustoty uložené energie, jelikož lithiová sloučenina je smíchána se speciálně upraveným uhlíkem, aby bylo možné tuto směs používat jako katodu, přímo bez separátoru - obě elektrody jsou umístěny v organickém elektrolytu, tato technologie však vyžaduje precizní a opatrné sestavení při výrobě, přímým důsledkem je tedy vyšší cena. Chemická reakce vyvíjí potenciál 3,6V. Článek má velkou životnost, vysokou hustotu energie a velmi plochou charakteristiku. Vzorky tohoto článku byly zařazeny do laboratorního měření.



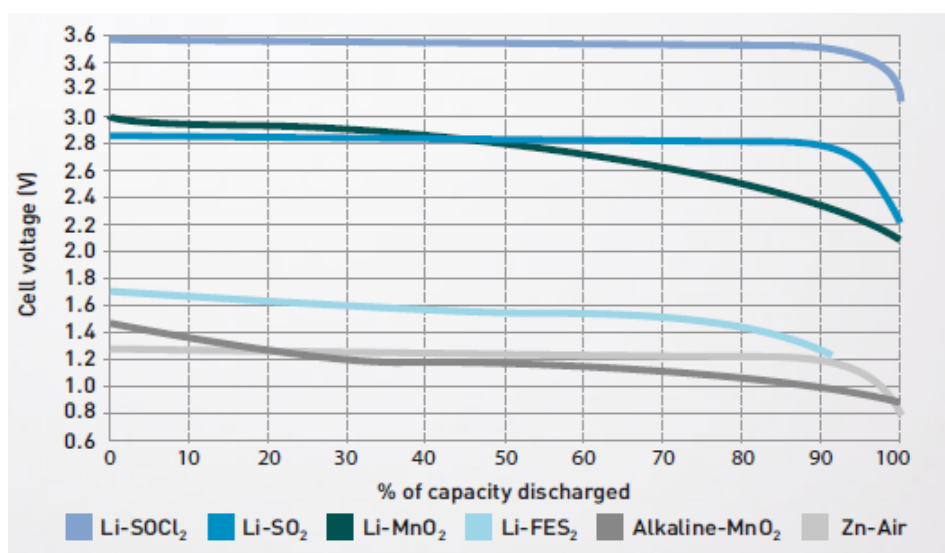
Obr. 2.8 – Vnitřní struktura cylindrického článku Li-SOCl₂ (zdroj: SAFT)



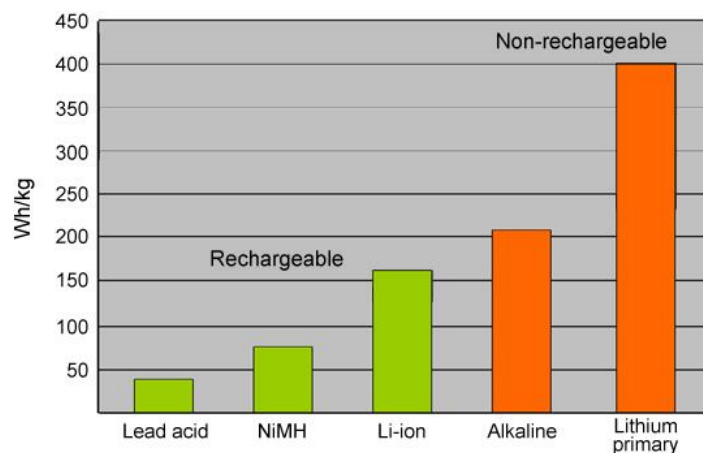
Obr. 2.9 – Porovnání energetické hustoty a proudové zatížitelnosti lithiových článků (zdroj: SAFT)

2.2 Porovnání technických a ekonomických parametrů [3][11][12]

Typ/Parametr	Zn-C	Zn-MnO ₂	Li-FeS ₂	Li-SO ₂	Li-SOCl ₂	Li-MnO ₂
Gravimetrická hustota energie [Wh·kg ⁻¹]	30-40	100-200	až 400	až 330	až 550	až 280
Obvyklá kapacita[mAh]						
AA	750-1000	1800-3000	2500-3400	cca 1000	cca 2600	cca 1800
AAA	cca 300	800-1200	cca 1200			
Nominální napětí čl. [V]	1,5	1,5	1,5	2,8	3,6-3,9	3-3,3
Provozní teplota [°C]	-10 - 50	-10 - 60	-40 - 60	-50 - 70	-60 – 150	-40 - 70
Zatížitelnost	nízká	střední	vysoká	vysoká	nízká	střední
Skladovatelnost [roky]	1-2	5-7	10-15	5 - 10	10 - 20	10-20
Přibližná cena za kWh						
[USD]	140	75	380	200	500	1500
[Kč]						



Obr. 2.10 – Porovnání vybíjecích charakteristik různých primárních článků (zdroj: SAFT)



Obr. 2.11 – Porovnání gravimetrické hustoty energie různých typů primárních a sekundárních článků – oranžové jsou nenabíjecí [3]

2.3 Využití baterií s ohledem na jejich vlastnosti

2.3.1 Spotřební elektronika

V současnosti se primární články používají převážně tam, kde je potřeba jen malých proudů a dlouhé skladovatelnosti. To je také jeden z důvodů, proč je původní typ zinko-uhlíkové baterie víceméně překonán. Využívaly se v různých zařízeních jako rádia, hodiny, hračky, svítilny atd., ovšem narážely na svoje limity – tam kde byl potřeba velký proud dlouho nevydržely, pokud bylo potřeba malé množství energie tak pro změnu dosloužily kvůli životnosti (časté úniky elektrolytu). Zn-C články byly tedy spolehlivě nahrazeny alkalickými články, které již splňují všechny potřebné požadavky – mají velkou kapacitu a vydrží velmi dlouho. U všech nenáročných aplikací od hodin, snímačů, dálkových ovladačů a světel mají svoje místo, naopak tam, kde je zátěž vyšší se nabízí používat baterie nabíjecí jako např. Panasonic Eneloop (viz. kap. 3.1.2), které již eliminují víceméně všechny negativa nabíjecích článků. Jejich cena je při tom cca 15x vyšší oproti alkalické baterii, takže investice se rychle vrátí, ekologické parametry tohoto přístupu ani není potřeba příliš rozebírat.

Další skupinou jsou lithiové primární články, které mají vynikající vlastnosti, co se týká výkonu (použití pro fotoaparáty), mají také dobrou použitelnost při nízkých teplotách – ideální pro použití v extrémních podmínkách (horolezci, záchranáři, vojáci). Tyto články se dají využít také jako záložní – např. hlásiče požáru, bezdrátové hlásiče pohybu atd.

2.3.2 Speciální užití

Li-SO₂ články jsou velmi citlivé a drahé, jejich využití má víceméně pouze 2 směry a to vojenské, jako například raketové systémy, torpédové systémy, zapalovací systémy a další, a medicínské, kde se využívají do automatických externích defibrilátorů. V obou případech je využito hlavního pozitiva – schopnosti dodávat velký proud.

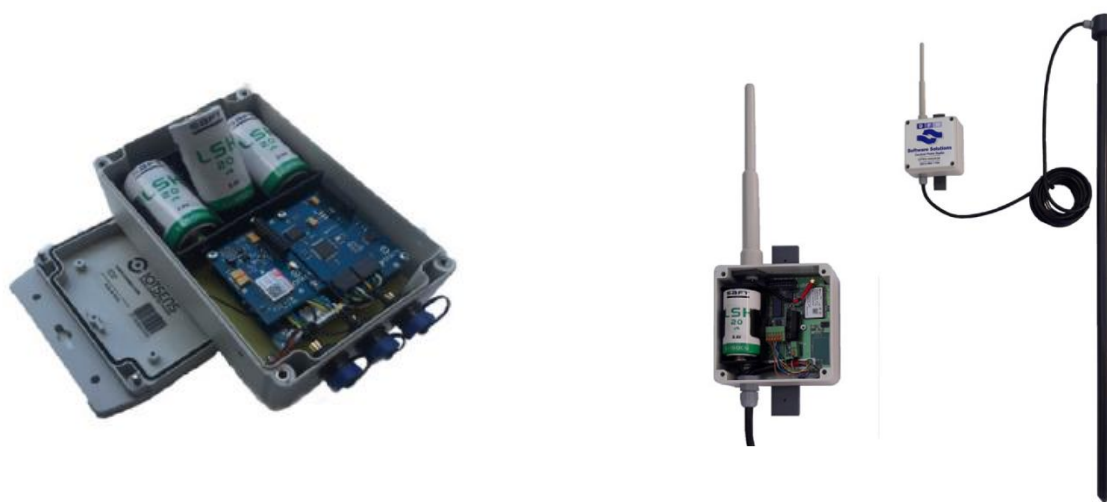
Oproti tomu Li-MnO₂ články tvoří přes 80 procent dnes používaných lithiových článků jejich dlouhá životnost je výhodná zvláště u záložních zdrojů energie pro paměti, hodiny, kalkulačky, fotopasti, ale i miny a munici vyžadující elektrický proud k funkci. Vyrábí se v nejrůznějších tvarech a velikostech, z nichž nejznámější je asi plochý knoflíkový článek CRxxyy, kde xx je průměr v mm a yy tloušťka v desetinách mm. Hodí se také na použití při malém odběru – např. kardiostimulátor, protože



Obr. 2.12 – Typický článek Li-MnO₂ CR2025, 3V, 165mAh (zdroj: ebay.com)

jejich vybíjecí křivka je činní daleko předvídatelnějšími (viz. obr. 2.10).

Li-SOCl₂ článek má nejvyšší energetickou hustotu z lithiových článků, má velmi stabilní napětí v průběhu vybíjení a také nejdelší životnost, hodí se všude tam, kde je periodický krátkodobý odběr (několika desítek či stovek mA) nebo dlouhodobý velmi malý odběr (v řádu μ A). Využití tohoto článku je především průmyslové – napájení bezdrátových čidel, GPS lokátorů, nejrůznější snímací zařízení internetu věcí (IoT), zabezpečovací zařízení, ale opět se také uplatňuje v sektorech, kde není cena na prvním místě – vojenské využití a medicína. Ze všech článků zmíněných v této práci vydrží také nejextrémnější podmínky (-60 – 150°C).



Obr. 2.13 – Využití technologie Li-SOCl₂ – Vlevo snímač průběhu spotřeby vody pro Saudskou Arábii; Vpravo snímač vlhkosti, teploty, slanosti a obsahu kyslíku u kořenů rostlin pro farmáře v JAR – 2 roky bezúdržbového provozu (zdroj: příkladové studie SAFT)

3 Akumulátory

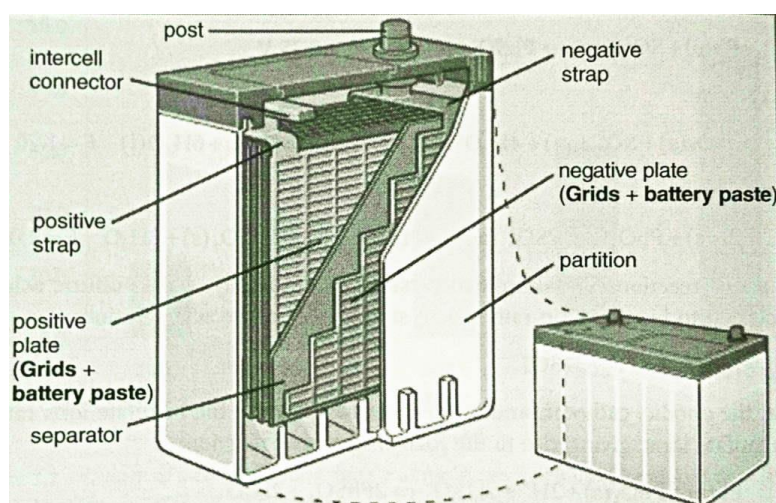
3.1 Akumulátory používané v současnosti

Následující kapitoly popisují dnes běžně používané a vyráběné akumulátory a jejich klíčové vlastnosti, jedná se tyto typy:

- Olověné akumulátory - Pb
- Akumulátory na bázi niklu – Ni-Cd a Ni-MH
- Sekundární alkalické články
- Akumulátory na bázi lithia - Li-Ion, Li-Pol, LiFePO₄

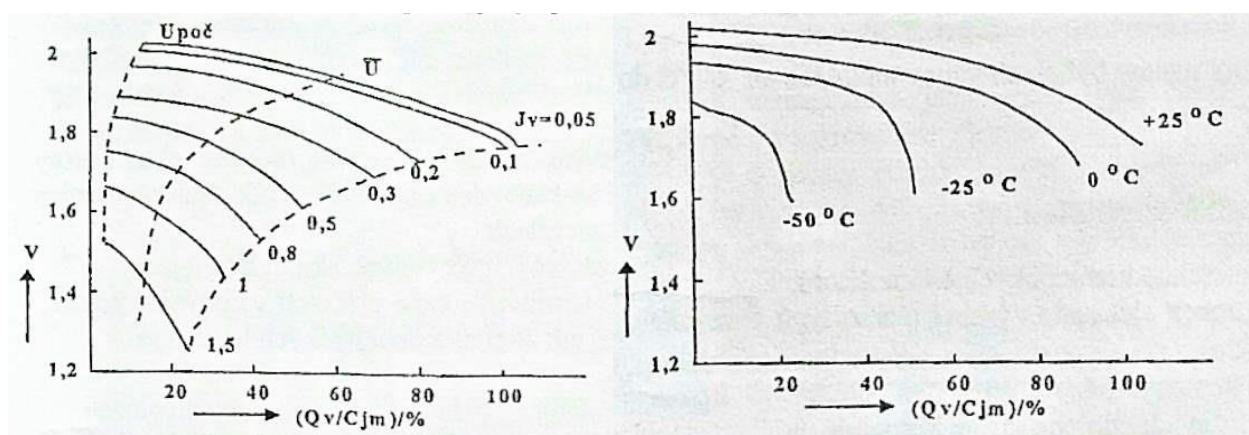
3.1.1 Olověný akumulátor [1][2]

Olověný akumulátor je jedním z nejpoužívanějších sekundárních zdrojů elektrické energie, vyznačuje se příznivou cenou, vysokou spolehlivostí a dobrým výkonem. Základ akumulátoru tvoří olověné elektrody a roztok kyseliny sírové. Při nabitém stavu je na kladné elektrodě oxid olovičitý (PbO₂) a na záporné olovo, při vybíjení se z elektrolytu spotřebovává kyselina sírová, vzniká voda a PbSO₄ se vylučuje na záporné elektrodě. V současnosti se vyrábí olověné akumulátory s hermeticky uzavřenou konstrukcí a separátorem obsahujícím kyselinou sírovou, elektrody jsou porézní pro maximalizaci jejich povrchu, nejnovější typ elektrod je olověný mřížkový s pastou. Místo separátoru se také používá gelový elektrolyt. Obal je obvykle tvořen z ABS plastu s vývody kontaktů a přetlakovým bezpečnostním ventilem.



