

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroniky

Moderní trendy v oblasti akumulátorů pro trakční aplikace

Modern trends in the Field of Traction Batteries

2012/2013

Petr Kaňovský

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Kaňovský**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika
Téma: **Moderní trendy v oblasti akumulátorů pro trakční aplikace**
Modern Trends in the Field of Traction Batteries

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte přehled a popis vlastností akumulátorů pro trakční aplikace.
2. Vyberte nejvhodnější akumulátory pro stacionární akumulární stanici, elektromobil a akumulátorovou lokomotivu.
3. Navrhněte akumulátorovou baterii pro zvolenou aplikaci.

Seznam doporučené odborné literatury:

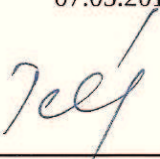
Cenek, M.: Akumulátory od principů praxi, FCC Public, Praha 2003.
Sandeep, D.: Electric Vehicle Battery Systems, Woburn 2001.
Vaculík, P.: Zdrojové struktury pohonných jednotek hybridních vozidel, Disertační práce, Ostrava 2011.
Kiehne, H. A.: Battery Technology Handbook, Rennigen-Malsheim 2003.
Provoz a údržba startovacích, staničních a trakčních akumulátorových baterií v dopravě a spojích: Sborník přednášek ze semináře, Dům techniky ČSVTS, Hradec Králové 1982.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Vaculík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Částkově 7.5.2013



Petr Kaňovský

Tato bakalářská práce byla vypracována s podporou projektu Nová kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancování Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Děkuji především panu Ing. Petrovi Vaculíkovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace při přípravě mé bakalářské práce.

Poděkování patří rovněž mojí rodině a přítelkyni Monice Svízelové za jejich podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na popis vlastností a aplikačních možností akumulátorů. V úvodu práce je vytvořen ucelený přehled nejrozšířenějších akumulátorů, přičemž největší pozornosti je věnováno lithiovým akumulátorům. Na základě celkového zhodnocení vlastností akumulátorů je možné vybrat nejvhodnější typ pro dané aplikace. V této práci jsou pro tři konkrétní aplikace vybrány nejvhodnější akumulátory z hlediska vlastností a v samotném závěru práce jsou pro tyto tři aplikace vypočítány potřebné parametry akumulátoru.

Abstract

The bachelor's thesis is focused on the description of the properties and application possibilities of batteries. In the introduction is created a comprehensive overview of the most widely used batteries, where the greatest attention is paid to the lithium batteries. On the basis of an overall assessment of the performance of the battery it is possible to choose the best type for your application. In this work are selected the most appropriate batteries for three specific applications in terms of features and in the final paper there are calculated required parameters of battery for these three applications.

Klíčová slova

akumulátor, elektromobil, akumulátorová lokomotiva, akumulátorová stacionární stanice, lithium, LiFePO_4

Keywords

Battery, electric vehicle, battery locomotive, stationary battery station, lithium, LiFePO_4

Obsah

Úvod.....	11
Stručná historie akumulátoru	12
Podstatné parametry u vlastností akumulátoru	14
1.PŘEHLED AKUMULÁTORŮ URČENÝCH PRO TRAKČNÍ APLIKACE	16
1.1 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY.....	16
1.1.1 Údržbové olověné akumulátory.....	17
1.1.1.2 Trakční Pb akumulátor se zaplavenými elektrodami	17
1.1.2 Bezúdržbové olověné akumulátory	18
1.1.2.1Trakční akumulátor - VRLA.....	18
1.2 NIKLOVÉ AKUMULÁTORY	21
1.2.1 Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd).....	21
1.2.2 Nikl-metal hydridový akumulátor (NiMH)	23
1.3 LITHIOVÉ AKUMULÁTORY	26
1.3.1 Lithium-iontový akumulátor (Li-ion)	27
1.3.1.1 Stručná historie	27
1.3.1.2 Konstrukce	28
1.3.1.3 Princip činnosti.....	29
1.3.1.4 Bezpečnost	29
1.3.1.5 Vlastnosti, použití.....	31
1.3.2 Lithium-železo-fosfátový akumulátor (LiFePO ₄)	33
1.3.3 Lithium-polymerový akumulátor (Li-Pol)	35
2.NEJVHODNĚJŠÍ AKUMULÁTORY PRO STACIONÁRNÍ AKUMULAČNÍ STANICE, ELEKTROMOBIL A AKUMULÁTOROVOU LOKOMOTIVU	37
2.1 STACIONÁRNÍ AKUMULAČNÍ STANICE.....	37
2.1.1 Požadavky na akumulátor	38
2.1.2 Výběr akumulátoru	39
2.2 ELEKTROMOBIL.....	40
2.2.1 Požadavky na akumulátor	40
2.2.2 Výběr akumulátoru	41
2.3 AKUMULÁTOROVÁ LOKOMOTIVA.....	44
2.3.1 Požadavky na akumulátor	45
2.3.2 Výběr akumulátoru	45
2.4 Celkové zhodnocení akumulátorů.....	47

3.NÁVRH AKUMULÁTOROVÉ BATERIE PRO ZVOLENOU APLIKACI	48
3.1 STACIONÁRNÍ AKUMULAČNÍ STANICE.....	48
3.2 ELEKTROMOBIL.....	51
3.2.1 Fyzikální rozbor	51
3.2.1.1 Aerodynamický odpor.....	51
3.2.1.2 Odpor stoupání	52
3.2.1.3 Odpor valivého tření	53
3.2.1.4 Odpor zrychlení.....	54
3.2.1.5 Celkový odpor a potřebná hnací síla	56
3.2.2 Parametry elektromobilu	57
3.2.3 Výpočet akumulátoru.....	58
3.3 AKUMULÁTOROVÁ LOKOMOTIVA.....	61
3.3.1 Fyzikální rozbor	61
3.3.1.1 Odpory kolejového vozidla.....	61
3.3.1.2 Traťové odpory.....	65
3.3.1.3 Celkový odpor a potřebná hnací síla	66
3.3.2 Parametry lokomotivy a tratě	67
3.3.3 Výpočet akumulátoru.....	67
Závěr	72
Literatura.....	73
Seznam obrázků a grafů.....	78
Seznam tabulek	79