Obr. 2.1 – Stavba olověného článku [2]

Elektrochemický potenciál reakcí na anodě a katodě olověného článku je celkem 2,05 V, obvykle se používají v sérii po 6 (nominální napětí 12 V). Životnost těchto bezúdržbových akumulátorů je cca 4-5 let, za předpokladu, že jsou používány a nejsou dlouhodobě ponechány bez využití, v takovém případě totiž dojde k sulfataci, kdy produkt vybití PbSO_4 rekrystalizuje ve větší částice s menším povrchem a nízkou vodivostí, které tím zablokují cestu proudu, zvýší vnitřní odpor a baterie tím ztrácí kapacitu. Ze stejného důvodu nejsou tyto baterie odolné hlubokému vybití, proto je vždy po nastartování baterie co nejdříve alternátorem dobíta zpět na plnou kapacitu. Olověná baterie dokáže krátkodobě dodávat velké proudy potřebné například pro start spalovacích motorů (stovky A), obecně mají tyto akumulátory nízkou úroveň samovybití (do 5 %) a gravimetrickou hustotu energie v rozmezí 30-50 Wh/kg.



Obr. 3.2 - Vybíjecí charakteristika startovacího olověného akumulátoru v závislosti na odebíraném proudu a charakteristice vybíjecí kapacity při nízkých teplotách (je patrný značný vliv velikosti odběru a teploty) [1]

Olověné akumulátory mají nezastupitelnou roli v automobilovém průmyslu jako zdroje SLI (Starting, Lightning and Ignition), tedy pro startování, osvětlení a zapalování. Poptávka po těchto akumulátorech rozhodně nemá klesající tendenci, i přesto, že v posledních desetiletích přišlo na trh mnoho nových druhů akumulátorů, žádná z variant nedokáže olověným akumulátorům ekonomicky konkurovat. Z ekonomického a praktického hlediska mají tyto akumulátory své nezastupitelné místo i v dalších aplikacích, jakými jsou zejména záložní zdroje energie UPS v lékařské, telekomunikační a výpočetní technice případně jako zdroj energie pro pohony osobních přepravníků (invalidní vozíky, první elektrická kola).

3.1.2 Akumulátory na bázi niklu

- *Ni-Cd (Nikl-kadmiový akumulátor) [2]*

Nikl-kadmiový akumulátor byl vynalezen poměrně dlouho po prvním olověném

akumulátoru (1899) jako jeho alternativa. Základem je hydroxid oxidu nikelnatého $\text{NiO}(\text{OH})$ na kladné elektrodě, který se při vybíjení mění na $\text{Ni}(\text{OH})_2$, zatímco na záporné elektrodě z kadmia dochází oxidací na $\text{Cd}(\text{OH})_2$, přitom se spotřebovává voda z elektrolytu. Elektrolyt je tvořen vodným roztokem KOH s malým množstvím lithia. Poslední typy Ni-Cd akumulátorů byly stejně jako u olovených akumulátorů hermeticky uzavřené, díky přebytku Cd se negeneroval vodík při náročnějším nasazení a nebylo tedy nutné vodu doplňovat jako u dřívějších typů, které nebyly zcela uzavřeny. Poslední využití našly Ni-Cd baterie v mobilních zařízeních, telefonech, a hračkách. Gravimetrická hustota energie se pohybovala mezi $40\text{-}50 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, což je řadí mezi těžší články. Elektrochemický potenciál reakce je 1,3 V, nominální napětí tohoto článku je 1,2 V.

Výhodou je dobrá životnost, která je ale podmíněna pravidelnou údržbou – plným cyklováním, zároveň mají tyto články dobrý výkon i při nízkých pracovních teplotách. Velkou nevýhodou je vysoká úroveň samovybíjení. V dnešní době se již od tohoto typu upustilo, použití kadmia bylo v r. 2006 značně omezeno nařízením EU pouze na vybraná zařízení, např. vědecká a zdravotnická, u nichž se předpokládá delší životnost a fakt, že velmi pravděpodobně neskončí na skládkách.

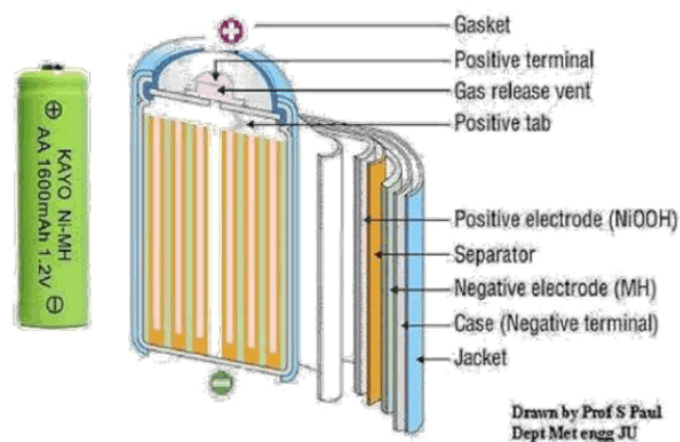
Kadmium je vysoce toxické, je velmi chemicky podobné zinku, proto může vstupovat do enzymatických reakcí běžných pro právě pro zinek a zablokovat tím tyto biochemické pochody.^[6]

- ***Ni-MH (Nikl-metal-hydridový akumulátor) [2]***

Původně Ni-H články byly vynalezeny v 70. letech minulého století jako výsledek výzkumu uchování vodíku v kovových slitinách. První Ni-MH se začaly prodávat v roce 1989 jako variace předchozích Ni-H článků. Označení napovídá značnou podobnost s původními Ni-Cd články, mají stejnou katodu, s tím rozdílem, že anoda je sloučenina AB_5 , kde A je slitinou kovů vzácných zemin: La, Ce, Nd a Pr (případně Ti a V) zatímco B představuje slitinu Ni, Co, Mn a Al (případně Cr, Fe, Mn), tudíž MH v označení znamená „Metal Hydride“, což je kovový hydrid schopný reverzibilně absorbovat vodík během nabíjení a uvolňovat jej do elektrolytu během vybíjení. Elektrolyt je také v podstatě shodný s Ni-Cd článkem (vodný roztok KOH).

Ni-MH baterie mají oproti Ni-Cd téměř dvojnásobnou gravimetrickou hustotu energie $70\text{-}120 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, elektrochemický potenciál a nominální napětí jsou také téměř shodné tj. 1,2V na článek. Ni-MH články mají nižší životnost než Ni-Cd a také trpí paměťovým efektem.

Vrcholem této technologie je dnes typ Panasonic Eneloop, což jsou akumulátory s nízkým samovybíjením vysokou kapacitou a životnosti přes 1500 cyklů, které dokáží nahradit běžné jednorázové tužkové baterie téměř všude.



Obr. 3.3 - Schéma stavby a funkce akumulátoru Ni-MH [10]

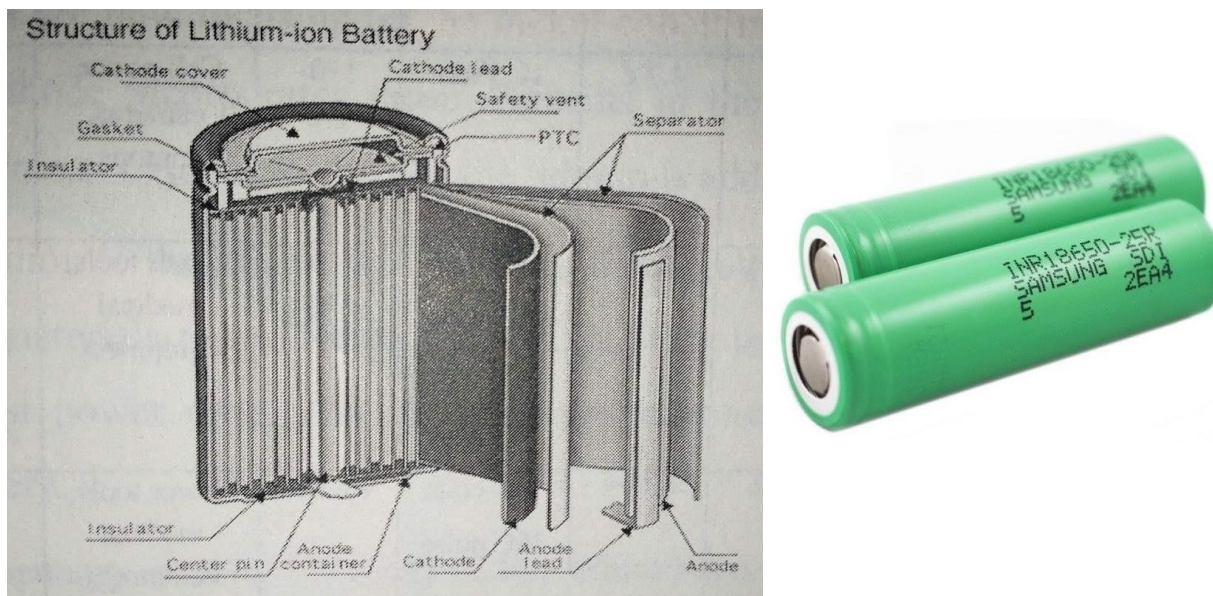
3.1.3 Sekundární alkalické články [2]

Sekundární alkalické články se v základu skládají ze zinkového prášku a gelového KOH elektrolytu sloužícího jako anoda, katoda pak ze směsi MnO_2 , grafitu a přídavku Bi_2O_3 . Všechny komponenty jsou v hermeticky uzavřeném obalu článku. Komerční produkce začala v roce 1993, gravimetrická hustota je cca $80 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Obrovskou výhodou je dlouhá skladovatelnost a velmi nízká úroveň samovybíjení (do 0,3% měsíčně). Baterie sice trpí nízkou životností v cyklech, avšak jsou díky složení šetrné k životnímu prostředí a jsou ideálním zdrojem energie pro nenáročná malá přenosná zařízení ve formě konvenčních typů akumulátorů AAA, AA a C. Jejich nominální napětí je 1,5V, trpí ale vysokým vnitřním odporem, což umožňuje pouze malý proudový odběr. Nyní již ovšem tyto články ustoupily sekundárním lithiovým článkům s lepšími vlastnostmi a větší životností, které jsou navíc díky své tvarové variabilitě často integrovány přímo v zařízeních.