Seznam symbolů

VELIČINA	ROZMĚR	POPIS
A_x	m^2	Čelní plocha vozidla
C_x	-	Aerodynamický koeficient
F_{Zrot}	N	Složka odporu zrychlení rotačních částí
i_c	-	Celkový převod mezi motorem a hnacími koly
i_p	-	Převod převodovky
i_r	-	Převod rozvodovky
J_m	$kg \cdot m^2$	Moment setrvačnosti motoru
J_p	$kg \cdot m^2$	Moment setrvačnosti převodovky
M_{rk}	Nm	Moment potřebný ke zrychlení kol
M_{rm}	Nm	Moment potřebný na zrychlení rotujících částí motoru
M_{rot}	Nm	Rotační moment
M_{rp}	Nm	Moment potřebný ke zrychlení částí převodového ústrojí
r_k	m	Valivý poloměr kola
s_e	m	Minimální dojezd elektromobilu
v_0	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost protivětru
ε_k	$rad \cdot s^{-2}$	Úhlové zrychlení kola
ε_M	$rad \cdot s^{-2}$	Úhlové zrychlení motoru
ε_p	$rad \cdot s^{-2}$	Úhlové zrychlení převodového ústrojí
F_{ct}	N	Tažná síla na obvodě hnacích kol
F_h	N	Hnací síla
F_{A1}	N	Celkový odpor tření v ložiskách pro kolejové vozidlo
F_{Zpos}	N	Složka odporu zrychlení posuvných částí
F_{Zrot}	N	Složka odporu zrychlení rotačních částí
F_o	N	Celkový jízdní odpor kolejového vozidla
F_o	N	Odpor kolejového vozidla
F_{oa}	N	Aerodynamický odpor
F_{ob}	N	Brzdný odpor
F_{or}	N	Odpor z oblouku
F_{os}	N	Odpor stoupání
F_{ovt}	N	Odpor valivého tření
F_{oz}	N	Odpor zrychlení
F_s	N	Potřebná tažná síla k rozjezdu vlaku
F_t	N	Odpor kolejové trati

G_1	N	Částečná tíha kolejového vozidla připadající na 1 kolo
J_k	$kg \cdot m^2$	Moment setrvačnosti kola
S_r	‰	Redukovaný sklon trati
m_e	kg	Hmotnost elektromobilu
m_l	kg	Hmotnost lokomotivy
r_d	m	Dynamický poloměr - skutečný poloměr kola
v_e	$m \cdot s^{-1}$	Maximální rychlost elektromobilu
ρ_a	-	Součinitel rotačních hmot
Δh	m	Výšková diference vozovky
Δl	m	Délková diference vozovky
a	$m \cdot s^{-2}$	Podélné zrychlení
f	-	Součinitel valivého odporu
G	N	Tíha
g	$m \cdot s^{-2}$	Gravitační zrychlení
m	kg	Hmotnost
n	-	Počet náprav kolejového vozidla
r	m	Poloměr čepu nápravy
R	m	Poloměr oblouku
s	-	Sklon vozovky (stoupání)
v	$m \cdot s^{-1}$	Dopředná rychlost
Z_k	kg	Zatížení kol
η	-	Mechanická účinnost
λ	-	Součinitel vlivu rotačních součástí
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota vzduchu
A	-	Smykové tření v ložiskách kolejového vozidla
$B \cdot V$	-	Valivé tření kola po kolejnici
$C \cdot V^2$	-	Aerodynamický odpor kolejového vozidla
W	J	Mechanická práce
x	m	Dráha pro rozjezd lokomotivy
α	$^\circ$, rad	Úhel stoupání vozovky
φ	$N \cdot kN^{-1}$	Součinitel tření v ložiskách

Seznam zkratek

ZKRATKA	POPIS
<i>AGM</i>	Absorbent Glass Mat - elektrolyt je nasáknut ve skelné netkané tkanině mezi elektrodami
<i>CCA</i>	Cold Cranking amps - startovací proud
<i>Co</i>	Kobalt
<i>DIN</i>	Deutsche Industrie-Norm - německá národní norma
<i>EN</i>	Evropská norma
<i>Fe</i>	Železo
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission - mezinárodní elektrotechnická komise
<i>LiFePO₄</i>	Lithium – železo - fosfátový akumulátor
<i>LiFeYPO₄</i>	Lithium - železo – yttrium - fosfátový akumulátor
<i>Li-ion</i>	Lithium - iontový akumulátor
<i>Li-Pol</i>	Lithium - polymerový akumulátor
<i>Mn</i>	Mangan
<i>Ni</i>	Nikl
<i>NiCd</i>	Nikl - kadmiový akumulátor
<i>NiCd</i>	Nikl - kadmiový akumulátor
<i>NiMH</i>	Nikl - metal hydridový akumulátor
<i>Pb</i>	Olovo
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers - americká norma
<i>VRLA</i>	Valve Regulated Lead Acid Batteries - ventilem řízené olověné akumulátory

Úvod

Elektrickou energii je potřeba akumulovat, to je dáno především tím, že bez akumulace bychom museli elektrickou energii spotřebovat okamžitě, jakmile se vyrobí. To by znamenalo zcela přizpůsobit výrobu elektřiny aktuální spotřebě, což je značně složité, jelikož u velkovýrobců neobnovitelných zdrojů elektrické energie bychom museli regulovat výrobu, která by pokryla okamžitou spotřebu energie. Ačkoliv se na první pohled může zdát, že jde o jednoduchý úkol, jde o velmi složitou věc. Nejobtížnější regulace výkonu u neobnovitelných elektráren je přítom u jaderné elektrárny, kde se navíc zkracuje životnost komponentů reaktoru. Nejjednodušší způsob pokrytí odběrů spočívá v exportu elektrické energie do zemí Evropy, kde ve výsledku celá elektrická síť působí jako akumulační systém. Lidstvo tedy potřebuje akumulovat elektrickou energii, aby ji mělo kdykoliv, kdy ji potřebuje a aby nebylo závislé na tom, kdy se vyrobí.

Elektrický akumulátor je technické zařízení, které nám slouží k opakovanému uchování elektrické energie, přičemž většina je založena na elektrochemickém principu, tedy schopnost přijímat elektrickou energii z vnějšího zdroje a ukládat ji (akumulovat) ve svých elektrodách jako energii chemickou (změnou chemického složení elektrochemicky aktivních složek elektrod). Vybíjení akumulátoru způsobuje dodávání elektrické energie do spotřebiče, tím se naopak mění energie chemická na námi potřebnou energii elektrickou. Akumulátory se řadí mezi tzv. sekundární články, tím rozumíme, že je možno takové články opakovaně nabíjet a vybíjet, Na rozdíl od primárních článků, kde probíhá nevratné vybíjení. [1]

Předmětem této bakalářské práce je zabývat se použitím akumulátorů pro trakční aplikace, budeme tedy hovořit o trakčních akumulátorech. Základní vlastností těchto akumulátorů je především schopnost dodávat elektrickou energii po delší dobu a ne jen v určitý okamžik. Nespornou výhodou a požadavkem je značná vysoká cyklická odolnost (proces vybití a znovu nabití) a také schopnost baterii úplně vybit, aniž by došlo k poškození. Z těchto vlastností je zřejmé, jak se liší od běžné autobaterie, která má plnit pouze jeden hlavní úkol a to nastartování motoru. Tento proces (nastartování motoru) vyžaduje krátký, vysoký odběr proudu. Po nastartování je během jízdy autobaterie dobíjena pomocí alternátoru a dále ji nevyžadujeme pro pohon automobilu. U trakčních akumulátorů máme naopak požadavek, aby akumulátor dodával elektrickou energii permanentně pro pohon automobilu.

Trakční akumulátory jsou v posledním letech značně na vzestupu a některé odvětví jsou na nich přímo závislá, jako například staniční akumulátor pro záložní systém napájení nemocnice. Díky stále rostoucímu úbytku fosilních paliv v posledních letech bude zřejmě největší uplatnění v automobilovém průmyslu, kde by právě auto na elektrický pohon mohlo nahradit klasický automobil. V současné době nejsou zatím elektromobily příliš rozšířeny a to díky velmi vysoké

ceně, která je s porovnáním s klasickým autem nejméně dvojnásobná a malým dojezdem na jedno nabití. Avšak téměř každá firma vyrábějící automobily má již v nabídce alespoň jeden elektromobil, nebo pracuje na vývoji, aby nezaostávala za konkurencí. Problematikou zabývající se elektromobilů, konkrétně vhodným výběrem trakčního akumulátoru do elektromobilu, se mimo jiné bude řešit ve druhém bodě bakalářské práce.

V prvním bodě bakalářské práce bude vytvořen přehled nejrozšířenějších typů trakčních akumulátorů a u všech typů bude uveden na závěr tabulka s jejich největšími výhodami a nevýhodami. Největší zaměření se bude týkat lithiových akumulátorů, jelikož tyto akumulátory jsou v současnosti nejrozšířenější a v mnohých parametrech vykazují nejlepší vlastnosti a neustále se technologicky zdokonalují. V druhém bodě bude proveden výběr nevhodnějšího akumulátoru dle typu, pro stacionární akumulární stanici, elektromobil a akumulátorovou lokomotivu. Tento výběr bude proveden dle určitých kritérií a požadavků. V posledním třetím bodě se pro tyto tři aplikace navrhne akumulátor s určitými parametry, aby co nejlépe splňoval svoji funkci v dané aplikaci.

Stručná historie akumulátoru

Základní kameny elektrochemických zásobníků energie položily osobnosti jako Alessandro Volta (1745–1827) a Luigi Galvani (1737–1798), kteří se nám připomínají i dnes pod pojmy jako galvanický článek a volt.

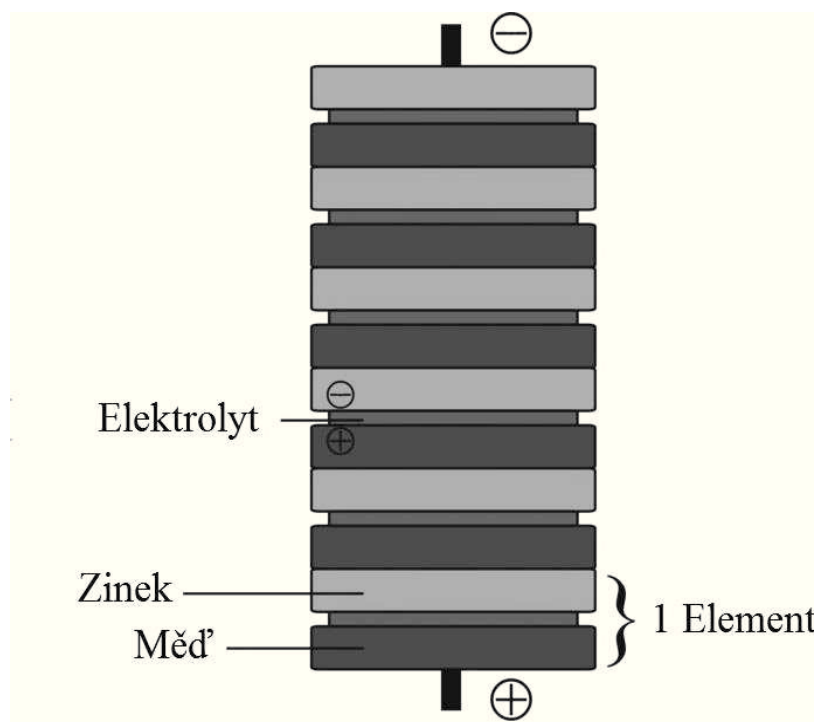
V roce 1780 italský přírodovědec a lékař Luigi Galvani pitval ve své laboratoři žábu, která byla umístěna na mosazném háčku. Když se dotkl její nohy železným skalpelem, noha sebou šklubla. Galvani věřil, že energie, která řídí tuto kontrakci, pochází z nohy samotné, tedy že cukání způsobuje jakási živočišná elektřina.

Na předešlé pokusy Luigi Galvani navázal svoji studii Alessandro Volta. Ten zjistil, že Galvaniho pozorování, kterých si všiml a zdokumentoval, nezpůsobuje, jak se mylně domníval živočišná elektřina, ale dotyk dvou různých kovů oddělených vlhkou látkou. Největším a bezesporu nejúspěšnějším Voltovým objevem kolem roku 1800 byl Voltův sloup (obrázek č.1), což byl v podstatě první funkční akumulátor. Na počest svého předchůdce nazval vyráběný proud tímto sloupem proudem galvanickým. Sestával ze střídavě navrstvených měděných a zinkových destiček, které byly vzájemně izolovány hadříky napuštěnými v kyselině. Volta dospěl k poznatku, že určité kapaliny jsou vodivé vzhledem k chemickým reakcím mezi kovy a že v důsledku toho vytvářejí elektrickou energii.

Začátkem 19. století Volta na dalším vývoji akumulátoru úzce spolupracoval s francouzským Národním institutem. Také Napoleon Bonaparte podporoval experimenty, například jiskření akumulátoru, tavení ocelového drátu, vybíjení elektrické pistole nebo rozklad vody na prvky.

První akumulátor, který je schopen energii nejdříve přijmout a následně uchovat – akumulovat, vynalezl francouzský fyzik G.R.Planté roku 1859. Jeho řešení spočívá v přeměně elektrické energie v energii chemickou akumulátorového média.

Olověný akumulátor je tvořen z páru olověných desek, ponořených do nádoby s elektrolytem. Jako elektrolyt zde slouží kyselina sírová H_2SO_4 , která se ředí v příslušném poměru s destilovanou vodou. Na deskách zcela nenabitého akumulátoru se usadí účinkem kyseliny síran olovnatý $PbSO_4$. Po připojení stejnosměrného elektrického napětí se na kladné elektrodě vytváří oxid olovičitý PbO_2 a záporná elektroda se pokryje tmavě šedou vrstvou houbovitého olova. Tím se nabitý akumulátor přeměnil v galvanický článek a nabíjí se. Elektrolyt zhoustne a na svorkách páru elektrod změříme napětí. Při vybíjení, po spojení svorek elektrod přes zátěž, začne probíhat opačná elektrochemická reakce než při nabíjení.



Obrázek 1: Schématické znázornění Voltova sloupu (upraveno autorem) [2]

Ve srovnání s jinými bateriemi Planteho akumulátor byl poněkud velký a těžký. Ovšem měl bezesporu několik kladných vlastností jako velké proudové rázy a velmi nízký vnitřní odpor, z čehož plyne možnost použít akumulátor pro napájení více obvodů. Sekundární akumulátor

pracující na bázi olova a kyseliny sírové se používá dodnes. Především v automobilech, kde váha není významným faktorem.