3.1.4 Lithiové akumulátory

- *Li-Ion (Lithium-iontový akumulátor) [2]*

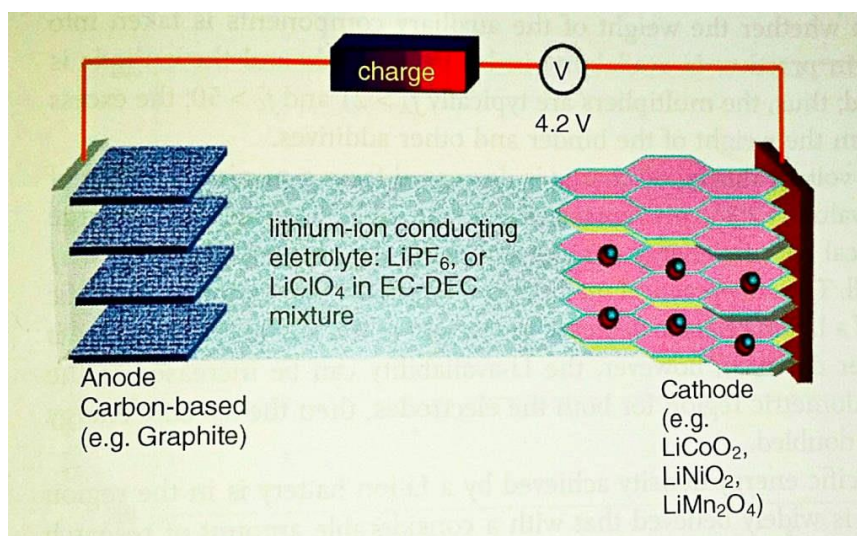
Díky nízké hustotě a vysoké reaktivitě má lithium výrazně lepší parametry na jednotku hmotnosti než olovo, je to také jeden z nejvíce elektropozitivních kovů, čímž umožnilo vzestup elektrod s vysokým elektrochemickým potenciálem. První komerční lithiové články byly vyráběny koncem 70. let (Exxon), později v 90. letech byl vylepšen katody na Li-MoS_2 (61Wh/kg) a o několik let později se Izraelská firma Taridian postarala o další vylepšení s katodou na bázi Li-MnO_2 (230Wh/kg). Tyto první typy lithiových sekundárních článků však trpěly nízkou životností a přestaly se používat z bezpečnostních důvodů, neboť jako anoda bylo použito čisté lithium ve formě tenké folie, které je ovšem v čisté podobě velmi reaktivní, navíc se snadno tvořily dendritické struktury při nabíjecích cyklech což opět ohrožovalo bezpečnost.



Obr. 3.4 – Vlevo stavba Li-ion akumulátoru [7];
Vpravo čl. Samsung INR18650-25R, 3,6V / 2500mAh, I_z max = 20A, 45g (zdroj: Samsung SDI)

Anoda byla později vylepšena na slitinu Li-Al, ($64\text{-}135 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) při životnosti 150-400 cyklů. Velký zlom však přišel v roce 1991 kdy významný vědec na poli baterií John Goodenough uvedl pod značkou Sony první lithiový akumulátor s katodou na bázi Li-CoO_2 a grafitovou anodou. Tento článek byl při plném nabití schopen dosáhnout potenciálu 4.2 V. Reverzibilní reakce je umožněna interakcí lithiových iontů a uhlíkových struktur v organickém bezvodnatém roztoku LiPF_6 a diethylkarbonátu. Díky struktuře Li-CoO_2 byla změna objemu při absorpci a desorpci lithia během cyklování jen 2 %. Grafitová anoda pak byla ideální pro vstřebávání iontů lithia do svojí hexagonální mřížky. Tento článek má ze

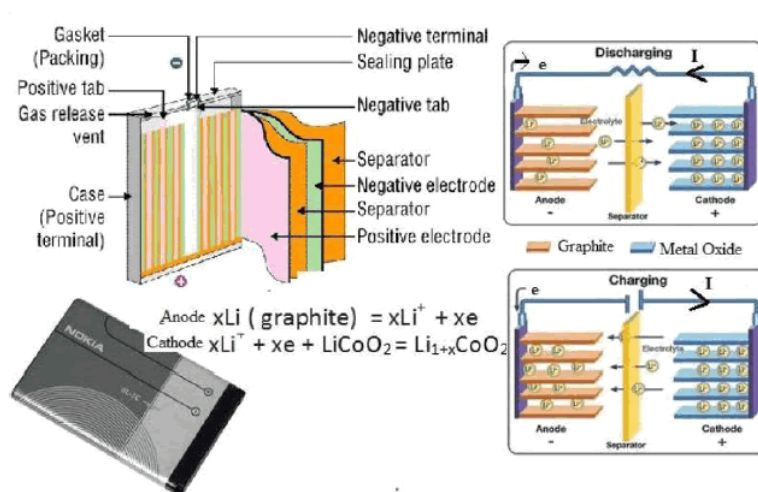
všech druhů největší teoretický potenciál dosáhnout gravimetrické hustoty blížící se $500 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. V praxi je však možné zatím dosáhnout maximálně polovičních hodnot. Typickou reprezentací je cylindrické provedení nejpoužívanějšího článku 18650 (18 mm průměr, 65 mm výška). Na současném trhu působí několik hlavních výrobců těchto baterií Panasonic, LG Chem, Sony a Samsung a další. V současné době si tyto články nově vyrábí i automobilka Tesla Motors pro své elektromobily v novém formátu 2170 (21 mm průměr, 70 mm délka), neboť oproti 18650 poskytují dvojnásobnou kapacitu, která je u elektromobilů velmi žádaná. Ostatní výrobci pro větší kapacitu zvolili formát 20700.



Obr. 3.5 – Princip funkce Li-Ion akumulátoru [2]

- **Li-Pol (Lithium-polymerový akumulátor) [2]**

V roce 1999 byly Li-Ion akumulátory vylepšeny tak, že tekutý elektrolyt byl nahrazen polymerem s gelem, z čehož plyne jejich označení, složení je jinak velmi podobné. Tím že byl nasáklý porézní separátor nahrazen téměř suchým elektrolytem došlo ke zvýšení bezpečnosti, a zjednodušení výroby. Také není potřeba držet elektrody přitlačené k sobě v nádobě tak, jako u cylindrických Li-Ion článků, čímž se omezila hmotnost. Polymerový elektrolyt rovněž nabízí široké možnosti tvaru baterie, kdy je možné vyrobit i velmi tenké, ploché baterie. Jedním z nejnovějších příspěvků ve vývoji lithiových akumulátorů je použití elektrod s prostorovou nanostrukturou, které mají díky prostorovému uspořádání mnohem větší plochu a tím je dosaženo lepších parametrů. Tento typ akumulátorů nese označení H3DA a je dílem českého vynálezce Ing. Jana Procházky, PhD, v současné době dosahuje přibližně $125 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ avšak za podstatně lepší bezpečnosti než předchozí typy baterií.



Obr. 3.7 - Schéma stavby a funkce akumulátoru Li-Pol [10]

- ***Li-FePO₄ (Lithium-železo-fosfátový akumulátor) [4]***

Původně tento katodový materiál objevil také John Goodenough se svým týmem na Texaské univerzitě. Postupným překonáním úvodních překážek přišel na trh lithium-železo-fosfátový akumulátor od firmy A123 Systems. Nominální napětí je nižší než u ostatních lithiových článků a to 3,3 V. Velkou výhodou je možnost dodávat velké proudy, energetická hustota je o něco nižší než v případě Li-Ion avšak po určitém čase používání se Li-Ion bateriím snadno vyrovnají, neboť mají mnohem vyšší životnost.

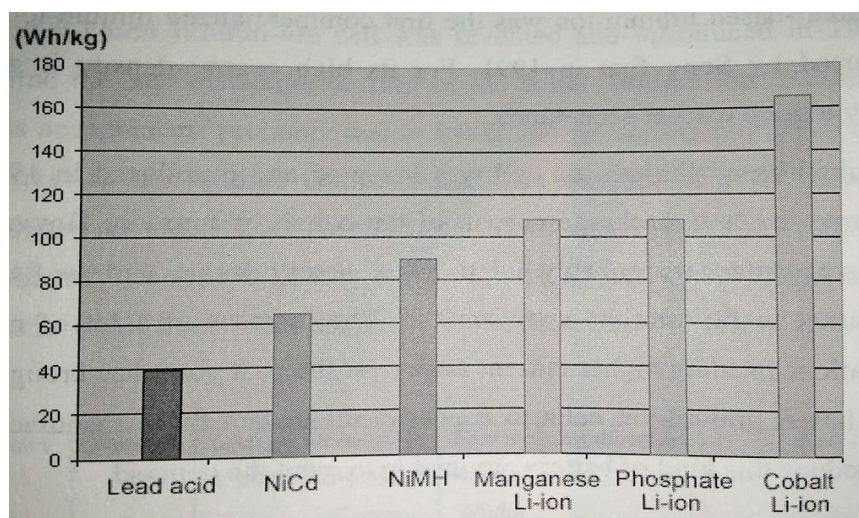
3.2 Porovnání technických a ekonomických parametrů [2][3][4]

Typ/Parametr	Ni-MH	Pb	Li-Ion	Li-Pol	LiFePO ₄
Gravimetrická hustota energie [Wh·kg ⁻¹]	60-120	30-50	100-260	100-250	90-110
Životnost [Cy]	300-2000 ¹	200-300	500-1000	300-500	1000-2000
Vybíjecí proudy [C] Maximální/Optimální	5C/0,5C	5C ² /0.2C	>2C/<1C	>10C/<1C	35C/<1C
Nabíjecí proudy [C] Běžné/Rychlé nabíjení	0.25C/0.5C	0.1C/0.2C	0.5C/1C	1C/5C	1C
Nominální/maximální napětí článku [V]	1,2/1,35	2,0/2,1	3,6/4,1	3,7-3,8/ 4,2-4,4 ³	3,3/3,6
Provozní teplota [°C]	-20-60°C	-20-60°C	-20-65°C	0-50°C	330
Přibližná cena za 1 cyklus [USD/Cy]	0,25	0,6	0,2	0,5	0,2
Přibližná cena za kWh [USD]	350	150	300	400	330
Přibližná cena za 1 cyklus [USD/Cy]	0,25	0,6	0,2	0,5	0,2

1 – Za předpokladu pravidelné údržby ve formě cyklování.

2 – Možnost velkých proudových impulsů.

3 – Vyšší nabíjecí napětí snižuje životnost.



Obr. 3.8 - Porovnání gravimetrické hustoty akumulátorů dle chemie [7]

3.3 Využití akumulátorů s ohledem na jejich vlastnosti

3.3.1 Přenosná elektronika

Mobilní elektronika je charakteristická tím že chceme aby byla malá, lehká a měla co nejdelší výdrž, tak jako ve všech případech je zde samozřejmě požadavek na bezpečnost – přílišná snaha o co nejkompaktnější rozměry přiměla výrobce telefonů Samsung v roce 2016 stáhnout z trhu sérii telefonů Note 7, protože v akumulátoru Li-Pol byl použit velmi tenký materiál separátoru elektrod, akumulátor v telefonech za účelem co nejdelší výdrže také často bývá nabíjen na maximální napětí 4,30 - 4,45V. V kombinaci s malou pevností ochranného materiálu krytu (tloušťka telefonu 7.9 mm) již při mírné deformaci (nošení v kapse u kalhot) docházelo při nabíjení k zahřívání a zkratu v místě silnějšího dotyku elektrod, což v několika případech vedlo k požáru.



Obr. 3.9 - Baterie mobilního telefonu BlackBerry Z30, Li-Pol, 3,8V, 11Wh (zdroj: BlackBerry)

V mobilních zařízeních (telefony, notebooky) dnes jednoznačně převažují Li-Pol akumulátory, dřívější Li-Ion již bývají nahrazeny, neboť Li-Pol baterie je možné vyrábět v tenkém prismatickém provedení. Li-Ion baterie z cylindrických článků 18650 byla donedávna běžná v mobilních počítačích, avšak dnešní rozměry (tloušťka < 20 mm) již nedovoluje tyto baterie použít. Dřívější typy baterií – Ni-MH, Ni-Cd byly nahrazeny právě lithiovými z důvodu malé kapacity v poměru k velikosti a hmotnosti, i když existují výjimky, jako např. modernější typy baterií Ni-MH (více v kap. 3.1.2).

3.3.2 Úložiště energie a záložní zdroje

V tomto segmentu jsou akumulátory používány jako zdroj napájení (v případě nedostatku energie), ale také jako zátěž elektrické sítě (v případě přebytku). To je potřeba všude tam kde by mohlo vlivem výpadku dodávky dojít k ohrožení životů nebo velkým materiálními škodám. Typickým příkladem jsou nemocnice, kde jsou baterie použity jako okamžitý záskokový zdroj („záloha na světlo“) na dobu, než dojde k nastartování diesela agregátů, které slouží jako záložní napájecí zdroj.

Novým odvětvím, kde existuje potenciál využití akumulátorů je ukládání elektrické energie, zejména pak vyrovnávání spotřeby energie (mj. z obnovitelných zdrojů). Zde je požadavek hlavně na cenu a životnost. Mimo přečerpávacích elektráren, podzemní úložiště vodíku a technologii power-to-gas se používají také právě akumulátory.

Největší životností se vyznačují baterie Li-FePO₄, avšak využívá se prakticky všech typů. Jelikož je nutné do sítě dodávat střídavé napětí, jsou tato zařízení vybavena invertorem.



Obr. 3.10 - Síťové uložení Tesla Powerpack, instalované na poloostrově Nova Scotia pro ukládání větrné energie, kapacita každé jednotky je 210 kWh, váha 1,6 tuny (zdroj: Nova Scotia Power)

3.3.3 Doprava – pozemní [5][8]

Díky narůstajícím nárokům na přepravu všech druhů stoupá i spotřeba fosilních paliv a s nimi spojené emise škodlivin. Vzhledem k tomu, že přinejmenším polovina elektrické energie je vyráběna z uhlí, nedá se u elektromobility příliš mluvit o snižování emisí CO₂.

Avšak zavádět bezemisní technologie přepravy, jako elektrické automobily, autobusy a další smysl určitě má, neboť během jejich používání zejména ve městech, kde je intenzita dopravy velmi vysoká při použití elektrického pohonu nevznikají lokální emise prachových

mikročásteč a dalších škodlivin, což v případě spalovacích motorů, velmi často nafotvých, znamená velký rozdíl v kvalitě ovzduší a tím ve vlivu na zdraví velkého počtu lidí.



Obr. 3.11 - Elektromobil Nissan Leaf, vpravo baterie tohoto vozu, 30kWh, 192 Li-Ion (NMC) článků, které dosahují hustoty okolo 170Wh/kg, v reálném provozu tomuto elektromobilu umožňují ujet 200 km (zdroj: AESC - Automotive Energy Supply Corporation)

V tomto případě použití jde mimo bezpečnosti o co největší gravimetrickou hustotu energie a také rychlost nabíjení. Momentálně nejvýkonnější baterie používaná v automobilech je vyrobena automobilkou Tesla Motors, kapacita je 100kWh a hmotnost 480 kg.

Mnohem větší baterie se pak používají v těžké dopravě, jako například v trajektu Norled Ampere, který od roku 2015 v Norsku operuje na 5,6 km dlouhém úseku (viz ilustrace níže). Na palubě jsou Li-Ion baterie o kapacitě 1000 kWh a hmotnosti 10 tun, pohonem jsou dva elektromotory Siemens o výkonu 450kW umožňující dosažení rychlosti 10 uzlů ($18,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), nabíjení probíhá při obou 10 minut dlouhých zastávkách (pro účely vykrývání velkého odběru jsou u obou nabíjecích stanic další baterie 260 kWh). Trasu ujede za 20 minut průměrně 34x denně což je u trajektu se spalovacím motorem ekvivalent přibližně jednoho milionu litrů nafty (potenciální emise 570 tun CO_2 a 15 tun NO_x). Trajekt má kapacitu 120 automobilů a 360 osob, má dvoutrupovou konstrukci (80x21m) typu katamarán, na kterou je použita hliníková slitina místo tradiční oceli kvůli úspoře hmotnosti. Na trajektu jsou též další úpravy pro snížení spotřeby el. energie jako LED osvětlení, rekuperace odpadního tepla a solární panely.



Obr. 3.12 – Vizualizace cyklického provozu elektrického trajektu Ampere [5]

3.3.4 Doprava – letectví a výzkum vesmíru [9]

V letecké dopravě jsou baterie používány jako záložní a startovací zdroj na palubě letadel, v případě autonomních typů letadel často i jako zdroj energie pro elektrický pohon. V případě dopravních i vojenských letadel se používají spolehlivé a bezpečné baterie Ni-Cd a Ni-MH, v současnosti již i typ Li-Ion, který ovšem provázely problémy – jsou citlivější na změny teploty a tlaku a reaktivnější lithium také snáze hoří v případě poškození či poruchy. Nezastupitelnou roli hrají akumulátory také ve výzkumu vesmíru, kde musí vydržet přetížení při startu a práci ve vakuu. Z hmotnostního hlediska zde dominují palivové vodíkové články, které mají nevyšší gravimetrickou hustotu ze všech akumulátorů nad $275 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$.

U autonomních (zejména malých) leteckých prostředků bez pilota na palubě se velmi často používají baterie Li-Pol jako alternativa ke spalovacím motorům, neboť poskytují značné vybíjecí proudy a také dostatečnou hustotu uložené energie v 1 kg, vzletová hmotnost je totiž naprosto kritickým konstrukčním parametrem.



Obr. 3.13 – Vlevo bezpilotní vrtulník Vespadrone Xyris 6 s termokamerou Workswell Wiris vzletová hmotnost 8800g; Vpravo jeho pohonná baterie, Li-Pol, 16Ah, 22,2V, 355Wh, 2063g, $172 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, umožňující let po dobu 18 min (zdroj: archiv Mensuro Flying Machines)

3.3.5 Speciální užití

Akumulátory mají mnoho dalších využití, mezi které patří například medicína. Velmi spolehlivých, bezpečných a zdravotně nezávadných zdrojů energie je potřeba např. u kardiostimulátorů a stimulátorů centrální nervové soustavy, v minulosti proběhly pokusy s Ni-Cd články, avšak jejich bezdrátové dobíjení nebylo příliš efektivní, proto se dodnes využívají primární lithiové články s životností 10 a více let, jedná se tedy o obor který na nový, výkonnější a spolehlivější typ akumulátoru stále čeká.

4 Laboratorní měření parametrů

4.1 Podmínky a způsob měření

4.1.1 Postup měření za normálních podmínek

Nejprve musí proběhnout příprava vzorku – je potřeba zapsat všechny údaje, vybrat dle specifikací výrobce parametry, které bude možné porovnat s výsledky připravovaného testu a podle nich zvolit hodnoty pro zkoušku, dále změřit napětí naprázdno, aby bylo zjištěno, zda je baterie v pořádku, případně u akumulátorů také zda jsou nabitě na 100% úroveň.

Poté je vzorek připojen k přístrojům dle schématu (viz. Obr. 4.3), na multimetru musí být zvoleno měření napětí, nastaven výstup do rozhraní RS232 a po kontrole spojení v software na PC je spuštěn záznam napětí v pravidelných časových intervalech. Na zátěži zvolíme režim testování kapacity baterie, tak, že nejprve byl zadáme zatěžovací proud I_z , byly zvoleny tyto parametry:

- Li-SOCl₂ „AA“: 40mA; „D“ 200mA; odpovídá maximům konstantních I_z ze specifikací
- Li-Ion „18650“: 350mA a 3350mA; dle specifikací odpovídá malému a nominálnímu I_z
- Li-Pol „1,8Ah 3S1P“: 1,8A a 9A; odpovídá běžným scénářům použití, výrobce nedeklaruje vybíjecí křivky ani vlastnosti za změněných podmínek

Poté bylo zvoleno prahové napětí vybitého článku dle specifikací pro účely ukončení testu:

- Li-SOCl₂ 2,0V; Li-Ion 2,5V ; Li-Pol 3V

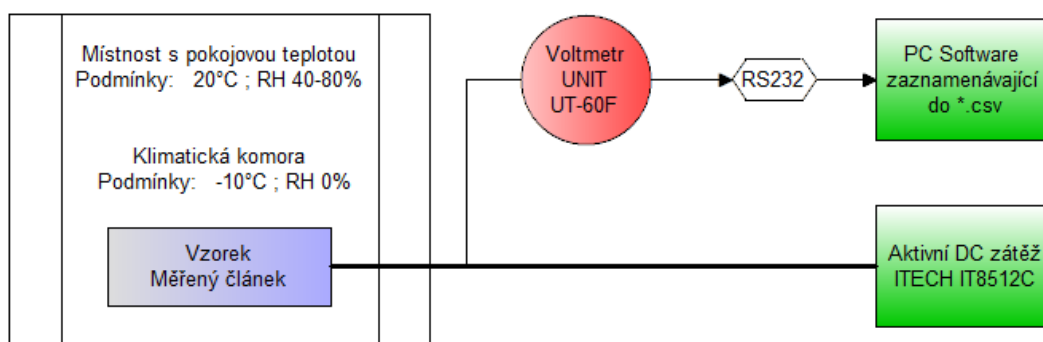
Po kontrole okolní teploty je na patřičně aklimatizovaném článku spuštěn test. Přístroje musí být pravidelně monitorovány. Ve chvíli, kdy dojde k automatickému odpojení zátěže po dosažení nastaveného prahového napětí je záznam ukončen a vybitý vzorek odpojen. Zapišeme zjištěné údaje, zejména naměřenou vybíjecí kapacitu Q_v . Stejně postupujeme u všech vzorků.

4.1.2 Postup měření za změněných podmínek

Změněných podmínek je dosaženo pomocí klimatické komory, ta musí být nastavena na zvolené parametry: teplota -10°C a vlhkost RH 0%, tak aby případná zkondenzovaná voda nebo námraza neovlivňovala měření. Před samotným začátkem zkoušky je nutné vzorek vždy nějakou dobu (dle hmotnosti a velikosti) aklimatizovat, aby měl správnou výchozí teplotu, tj. stabilní teplotu okolí. Dále je použit stejný postup jako za normálních podmínek, tak jak je popsáno v kap. 4.1.1.

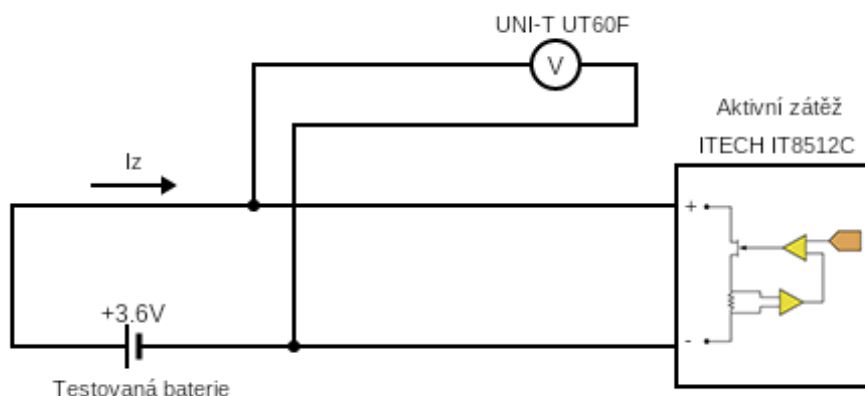
4.1.3 Diagram zkoušky a schéma zapojení

Zkušební vzorek byl umístěn v místnosti v pokojové teplotě, ve druhé fázi testování pak v klimatické komoře. Průřez vodičů ke vzorku a připojovací konektor byl volen tak, aby svými parametry vysoce převyšoval požadavky na proudové zatížení při zkoušce a nedocházelo tak ke zkreslení vlivem přílišného úbytku napětí na vodičích, zároveň byl ze stejného důvodu zhotoven v nejkratší možné délce. Vodiče byly připojeny ke klíčovému přístroji testu, aktivní stejnosměrné zátěži, která umožňuje nastavení automatizovaného měření kapacity článků s typem vybíjení CC (konstantním proudem).



Obr. 4.2 – Diagram znázorňující použité přístroje a princip provedení testů

V nejbližším možném místě (za průchodkou z klimatické komory) byla umístěna odbočka pro voltmetr, tak aby úbytek napětí na zatíženém vodiči byl pro účely měření minimalizován. Voltmetr umožňuje posílat výstup přes optický komunikační port do sériového portu s protokolem RS232, ten byl přes převodník USB připojen k přenosnému počítači se softwarem pro záznam dat.

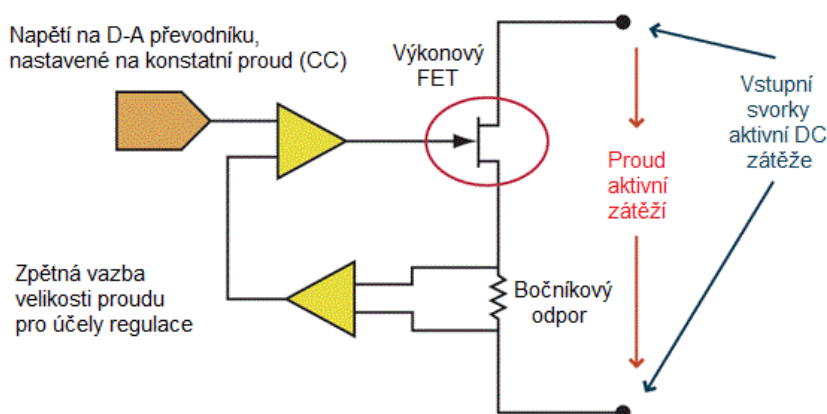


Obr. 4.3 – Schéma zapojení vzorku a přístrojů

4.1.4 Použité přístroje

- **Aktivní stejnosměrná zátěž**

K provedení měření byla použita aktivní stejnosměrná zátěž ITECH IT8512C. Tato zátěž umožňuje automatické měření kapacity baterie s parametry 0 – 120 V / 1 mA – 60 A / max. 300 W. Měření probíhá tak, že je nejdříve potřebné nastavit vybíjecí proud pro test. Poté je spuštěn režim testování kapacity baterie a uživatel je vyzván k zadání prahového napětí pro ukončení testu. Po zadání hodnot a potvrzení je test spuštěn a v okamžik dosažení prahové hodnoty je test ukončen, zátěž odpojena a dále již testování nepokračuje (i když může dojít k nárůstu napětí testovaného článku nebo baterie nad prahovou hodnotu vlivem odpojení zátěže). Základní princip funkce zátěže je znázorněn níže.