Mezi akumulátory, které jsou nám již dnes zcela známy, můžeme zařadit NiCd články, tedy akumulátory založené na kooperaci niklu a kadmia. Tento typ vznikl v roce 1899 zásluhou Waldmara Jungnera. NiCd akumulátor byl později zdokonalován a sloužil jako jediný typ dobíjecího akumulátoru. Největší nevýhodou bylo ovšem značně neekologické složení, a proto byla potřeba začít pracovat na akumulátoru, který by tolik neničil životní prostředí. Po dlouholetých výzkumech, byla následně uskutečněna výroba akumulátoru typu NiMH, který pracuje na základě niklu a vodíku. Vývoj akumulátorů jde jednoznačně neustále dopředu především díky neustálým rostoucím nárokům na kapacitu akumulátoru a dalším vlastnostem. [3] [4] [5] [6] [7]

Podstatné parametry u vlastností akumulátoru

Na trhu se vyskytuje mnoho akumulátorů různých značení, od různých výrobců apod. Abychom měli možnost srovnat určité vlastnosti různých typů, existuje několik parametrů, které nám pomáhají při výběru požadovaného akumulátoru.

- **NAPĚTÍ AKUMULÁTORU** - Udává se ve voltech a je závislé na počtu článků baterie, tedy na konstrukci akumulátoru. Pokud bychom vyžadovali vyšší napětí, je možné spojit do série jednotlivé články.
- **KAPACITA AKUMULÁTORU** – Udává se v jednotkách ampérhodin a vyjadřuje nám, kolik energie je schopen akumulátor v sobě uchovat. Je dána tedy jako součin vybíjecího proudu a doba jeho vybíjení. Je logické, že s rostoucím vybíjecím proudem kapacita akumulátoru klesá. To je dáno chemickou reakcí uvnitř akumulátoru. Nedílnou součástí kapacity je závislost na stáří akumulátoru. U nového akumulátoru se kapacita zvyšuje a při dosažení maximální hodnoty kapacity pak postupně klesá. To díky změnám ve struktuře činné hmoty (odpadávání kousků činné hmoty v podobě kalu, zanesení pórů). Další závislostí kapacity je vliv akumulátoru na okolní teplotu prostředí. Aby se určitým způsobem daly porovnat určité typy akumulátorů, udává se pro srovnání tzv. kapacita C20 (jmenovitá dvacetihodinová kapacita)¹. Ta odpovídá přesně rovnoměrnému vybíjení po dobu 20 hodin, při teplotě 27 °C proudem 0,05 A do snížení napětí na 1,75 V na článek.

¹ Převážně u trakčních akumulátorů se můžeme setkat navíc i s kapacitou C5. Ojedinele je definována kapacita akumulátoru pro dobu vybíjení 10 hodin.

- **PROUD** – Udává se v ampérech. Proudový odběr spotřebiče (např. v automobilu) si můžeme spočítat podle jednoduchého vzorce: $I = \frac{P}{U}$. Kde U je svorkové napětí na spotřebiči a P máme například přední žárovku u automobilu (60W). U trakčních akumulátorů je navíc možno se setkat s parametrem: maximální vybíjecí proud A (5 sekund). Hodnota časové hodnoty se může navíc lišit v závislosti na výrobci.
- **HMOTNOST, ROZMĚRY** – Tyto dva parametry mohou být v určitých aplikacích zcela přehlíženy a nemusíme na ně brát ohled. Typickým takovým příkladem je použití akumulátoru pro stacionární stanici, kde nám zcela nepochybně nebude vadit rozměrově větší akumulátor, který budeme mít například v suterénu domu. Na druhou stranu bezpochybně vzorovým příkladem, kde nám rozměry a hmotnost hrají jednu z hlavních kritérií pro volbu akumulátoru, je použití v elektromobilu.
- **STARTOVACÍ PROUD** – Závisí na rozměrech a konstrukci akumulátoru, často se označuje jako CCA (Cold Cranking amps). Udává nám jaký výkon je schopný akumulátor dodat v určitém okamžiku. Udává se dle norem EN, DIN, IEC, SAE. U normy DIN dostáváme takový proud, který musí být akumulátor schopen dodávat při teplotě -18°C po dobu 30 sekund, přičemž napětí nám nesmí klesnout pod 9 V. U normy EN je to při teplotě -18°C po dobu 10 sekund, přičemž napětí nám nesmí klesnout pod 7,5 V. Trakční akumulátory nejsou schopny díky tlustým elektrodám dodat takový velký startovací proud jako startovací akumulátory.

Důležitým parametrem je také vnitřní odpor akumulátoru. Ideální akumulátor má nulový vnitřní odpor, tím pádem je schopný dodat proud v jakémkoliv rozmezí bez poklesu svorkového napětí. U reálného akumulátoru ovšem dojde vždy k určitému poklesu napětí, tato nežádoucí vlastnost je dána vnitřním odporem akumulátoru. Čím bude větší odběr proudu, tím větší bude pokles napětí a čím menší vnitřní odpor, tím se nám zmenší tento pokles. Z toho plyne, že hodnota vnitřního odporu je pro nás velmi důležitá, jelikož malý vnitřní odpor nám zajišťuje schopnost poskytnout při velkém zatížení vysoký vybíjecí proud bez většího poklesu napětí v obvodu akumulátoru.

Dalšími parametry může být například umístění kontaktů, typ kontaktů, typ uchycení a dále jestli se jedná o bezúdržbový nebo údržbový akumulátor. [8] [5]

1. PŘEHLED AKUMULÁTORŮ URČENÝCH PRO TRAKČNÍ APLIKACE

V prvním bodě této bakalářské práce bude vytvořen přehled a následný popis vlastností akumulátorů, které se používají pro trakční aplikace. Trakčními akumulátory rozumíme takové, které:

- Vyrží hluboké a časté vybíjení
- Jsou schopny dodávky elektrické energie co nejdéle dobu
- Jsou v nejlepším případě bezúdržbové

Požadavky, které máme na trakční akumulátory, se mohou navíc podle určení použití lišit. Těmito požadavky se bude mimo jiné zabývat druhá kapitola této bakalářské práce.

U všech typů akumulátorů bude v závěru celkové shrnutí v podobě výhod a nevýhod daného typu akumulátoru.

1.1 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY

Olověný akumulátor je galvanický článek s elektrodami, které jsou na bázi olova. Kladnou elektrodu tvoří oxid olova a zápornou olovo. Tyto elektrody jsou ponořené do elektrolytu, a tím vzniká chemická reakce. Chemický proces, který vzniká při nabíjení a vybíjení je vratný. Napětí jednoho článku je 2V. Aby trakční akumulátory vydrželi hluboké a časté vybíjení, obsahují tlustší elektrody než klasické startovací akumulátory. Elektrolytem je u tohoto typu akumulátoru použita kyselina sírová. Koncentrace kyseliny sírové je značně závislá na stavu nabití akumulátoru (u plně nabitého akumulátoru jde o hodnotu přibližně 35 %).

Tento akumulátor je v současné době jedním z nejrozšířenějších jako startovací akumulátor u automobilů, to především díky ceně a výborné schopnosti dodávat větší proudy po krátkou dobu. Olověné akumulátory jsou jedny z nejvíce toxických akumulátorů právě díky obsahu kyseliny sírové. Od prvního Planteho olověného akumulátoru uběhlo již bezmála 150 let, díky tomu se vlastnosti, ale i rozměry a hmotnost tohoto akumulátoru značně vylepšily. Dnešní olověné akumulátory, díky moderní technologii, obsahují například speciální mřížky, které jsou z elektrochemických slitin olova a do těchto mřížek jsou zalisovány aktivní hmoty. U těchto akumulátorů je značnou nevýhodou sulfatace (úbytek kapacity na akumulátoru). Sulfatace vzniká, pokud je akumulátor delší dobu nepoužíván a je uskladněn ve vybitém stavu. Při tomto procesu dochází ke vzniku krystalického síranu olovnatého, který vznikl při vybíjení na elektrodách. Kapacitu takto zasaženého akumulátoru je možno částečně obnovit procesem zvaným de-sulfatace. Tento proces spočívá nabíjením akumulátoru speciální nabíječkou, která nabíjí pomocí krátkých

pulsů při větším proudu. V dnešní době některé moderní olověné akumulátory obsahují speciální anti-sulfatační úpravu, ta výrazně snižuje riziko sulfatace. Olověné akumulátory můžeme dělit na údržbové, bezúdržbové a navíc podle technologie výroby.

1.1.1 Údržbové olověné akumulátory

Údržbové akumulátory jsou konstrukčně nejstaršími. Dají se snadno identifikovat tak, že na víku akumulátoru se nachází inspekční zátky, které slouží pro doplnění destilované vody a pro případnou kontrolu hladiny elektrolytu. Elektrolyt je zde základní chemická sloučenina vyvolávající elektromechanickou reakci v akumulátoru, obsahuje vodu a ta se během této reakce odpařuje. Akumulátor je konstruován tak, aby plyny vzniklé při elektrolýze (kyslík, vodík) mohly bezpečně unikat. Současné akumulátory již nevyžadují tak intenzivní kontrolu jako v minulosti. Většinou je výrobcem předepsaná kontrola po dosažení určitého množství cyklů nebo se kontrolují jednou ročně.

1.1.1.2 Trakční Pb akumulátor se zaplavenými elektrodami

Tento typ není hermeticky uzavřen a je navíc opatřen zátkami pro doplňování elektrolytu. Elektrolyt je zde volně nalitá kapalina mezi elektrodami. Nevýhodou je, že při nabíjení se spolu s plyny může dostat ven i část tekutého elektrolytu. Z toho plyne, že akumulátor nesmí být z hlediska bezpečnosti v uzavřených prostorách. Jako výhoda je zde především možnost dobíjet akumulátor vyšším dobíjecím proudem než u akumulátoru v provedení VRLA.



Obrázek 2: Trakční údržbový olověný akumulátor Midac MF120 (bez údržby 120 cyklů) [9]

1.1.2 Bezúdržbové olověné akumulátory

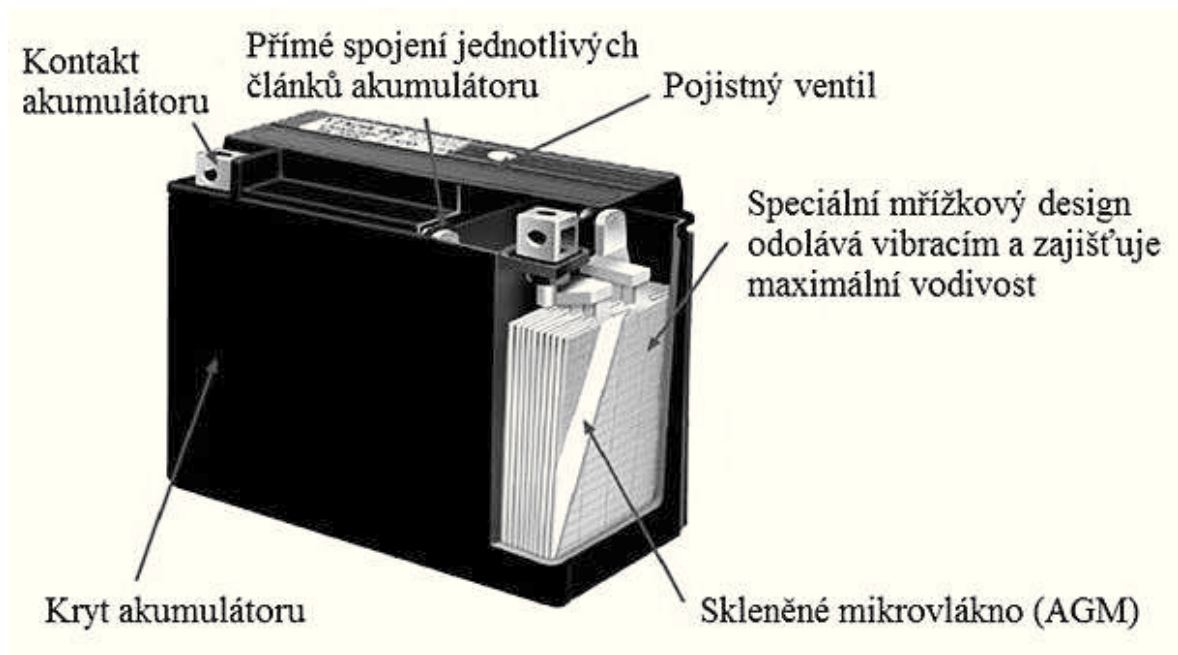
Jak je již z názvu patrné, tyto akumulátory nevyžadují žádnou údržbu týkající se stavu elektrolytu a činnost s tím spojenou (dolévání destilované vody). Většinou akumulátor tuto volbu přímo neumožňuje. Z hlediska spolehlivosti by se měla pravidelně provádět kontrola stavu konektorů akumulátoru, jestli na nich není oxidace a bezpečně pevné usazení akumulátoru. Tento bod kontroly provádíme i u údržbových akumulátorů.

1.1.2.1 Trakční akumulátor - VRLA

Zkratka VRLA znamená Valve Regulated Lead Acid Batteries, v překladu tedy ventilem řízené olověné akumulátory. Jsou to tzv. rekombinační akumulátory. Kyslík, který vzniká u kladné elektrody, se spojí s vodíkem, který vznikne u záporné elektrody a tím vznikne znovu voda. Díky tomu se dosáhne nevysychání článků. Tenhle proces tak umožňuje bezúdržbový provoz. Při rekombinaci vzniká uvnitř akumulátoru tlak, který je potřebný k procesu. Díky tomu tento typ akumulátorů obsahuje navíc speciální ventil, který plní funkci bezpečnostního přetlakového ventilu. Tento ventil se otevře při příliš vysokém tlaku (způsobeném například použitím chybného nabíjecího přístroje) a plyny mohou bezpečně unikat ventilem. Přetlakový ventil je takové konstrukce, aby nemohl dovnitř akumulátoru vniknout okolní vzduch. Hodnota pro otevření ventilu se liší v závislosti na typu akumulátoru, převážně se jedná o hodnotě 10 – 40 kPa. Výhodou těchto akumulátorů je možnost naklonění, mohou být tedy použity v téměř jakékoliv poloze, aniž by došlo k úniku elektrolytu. VRLA akumulátor se dále dělí na AGM a GELOVÉ.