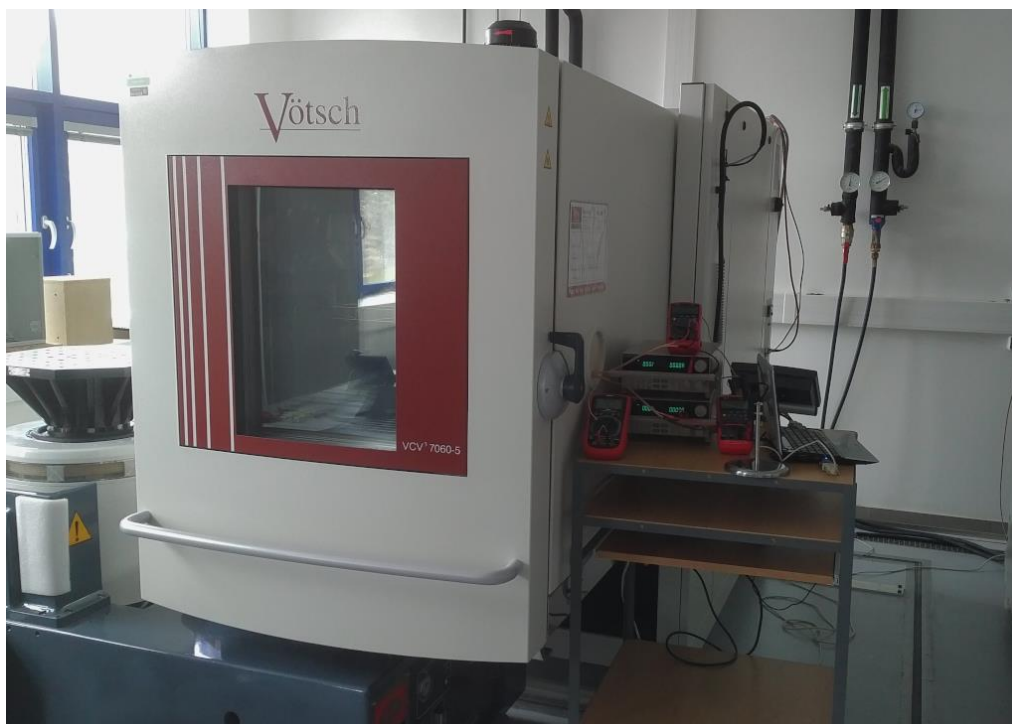
Obr. 4.4 – Princip funkce aktivní zátěže – výkonový tranzistor je řízen spínáním, aby tekla nastavený konstantní proud zatěžovacím odporem

- **Multimetr**

K záznamu průběhu napětí byl použit přístroj UNI-T UT60F s optickým komunikačním rozhraním, připojeným přes převodník RS232 - USB k počítači. V počítači byl spuštěn příslušný software, který umožňoval pravidelný záznam hodnoty na multimetru pravidelně 1x za sekundu. Ovládání záznamu bylo manuální, data bylo nutné cenzurovat.

- **Klimatická komora**

Pro měření ve změněných podmínkách byla využita klimatická komora Votsch VCV 7060-5, umožňující držet nastavenou teplotu v úzkém rozmezí (odchylka $\pm 0,1 - 0,5^\circ\text{C}$) a kompenzovat vznik případného odpadního tepla až do 5 kW. Parametry testu byly voleny tak aby teplota byla -10°C , což je teplota odpovídající přibližně odpovídající chladným dnům v zimě na území ČR. Vlhkost byla během testu za nízké teploty téměř eliminována ($\text{RH} = 0\%$) tak, aby zkondenzovaná voda nebo námraza na vzorku neovlivňovala měření.



Obr. 4.5 – Klimatická komora Vötsch VCV 7060-5. a testovací set – 2x zátěž, 2x voltmetr a PC pro záznam hodnot

- ***Nejistota měření***

Aktivní zátěž má rozlišení zobrazení změřené kapacity na 10 mAh. Dle přesnosti měření proudu zátěže $\pm(0,1 \% + 0,2 \% \text{ FS})$ pro 0-6 A a po zaokrouhlení zobrazované hodnoty, je nejvyšší chyba měření $\Delta Q_v = \pm 26 \text{ Ah}$. Pouze pro baterie Li-Pol, zatěžované v měření vyšším proudem $I_z = 9 \text{ A}$ je tato odchylka $\Delta Q_v = \pm 67 \text{ mAh}$.

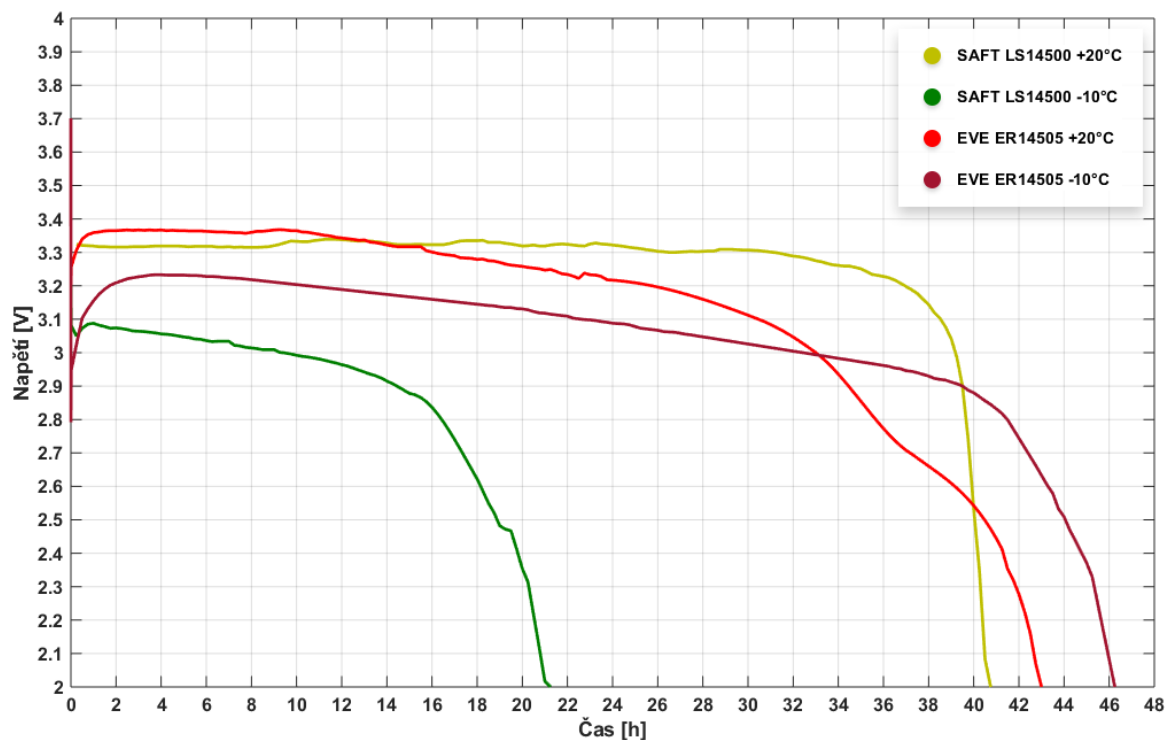
Multimetr zobrazuje hodnotu na 2-3 desetinná místa (rozlišení 1 – 10 mV) a deklarovaná odchylka je 0.5% čtené hodnoty+ 3 digity – platí pro zaznamenané průběhy napětí.

4.2 Výsledky měření

4.2.1 Vybíjecí charakteristiky – baterie AA 3,6V

Průběhy napětí na článcích Li-SOCl₂ „AA“

Teploty 20°C a -10°C ; I_z = 40 mA



Vzorek 1 - SAFT

(2ks)

Výrobce, Typ: **SAFT LS14500**

Velikost: „AA“

(d = 14,55 mm; v = 50,3 mm)

Hmotnost: **16,7 g**

Nominální napětí: **3,6 V**

Nominální kapacita:

2600 mAh

(I_z = 2 mA, 20°C, U_{min} = 2 V)

Deklarovaná kapacita za normálních podmínek:

1450 mAh @ 40 mA; +20°C

Deklarovaná kapacita za změněných podmínek:

1100 mAh @ 40 mA; -20°C



Vzorek 2 - EVE

(2ks)

Výrobce, Typ: **EVE ER14505**

Velikost: „AA“

(d = 14,5 mm; v = 50,5 mm)

Hmotnost: **19 g**

Nominální napětí: **3,6 V**

Nominální kapacita:

2700 mAh

(I_z = 1 mA, 25°C, U_{min} = 2 V)

Deklarovaná kapacita za normálních podmínek:

1350 mAh @ 40 mA; +25°C

Deklarovaná kapacita za změněných podmínek:

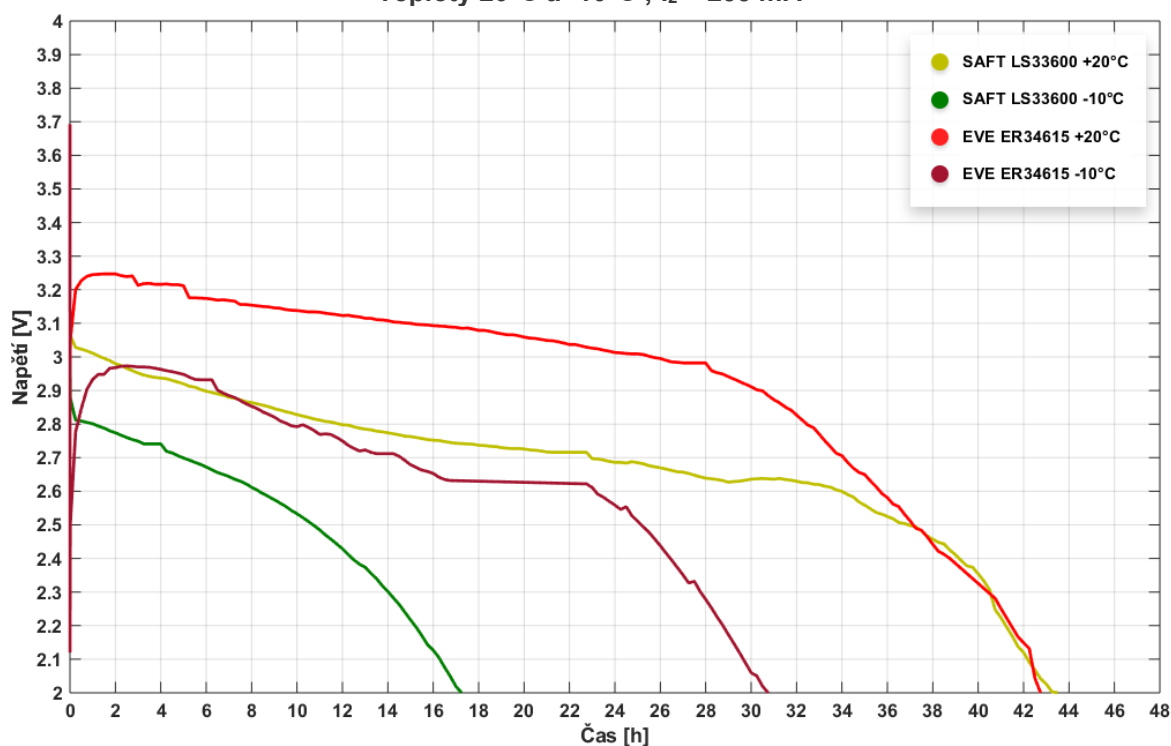
1000 mAh @ 40 mA; -20°C



4.2.2 Vybíjecí charakteristiky – baterie D 3,6V

Průběhy napětí na člancích Li-SOCl₂ „D“

Teploty 20°C a -10°C ; I_z = 200 mA



Vzorek 1 - SAFT

(2ks)

Výrobce, Typ: **SAFT LS33600**

Velikost: „D“

(d = 33,4 mm; v = 61,6 mm)

Hmotnost: **90 g**

Nominální napětí: **3,6 V**

Nominální kapacita:

17 Ah

(I_z = 5 mA; 20°C; U_{min} = 2 V)

Deklarovaná kapacita za normálních podmínek:

9,5 Ah @ 200 mA; +20°C

Deklarovaná kapacita za změněných podmínek:

3 Ah @ 200 mA; -20°C



Vzorek 2 - EVE

(2ks)

Výrobce, Typ: **EVE ER34615**

Velikost: „D“

(d = 33,1 mm; v = 61,5 mm)

Hmotnost: **100 g**

Nominální napětí: **3,6 V**

Nominální kapacita:

19 Ah

(I_z = 2 mA; 25°C; U_{min} = 2 V)

Deklarovaná kapacita za normálních podmínek:

10,5 Ah @ 200 mA; +25°C

Deklarovaná kapacita za změněných podmínek:

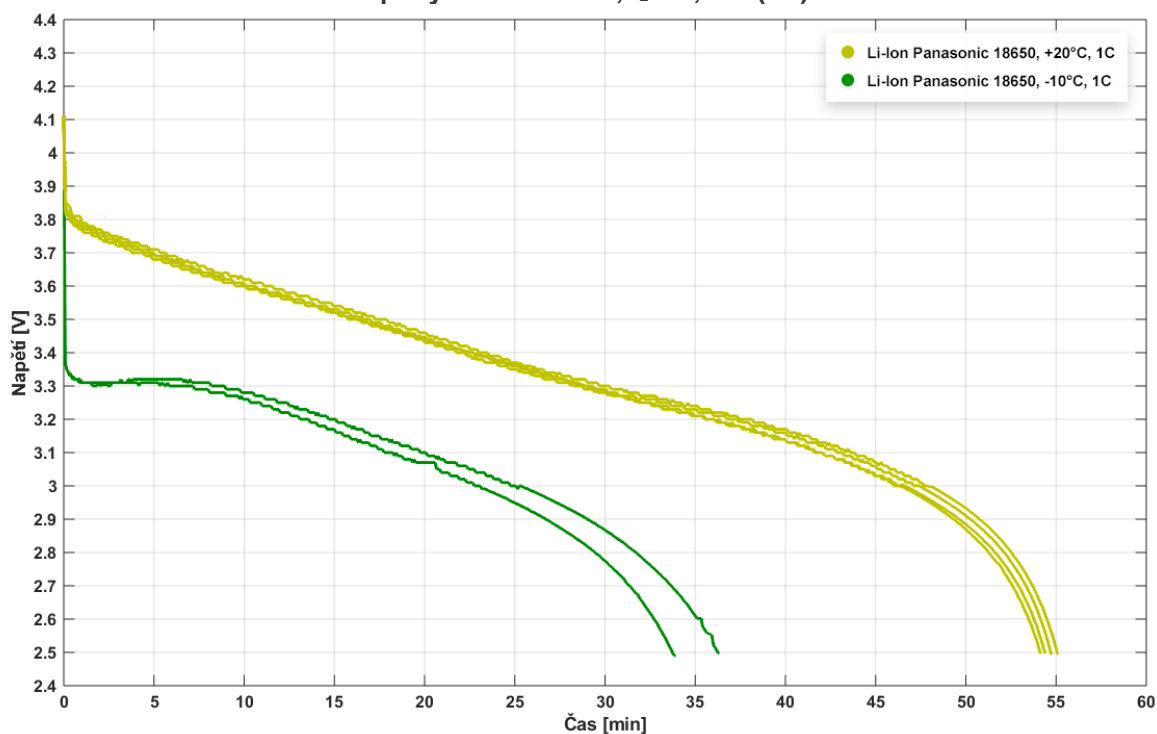
3,5 Ah @ 200 mA; -20°C



4.2.3 Vybíjecí charakteristiky – akumulátory Li-Ion 18650 3,6V

Průběhy napětí na akumulátoru Li-Ion 3,6V 3,35Ah

Teploty 20°C a -10°C ; $I_z = 3,35A$ (1C)



Li-Ion Panasonic

(2 identické vzorky pro referenci)

Výrobce, Typ: **Panasonic NCR18650B**

Velikost: „18650“
($d = 18,2$ mm; $v = 64,93$ mm)

Hmotnost: **47,5 g**

Nominální napětí: **3,6 V**

Nominální kapacita: **3350 mAh (min. 3250 mAh)**
($I_z = 3,25$ A; 40°C ; $U_{\min} = 2,5$ V)

Deklarovaná kapacita za normálních podmínek:
3350 mAh @ 3350 mA; $+25^\circ\text{C}$

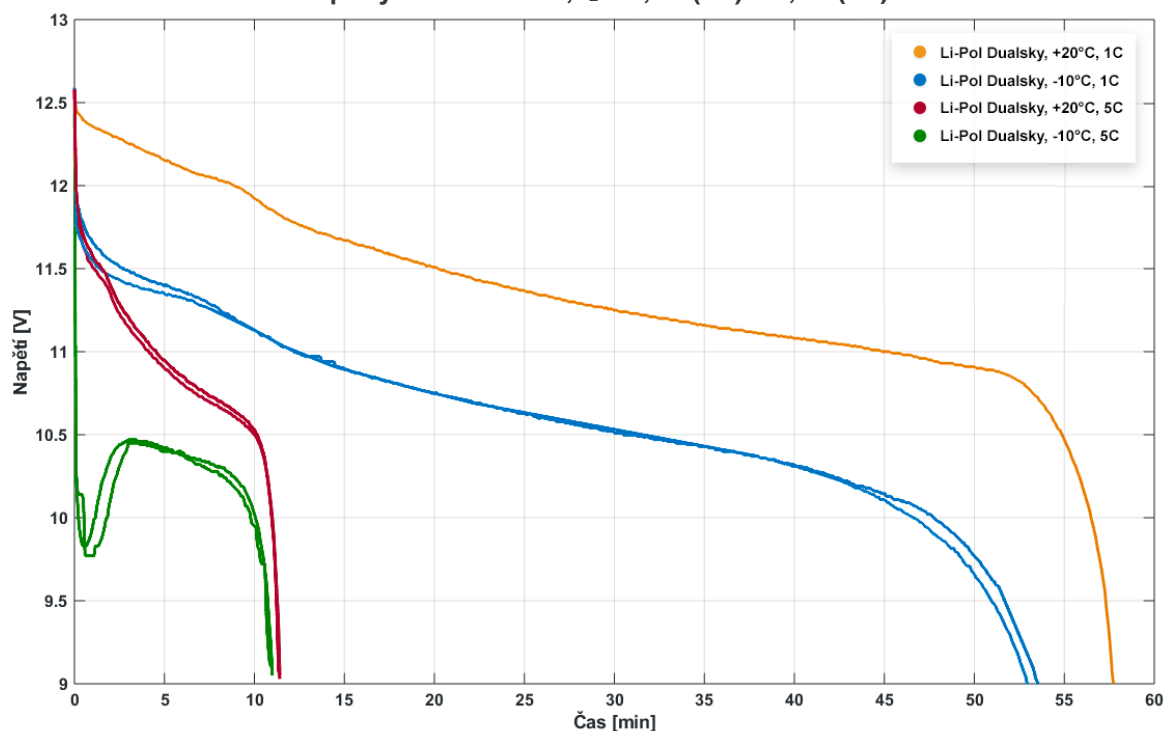
Deklarovaná kapacita za změněných podmínek:
2850 mAh @ 3350 mA; -10°C



4.2.4 Vybíjecí charakteristiky – akumulátory Li-Pol 11,1V

Průběhy napětí na akumulátoru Li-Pol 11,1V 1,8Ah

Teploty 20°C a -10°C ; $I_z = 1,8A$ (1C) a $9,0A$ (5C)



Li-Pol Dualsky ECO-S

(2 identické vzorky pro referenci)

Výrobce, Typ: Dualsky X18003ECO

Velikost: **prismatická 3-člávková baterie**
(v = 92 mm; š = 35 mm; h = 24 mm)

Hmotnost: **145 g**

Nominální napětí: **3,7 V / článek 11,1 V / baterie**

Nominální kapacita: **1800 mAh**
(20Wh, $I_{zmax} = 45A$)

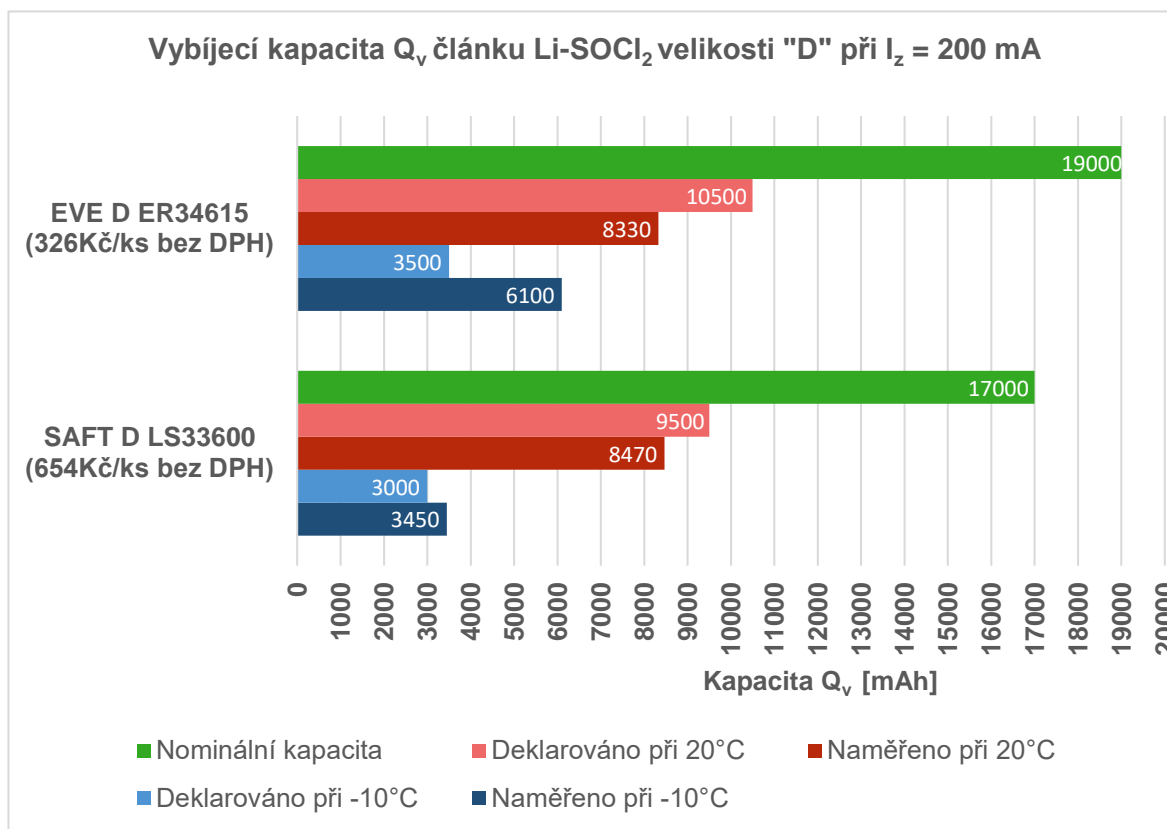
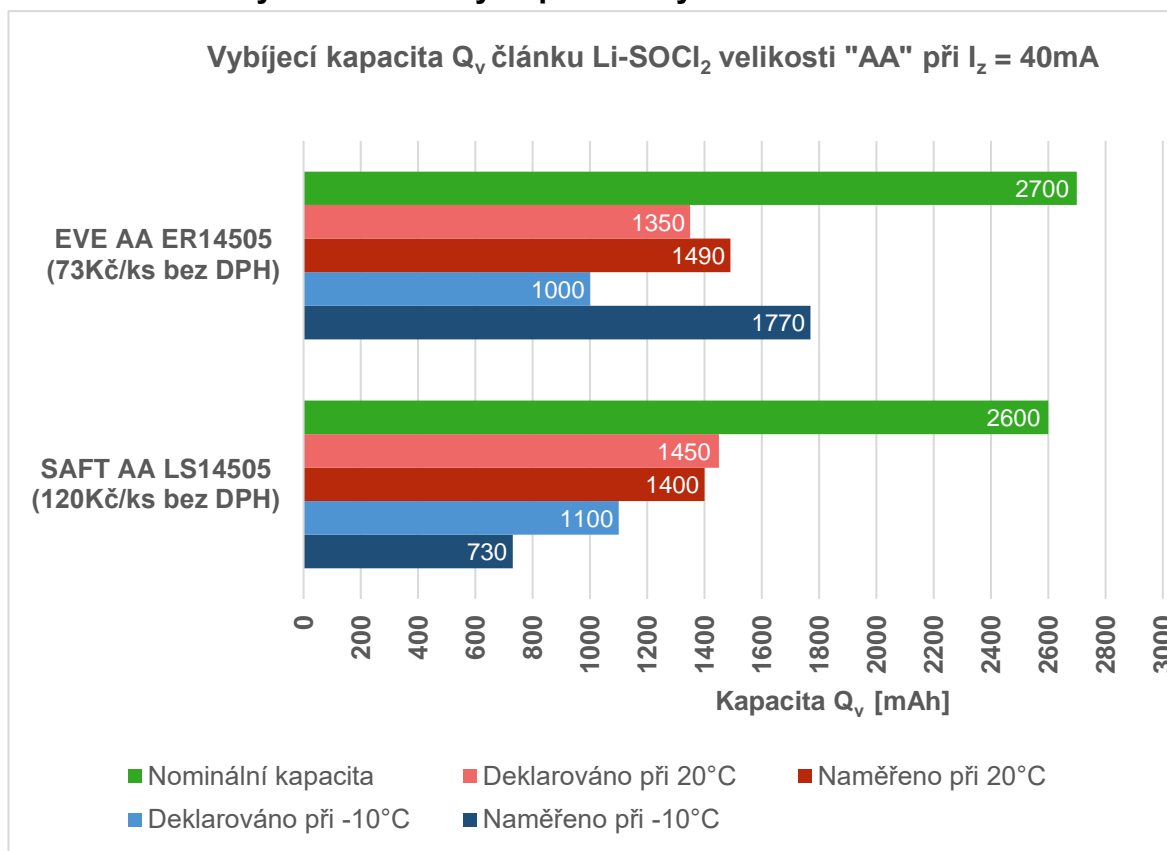
Deklarovaná kapacita za normálních podmínek:
1800 mAh