1) Trakční akumulátor s vázaným elektrolytem – AGM

Zkratka AGM znamená Absorbent Glass Mat. Obsahuje tekutý elektrolyt, který je nasáknutý do speciální skelné netkané tkaniny, navíc je dotovaný bórem a ten doléhá na jednotlivé mřížky. Díky konstrukci akumulátoru jsou téměř vyloučeny jakékoliv zkraty mezi mřížkami a drolení aktivní hmoty. Díky tomu je výrazně zlepšena životnost akumulátoru a sníženo riziko vzniku stratifikace kyseliny sírové. Pojmem stratifikace rozumíme tvoření vrstev kyseliny, přičemž její hustota je odlišná při určitých hladinách. U dna se hromadí elektrolyt, jenž má vyšší koncentraci a díky tomu tento jev přispívá k nechtěné sulfataci a k zhoršení kvality akumulátoru. Rozvrstvení kyseliny v akumulátoru je především problém u velkých stacionárních akumulátorů, které jsou vyšší konstrukce. Výhodou tohoto provedení AGM je velmi vysoká odolnost vůči vibracím, pomalé samovybíjení (1–3% za měsíc), velký výkon při nižších teplotách (díky větší aktivní ploše mřížky), cena, velká kapacita na relativně malou hmotnost. Naopak mezi nevýhody řadíme především ztrátu kapacity při nepoužívání a malý počet vybíjecích cyklů (asi 200).



Obrázek 3: Znárodnění olověného akumulátoru s použitou technologií AGM od firmy Yuasa (upraveno autorem) [10]

2) Gelový akumulátor



Konstrukčně je gelový akumulátor téměř stejný jako klasický olověný akumulátor. Elektrolyt je tady ovšem ve formě křemičité suspenze, tedy ve formě gelu. Rovněž jako u AGM akumulátoru nehrozí při náklonu, ani přetočení únik elektrolytu. U těchto akumulátorů je díky suspendovanému elektrolytu téměř vyloučen vznik stratifikace kyseliny. Vlastnosti gelového akumulátoru jsou stejné jako u akumulátoru AGM, nicméně v některých vlastnostech je lepší, je to např. rekombinace plynů (proces přeměny kyslíku a vodíku, které se tvoří uvnitř akumulátoru zpět na vodu), snížení samovybíjení a lépe snáší vyšší provozní teplotu.

Obrázek 4: Olověný gelový akumulátor od firmy fgFORTE, označení: 4OPzS200 [71]

Pokud bychom chtěli srovnat akumulátor technologie AGM a gelový akumulátor, srovnání by bylo velice obtížné. Obě technologie řešení mají podobné vlastnosti. Každý výrobce akumulátorů preferuje a vyzdvihuje určitý typ. Nejlepším řešením je srovnání konkrétních modelů u stejného výrobce a zvolit si takový typ akumulátoru, který nám splňuje nejlépe naše požadavky. [1] [11] [5] [12] [13] [14]

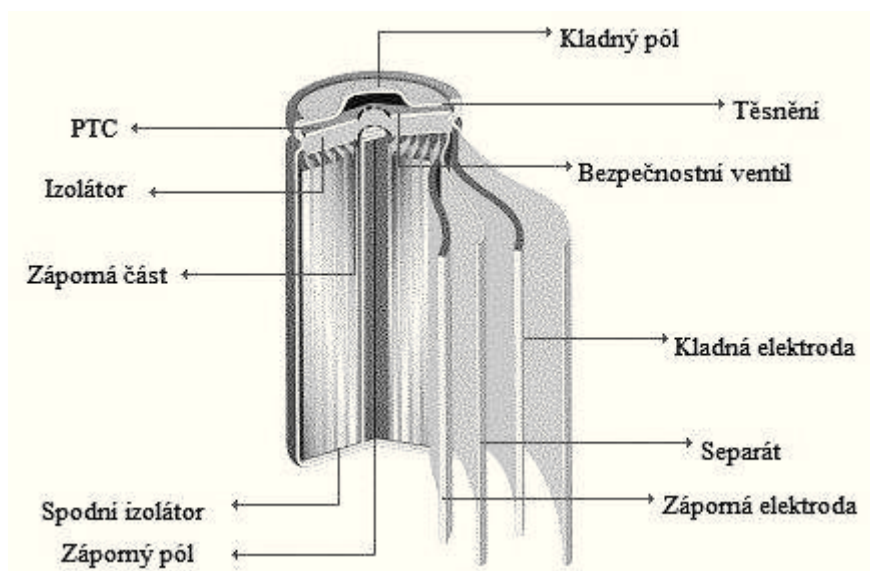
Tabulka 1: Výhody a nevýhody olověného akumulátoru

VÝHODY	NEVÝHODY
<ul style="list-style-type: none"> • Cenově velmi levný (nejlevnější zdroj pro akumulaci elektrické energie) • Léty prověřená technologie výroby • Schopnost akumulátoru dodávat velké proudy • Velmi malý vnitřní odpor • Minimální samovybití 	<ul style="list-style-type: none"> • Velmi vysoká hmotnost • Malý počet dobíjecích cyklů (500-800) • Velmi neekologické – vysoce toxické díky kyselině sírové • Velmi malá hustota energie na kilogram (cca. 40 Wh/kg) • Nízká účinnost dobíjení (70%)

1.2 NIKLOVÉ AKUMULÁTORY

1.2.1 Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd)

Zkratkou, kterou označujeme tento akumulátor (NiCd), má jako registrovanou ochrannou známku francouzská firma SAFT Corporation. Pro trakční a staniční účely jsou akumulátory vyráběny se zaplavenými elektrodami a kapalným elektrolytem. Tento typ akumulátoru řadíme mezi tzv. galvanické články. Napětí jednoho článku je 1,2V. Akumulátor NiCd obsahuje kladnou elektrodu, ta je tvořena z hydroxidu niklu, dále pak zápornou elektrodu, která je tvořena naopak z kovového kadmia (Cd). Mezi elektrodami je vložen separát, obsahující elektrolyt (hydroxid draselný rozpuštěný ve vodě), který odděluje kladnou a zápornou elektrodu. Pro lepší znázornění slouží obrázek č. 5.



Obrázek 5: Konstrukce hermetického NiCd akumulátoru válcového tvaru (upraveno autorem) [15]

Pokud nabíjíme NiCd akumulátor a nabíjení pokračuje i po plném nabití elektrod, dochází k přebíjení akumulátoru. Při přebíjení se začíná rozkládat elektrolyt uvnitř akumulátoru (dochází k elektrolýze vody, kdy se vyvíjí kyslík na kladné elektrodě a vodík na záporné elektrodě). U hermeticky neuzavřených akumulátorů se vznikající plyny při tomto procesu odvádí z akumulátoru ven. V hermeticky uzavřených akumulátorech naopak využíváme vlastnosti záporné elektrody vázat kyslík, který se uvolňuje při přebíjení na kladné elektrodě. Tomuto ději říkáme rekombinace. Díky tomu musí mít samozřejmě záporná elektroda větší kapacitu, než kladná. Při tomto procesu nabíjení je na záporné elektrodě kadmium oxidováno a díky tomu je zabráněno následujícímu přebíjení. Kvůli bezpečnosti mají akumulátory přetlakový ventil nebo odvětrávací otvor.

Proces přebíjení můžeme z vnějšího pohledu zpozorovat tak, že se nám článek zahřívá. Tohoto stavu můžeme využít například pro automatické odpojení nabíječky. Pro automatické odpojení se

využívá i další stav akumulátoru, a to když u konce nabíjení akumulátoru dojde k prudkému krátkodobému zvětšení proudu následujícím snížením napětí na akumulátoru.

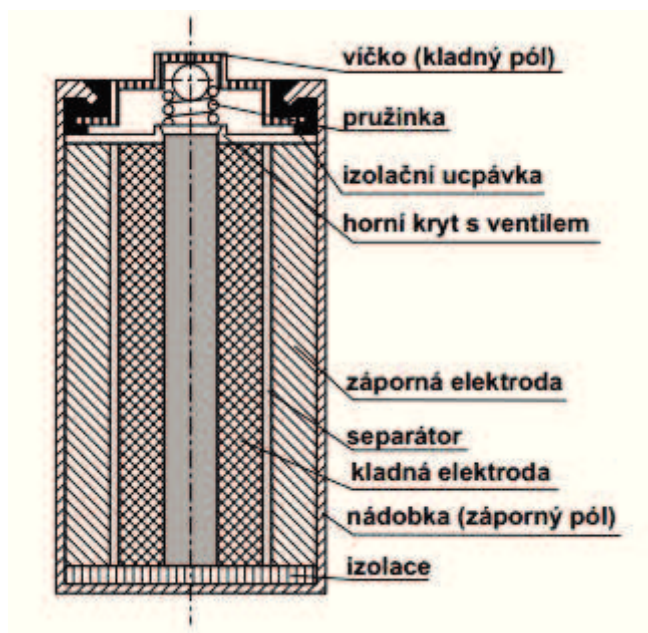
Jednou z hlavních předností tohoto typu akumulátoru je možnost skladování ve zcela vybitém stavu, z toho plyne i odolnost vůči úplnému vybití. Další výhodou těchto akumulátorů je jejich vysoká proudová zatížitelnost a schopnost funkce i v extrémních klimatických podmínkách (téměř až do -20C°). Naopak jednou z velkých nevýhod je, že NiCd akumulátor trpí paměťovým efektem. Tento efekt vzniká při opakovaném vybití na malou stejnou hloubku vybití (50 – 100 x). Vysvětlením je změna krystalové struktury na záporné elektrodě (usazují se kovové krystalky). Nutno podotknout, že tento jev je reverzibilní a odstraníme ho plným vybitím akumulátoru. U akumulátorů, kde kadmium není aktivní složkou záporné elektrody, se s paměťovým efektem téměř nesetkáváme. Velkým problematickým rysem tohoto akumulátoru je především velká jedovatost kadmia (toxický těžký kov), nesmí být tedy použity tam, kde by únik kadmia způsobil katastrofální následky. Díky tomu je tento typ akumulátoru postupně nahrazován typy akumulátorů, které nejsou tak nebezpečné pro životní prostředí. Díky spolehlivosti ovšem mají stále své uplatnění například ve vojenské a kosmické technologii. Akumulátor typu NiCd se dále používá například v akumulátorových vrtačkách, jelikož typickým rysem a výhodou je relativně malá změna napětí v průběhu vybití, což znamená, že napětí je téměř po celou dobu vybití konstantní a to téměř až do plného vyčerpání kapacity. [1] [16] [17] [18] [19]

Tabulka 2: Výhody a nevýhody nikl-kadmiového akumulátoru

VÝHODY	NEVÝHODY
<ul style="list-style-type: none"> • Může být skladován vybitý • Vysoká spolehlivost a životnost • Schopnost odběru vysokých proudů • Odolnost vůči mrazům • Počet dobíjecích cyklů (cca 2000) • Možnost použít rychlé nabíjení (u největších rozměrů baterie je ovšem problém s odvodem tepla) • Vysoká mechanická odolnost 	<ul style="list-style-type: none"> • Paměťový efekt • Menší měrná energie vztažená na hmotnost (40-60 Wh/kg) • Nízká účinnost dobíjení (60-90%) • Samovybití až 20 % za měsíc (v závislosti na okolní teplotě) • Použití kadmia - velmi toxické

1.2.2 Nikl-metal hydridový akumulátor (NiMH)

Tyto akumulátory jsou obdobou NiCd akumulátorů. Hlavním důvodem pro vývoj nového typu akumulátoru byl především požadavek ekologů nahradit vysoce toxické kadmium nějakým jiným vhodným materiálem. Dalším důvodem mimo jiné bylo zvýšení kapacity akumulátoru. I tady je napětí jednoho článku 1,2V. Kladná elektroda je tvořena z hydroxidu niklu, záporná elektroda je tvořena elektrochemicky aktivní kovovou slitinou, která je schopná vázat vodík. Tato slitina je většinou tvořena z niklu, hliníku, manganu, kobaltu nebo z některých vzácných kovů (lanthan, cer, neodym). Slitina kovů, která tvoří zápornou elektrodu, se volí na základě experimentálních výsledků a každý výrobce si své přesné složení chrání. Jako elektrolyt je i tady použit hydroxid draselný, rozpuštěný ve vodě a separát je vyroben ze syntetických vláken. I tento akumulátor je vybaven pojistným ventilem, kdyby vyvíjení plyného vodíku uvnitř akumulátoru přesáhlo bezpečnou hranici. Pro lepší znázornění vnitřní struktury slouží obrázek č.6.

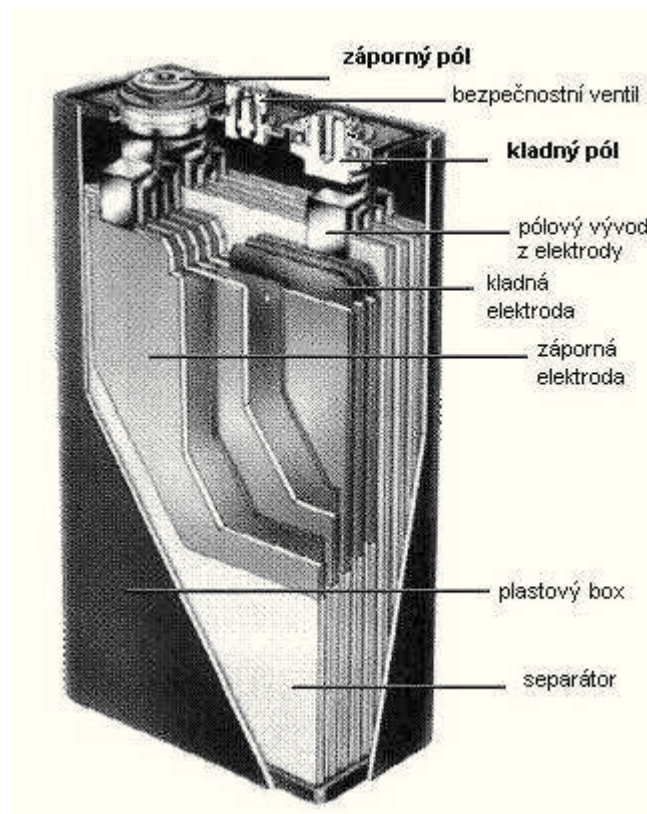


Obrázek 6: Konstrukce hermetického NiMH článku [20]