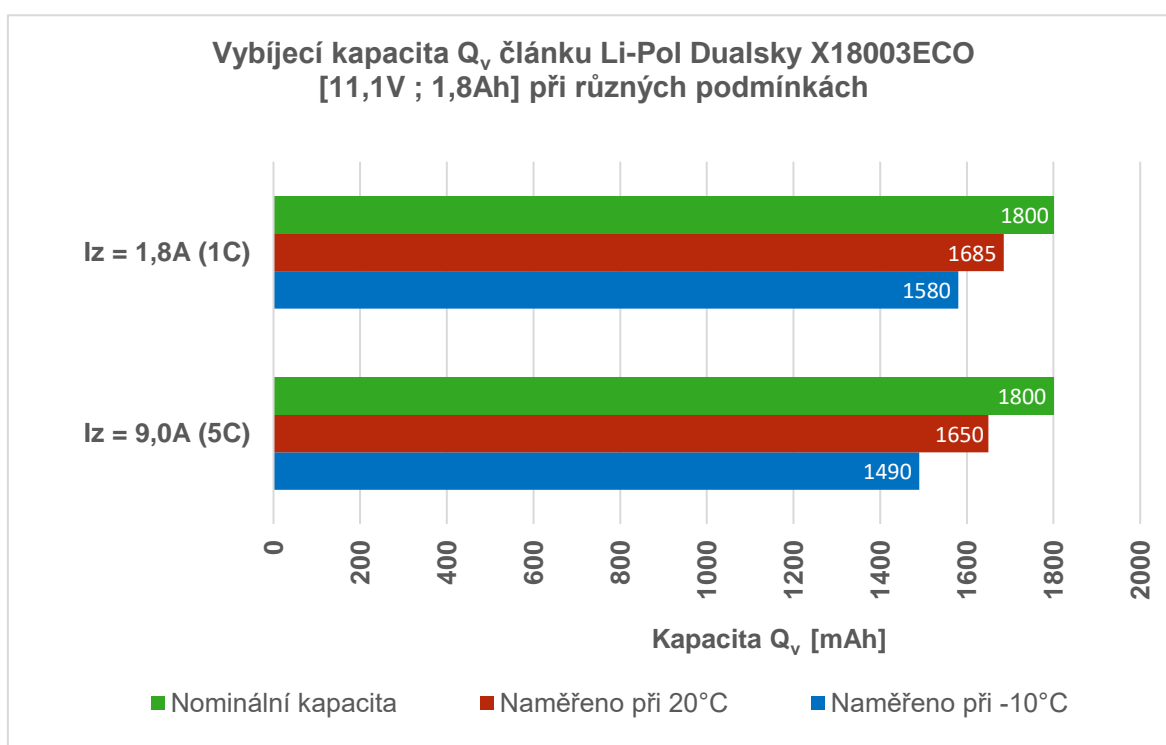
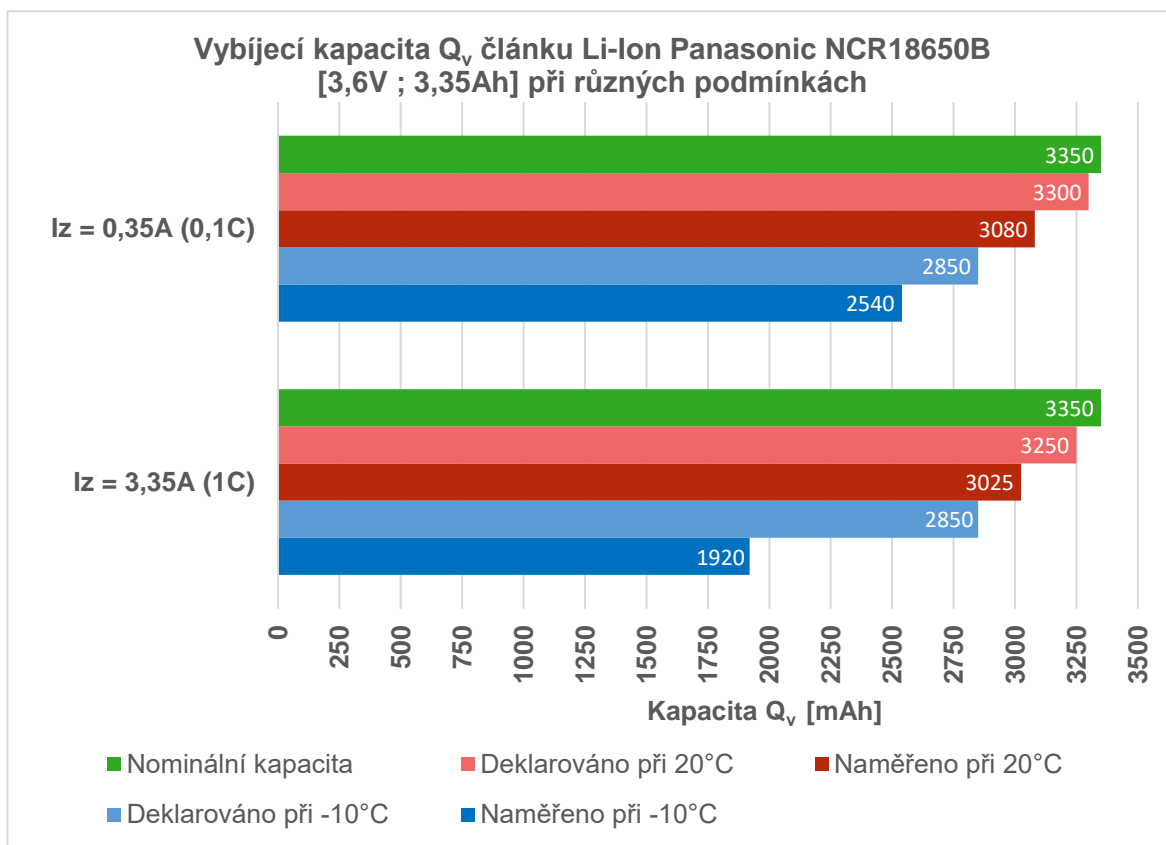
Deklarovaná kapacita za změněných podmínek:
není deklarováno výrobcem



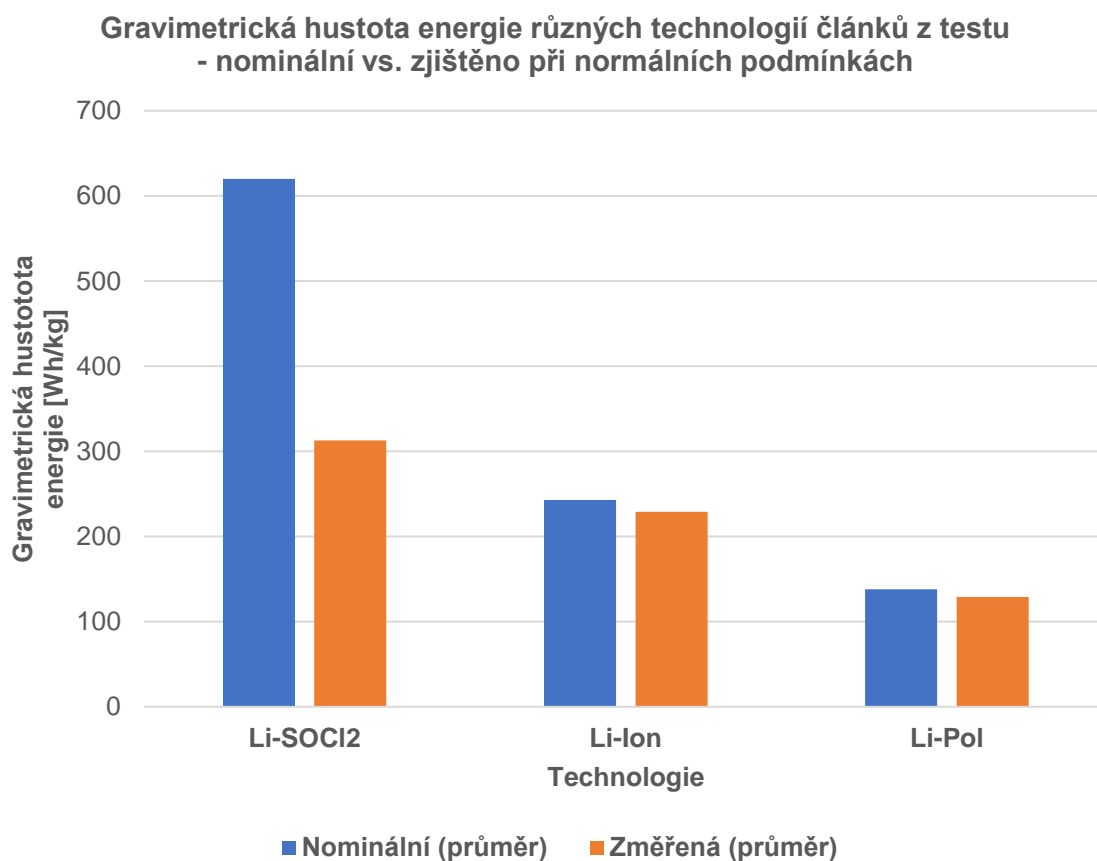
4.3 Vizualizace zjištěných parametrů

4.3.1 Shoda s výrobcem udanými parametry





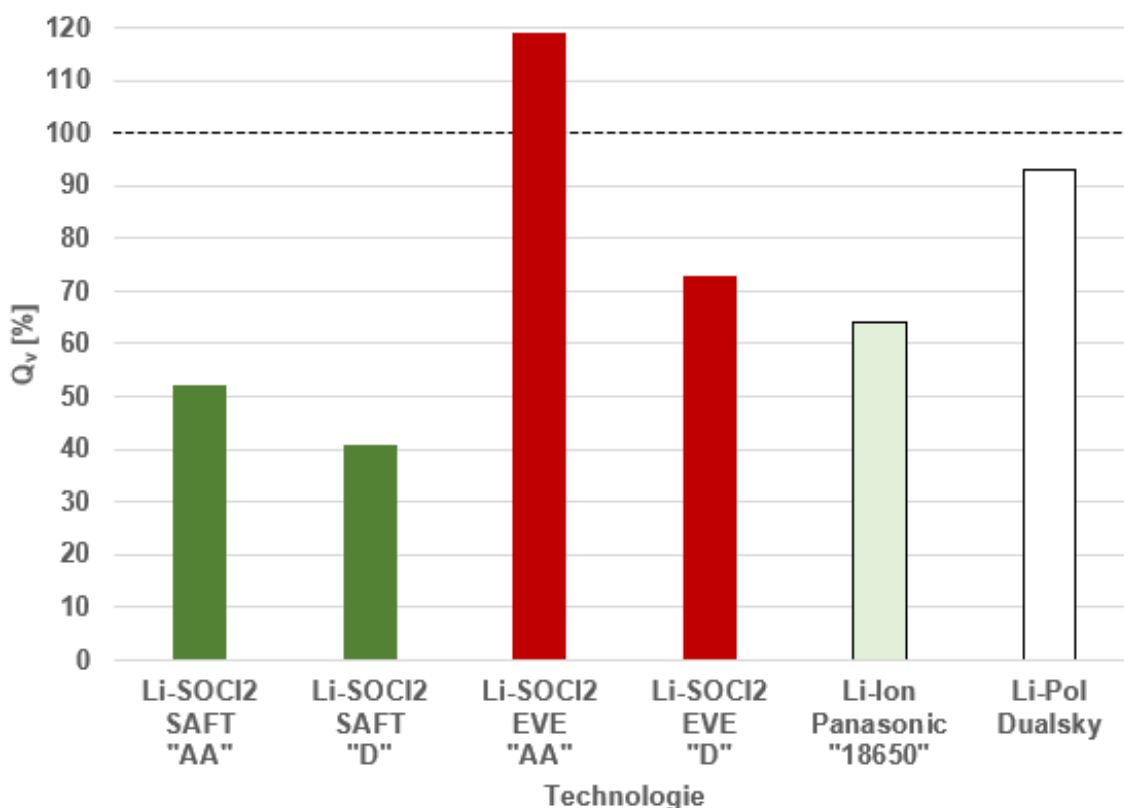
4.3.2 Gravimetrická hustota energie – porovnání



Graf porovnává vospělost technologie ve smyslu uložených jednotek energie na jednotku hmotnosti, u primárních a sekundárních článků je vidět zřetelný rozdíl, avšak technologie Li-Ion je na tom parametrově velice dobře a rozdíl se rychle smaže při zahrnutí možnosti článků dobíjet a používat opakovaně, více je vidět v následujícím grafu – cena za kWh. U technologie Li-SOCl₂ se jednalo o krajní dovolenou hodnotu zatížení, výsledek je tím tedy zkreslen, pokud by články byly zatíženy způsobem, odpovídajícím jejich běžnému užití (velmi malý odběr s občasnými pulzy – odpovídá například zařízením IoT), hodnota by byla zřejmě o něco vyšší, blíže nominální (dle specifikací od výrobce).

4.3.3 Výkon za změněných podmínek – porovnání

Vybíjecí kapacita Q_v za změněných podmínek
vyjádřená v % kapacity Q_v změřené za normálních podmínek

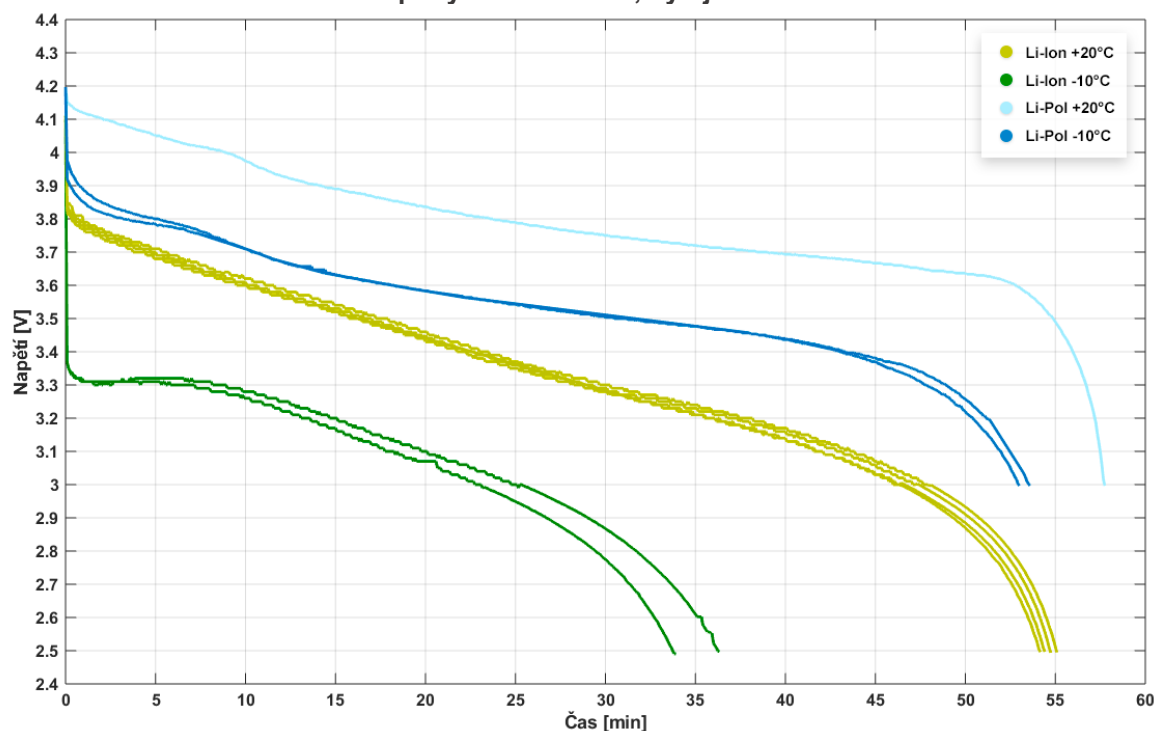


Graf zobrazuje vliv nízké teploty při vybíjení (-10°C) na změřenou vybíjecí kapacitu baterií a akumulátorů. S výjimkou vzorku EVE "AA" je tato kapacita vždy nižší, u zmíněného vzorku mohlo dojít k chybě měření, jelikož ani charakteristiky deklarované výrobcem nenaznačují že by mělo docházet k nárůstu vybíjecí kapacity s klesající teplotou, specifikace výrobce ukazují pravý opak, výsledek však z principu není nereálný, zároveň u tohoto výrobce při testech několikrát došlo k tomu, že kapacita naměřená za nízké teploty byla o něco vyšší než bylo výrobcem EVE deklarováno. Pro ověření této informace by bylo nutné použít větší množství vzorků. Nejlepšího výsledku dosáhly vzorky baterií Li-Pol Dualsky, které při zátěži 1C neztratily více než 10 procent kapacity, paradoxně jejich výrobce vůbec neuvádí chování za snížených teplot, naopak baterie od francouzského výrobce SAFT v testech spíše propadly i přesto, že víceméně odpovídaly deklarovaným hodnotám. Důvodem je hlavně jejich vysoká cena a přítomnost minimálně srovnatelné konkurence za přibližně poloviční cenu. Otázkou však může být například rozdílný přístup těchto dvou výrobců k životnímu prostředí a zaměstnancům jelikož nižší cena zřejmě musí být částečně něčím vykoupena.

4.3.4 Technologie Li-Ion vs. Li-Pol – porovnání při zátěži 1C

Průběhy napětí na článcích Li-Ion a Li-Pol

Teploty 20°C a -10°C ; vybíjení 1C

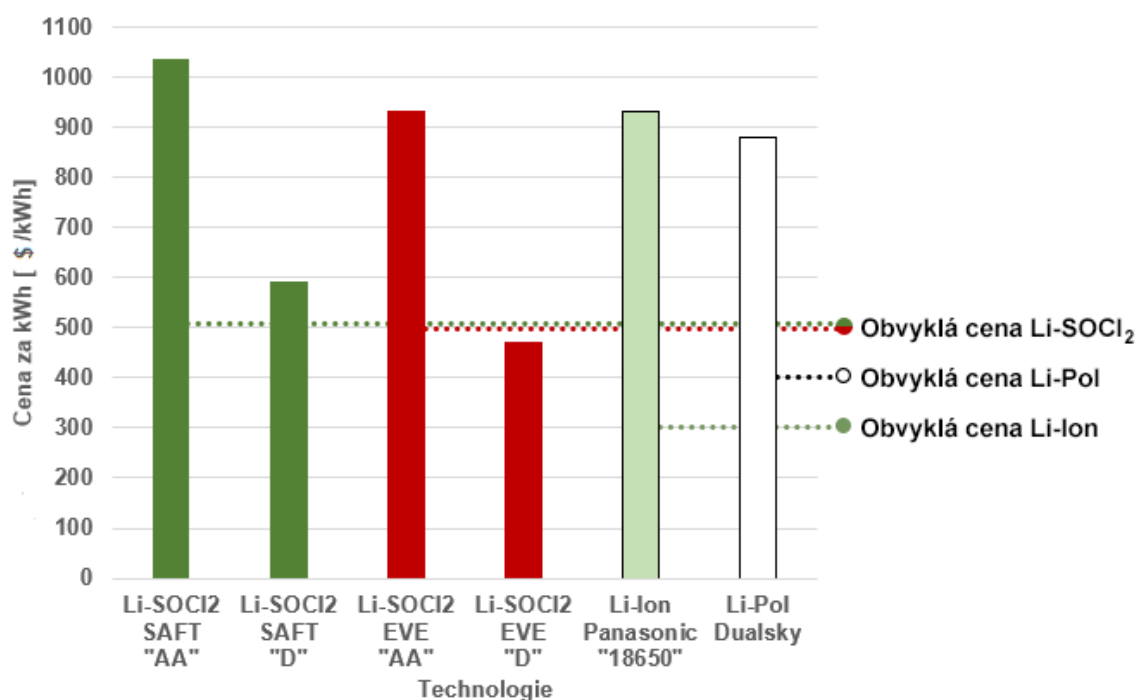


Graf ukazuje chování článků Li-Ion a Li-Pol při vybíjení zátěží 1C – v ideálním případě by tedy křivky měly končit na 60-ti minutách, kdy by články poskytly plnou nominální vybíjecí kapacitu. V grafu je patrný rozdíl v nominálním napětí obou technologií (3,6V vs. 3,7 V), ukončovací napětí je u technologie Li-Pol také o 0,5 V vyšší. Ačkoli složením jsou články velmi podobné, vybíjecí charakteristika technologie Li-Pol je méně strmá, přičemž na konci má typický prudký pokles. U obou technologií platí, že nižší teplota znesnadňuje chemické reakce, roste tím vnitřní odpor článků, a proto je jejich napětí pod zátěží nižší.

Při testu byl také zjištěn podstatně významnější vliv teploty na průběh vybíjení u článků typu Li-Ion, je však nutné brát v úvahu, že 1C je u obvyklých článků Li-Ion 50% dovolené zátěže, zatímco u baterie Li-Pol se jednalo jen o 4%. Proto je technologie Li-Ion nasazována u menších a středních zátěžích, zatímco technologie Li-Pol, která má vyšší zatížitelnost se využívá tam, kde je potřebný vyšší poměr zatížitelnosti ke kapacitě (také vzhledem k hmotnosti a objemu), proto jsou například využívány bezpilotními systémy do hmotnosti cca 10 kg. Nad tuto hmotnost je již možné využít větší množství paralelně spojených článků Li-Ion, které již poskytnou dostatečný vybíjecí proud a zároveň nabídnou svoji hlavní přednost – vyšší gravimetrickou hustotu energie.

4.3.5 Cena za kWh – porovnání

Porovnání ceny za kWh u testovaných vzorků
Za normálních podmínek



Vizualizace ceny za 1 kWh zcela jasně ukazuje, že cena nabíjecích článků je víceméně porovnatelná s cenou primárních článků, proto je v současnosti na místě při výběru zdroje energie zvažovat jiné faktory – jako např. trvanlivost, hmotnost, zatížitelnost a objem a tvar. Dalším faktorem může být také schopnost práce za náročných podmínek, skladovatelnost a úroveň samovybíjení. U obvyklých cen je vidět rozdíl v nákladech na malé články „AA“, kdy je výroba malých individuálních článků samozřejmě náročnější.

U baterií Li-Ion a Li-Pol pak hraje roli nákup u distributora v ČR s vyšší marží a také fakt, že se jedná o velmi kvalitní typy akumulátoru, které jsou situovány ve spektru různých výrobců a kvality provedení poměrně vysoko.

Závěr

Dnešní společnost se již neobejde bez elektrické energie, využíváme ji z mnoha zdrojů a téměř každý z nás nosí nějaký její zdroj neustále u sobě ve formě elektrochemického akumulátoru. Baterie jsou dnes omezujícím faktorem mnoha zařízení, kde tvoří jejich největší a nejtěžší částí. Proto bude vždy existovat potřeba a tlak na vývoj efektivnějších zdrojů přenosné energie. Dohromady tyto vlivy tvoří stabilně rostoucí trh s astronomickým obratem. Jako slibné cesty vývoje se jeví palivové vodíkové články, ale i další typy lithiových baterií jako například akumulátor Li-S využívající lithium a síru s teoretickou energetickou hustotou přes $1000 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Je nutné do budoucna volit co nejšetrnější zdroje energie k životnímu prostředí, lidskému zdraví a také počítat s tím, že zdroje mnoha materiálů používaných v akumulátorech jsou značně omezené.

Postup měření a provádění experimentu je popsán v kapitole 4.1. Chování akumulátorů bylo víceméně očekávané, avšak testy proběhly o něco rychleji, než bylo plánováno, neboť výrobci obvykle deklarovali větší vybíjecí kapacitu, než kterou bylo možné použitou metodou zjistit. Odchylka od deklarované hodnoty u baterií byla přibližně -6%. Odchylka od deklarované hodnoty u akumulátorů byla -4,6 až -8,3%, medián -7,3%.

Výsledkem experimentu je informace o tom, že při nízkých provozních teplotách je nutné počítat s poměrně velkou rezervou, jelikož chemické reakce zejména v bateriích Li-SOCl₂, kde figurují difúzní procesy, probíhají ztlačně obtížněji, čímž využitelná vybíjecí kapacita padá na přibližně polovinu hodnoty za normálních podmínek (medián -48%). Oproti tomu akumulátory na bázi Li jsou na tom o poznání lépe, za stejných podmínek u akumulátoru Li-Pol činní úbytek kapacity 12-17% , u technologie Li-Ion se pak jedná o snížení o 20-35% kapacity. Platí, že při vyšší zátěži je ztráta výraznější.

Přesnost testů mohla ovlivnit doba předchozího skladování článků, nepřesnost měřících přístrojů, odpor přívodních a měřících vodičů a také zejména malý počet vzorků. K provedení testů na zcela profesionální úrovni by bylo vhodné mít násobně více vzorků a testy s akumulátory také mnohokrát zopakovat, což je ovšem časově náročné, ale hlavně se jedná o velký objem finančních prostředků, které byly v tomto případě čerpány z rozpočtu katedry. Zajímavým kritériem k hodnocení by také bylo odebírat konstantní výkon namísto konstantního proudu, jelikož většina zařízení má stálé výkonové požadavky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HAMMERBAUER, Jiří. Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. 2. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. 181 s. ISBN 80-7082-411-5.
- [2] 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.
- [3] Porovnání typů akumulátorů, soubor vědeckých článků o bateriích. *Batteryuniversity.com* [online]. 2017/03 [cit. 8.6.2018] Dostupné z: <http://batteryuniversity.com/>
- [4] Lithium-železo-fosfátový akumulátor. *Wikipedia.org* [online]. [cit. 8.6.2018] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-%C5%BEelezo-fosf%C3%A1tov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [5] Ampere Electric Powered Ferry. *Ship-technology.com* [online]. [cit. 8.6.2018] Dostupné z: <https://www.ship-technology.com/projects/norled-zero-cat-electric-powered-ferry/>
- [6] Kadmium. *Wikipedia.org* [online]. [cit. 8.6.2018] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kadmium>
- [7] Codecà, Fabio, Spagnol, Pierfrancesco a Sergio M. Savaresià. Lithium-ion batteries for electric vehicles: characterization, modeling, state-of-charge estimation and disequalization phenomena. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2010. 184 s. ISBN 978-3-639-29463-7.
- [8] Automobil Tesla-S. *Wikipedia.org* [online]. [cit. 8.6.2018] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S
- [9] Baterie používané v kosmu. *Wikipedia.org* [online]. [cit. 8.6.2018] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Batteries_in_space
- [10] Understanding the Material Science of Battery We Use Every Day. Trade Science Inc. *tsijournals.com* [online]. [cit. 8.6.2018] Dostupné z: <http://www.tsijournals.com/articles/understanding-the-material-science-of-battery-we-use-everyday.html>
- [11] HUGGINS, Robert A. *Energy storage*. New York: Springer, ©2010. xxviii, 406 s. ISBN 978-1-4419-1023-3.
- [12] Nezávislý test tužkových baterií. *Nejlepsi-Baterie.cz* [online]. [cit. 18.5.2019] Dostupné z: <http://www.nejlepsi-baterie.cz>

Přílohy

V deskách je přiloženo CD obsahující:

- **Specifikace vzorků od výrobců**
- **Manuály a specifikace měřících přístrojů**
- **Tabulka naměřených hodnot a nasbíraná data**
- **Bakalářská práce ve formátu PDF**