Kapacita NiMH akumulátoru je oproti NiCd akumulátoru dvojnásobně vyšší při stejné velikosti článku. Tyto akumulátory představují i menší zátěž pro životní prostředí, jelikož vůbec neobsahují toxické kadmium. Naopak značnou nevýhodou může být absence možnosti použití v extrémních klimatických podmínkách jako u NiCd akumulátoru.

Jelikož akumulátory NiMH jsou na trhu relativně krátkou dobu, jsou postupně jejich parametry zlepšovány, a proto například samovybíjení NiMH akumulátorů je už skoro téměř totožné jako u NiCd akumulátorů. Dále již existují akumulátory, které jsou schopné dodat vybíjecí proud, odpovídající několikanásobku jmenovité kapacity akumulátoru.

Použití NiMH akumulátorů je především ve stejných aplikacích jako u NiCd článků. Použití pro trakční účely je rozšířenější, jelikož zde nemáme nevýhodu v podobě paměťového efektu jako u předchozího NiCd článku. Znárodnění akumulátoru pro trakční aplikace je znázorněno na obrázku č.7.



Obrázek 7: Zjednodušená konstrukce NiMH od firmy Matsushita Battery Industrial – Panasonic (upraveno autorem) [21]

Významným použitím NiMH akumulátoru je v hybridních automobilech, kde se využívá dalších výhod, jako jsou parametry v oblasti vybíjení, dobíjení a ceny. V současnosti nejznámější automobil s hybridním pohonem – Toyota Prius (obr. 7), využívá právě NiMH baterie.

Navíc u tohoto modelu chce Toyota zůstat u stávajícího typu akumulátoru minimálně do roku 2020 díky osvědčené technologii. Postupem času chce začít používat akumulátory na bázi lithia. [19] [22] [23] [24]



Obrázek 8: Hybridní automobil Toyota Prius a NiMH akumulátor z téhož automobilu [25] [26]

Tabulka 3: Výhody a nevýhody nikel-metal hydridového akumulátoru

VÝHODY	NEVÝHODY
<ul style="list-style-type: none"> • Ekologický (s porovnáním NiCd) • Velmi malá vnitřní impedance • Velké vybíjecí proudy • Malý pokles napětí při velkých proudových zátěžích • Možnost rychlého nabíjení • Oproti starším NiCd akumulátorům 2x větší kapacita • Cena • Životnost 	<ul style="list-style-type: none"> • Zvýšené samovybíjení (u některých druhů) • Menší měrná energie vztažená na hmotnost (30-80 Wh/kg) • Není tak klimaticky odolný jako NiCd • Menší počet cyklů dobíjení (cca.1000) oproti NiCd

1.3 LITHIOVÉ AKUMULÁTORY

Ze známých 92 prvků se stabilními izotopy má právě lithium a jeho sloučeniny nejvyšší hodnotu elektrochemického potenciálu. Proto se stává právě tento prvek předmětem mnoha výzkumů, a díky tomu můžeme očekávat v budoucnosti technologická zdokonalování právě lithiových akumulátorů. [27]

Lithium je extrémně měkký kov, vyniká navíc tím, že je nejlehčí ze všech pevných prvků. Na pohled je stříbrobílý. Pokud vložíme tento prvek do vody, je nadlehčován a plave. To samé se stane, pokud ho ponoříme do oleje. Pokud přijde do kontaktu se vzduchem nebo vodou, okamžitě reaguje. V čisté podobě se lithium v přírodě vůbec nevyskytuje, pouze jeho sloučeniny.



Obrázek 9: Prvek lithium a jeho řez (upraveno autorem) [70]

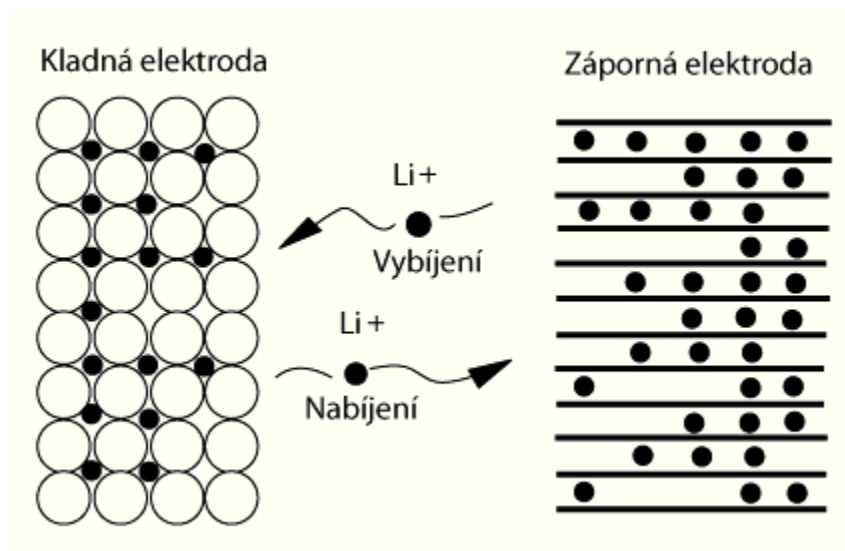
Lithiové akumulátory mají tedy, oproti jiným akumulátorům, největší měrnou hustotu elektrické energie. V současnosti se pohybujeme kolem 200 - 300 Wh/kg, to je oproti olověným akumulátorům, které disponují hodnotou 40 Wh/kg, téměř 10x více. Nespornou výhodou je navíc dostupnost prvku lithia a dostatečné zásoby na zemi². V České republice, konkrétně v Krušných horách, se nachází podle odhadů až 120 tisíc tun této suroviny. V minulosti se těžba této suroviny u nás nevyplatila, jelikož jsme čerpali velké množství sloučeniny lithia z bývalého Sovětského svazu, kde právě ochuzené lithium byl odpadní produkt při výrobě štěpného materiálu pro termonukleární zbraně. V současnosti se ovšem nevyplatí těžit tato surovina z hlediska nízké ceny dodavatelů ze zahraničí, i když v roce 2016 by se mohla znova obnovit těžba v České republice, díky německé firmě SolarWorld, která plánuje začít těžbu na německé straně a pokračovat v Česku, konkrétně v Cínovci. Z dodávky lithia ze zahraničí se nám tvoří jeden eventuální problém a to, že většina světových zásob se nachází v Bolívii, Chile, Argentíně a Číně. Tyto země jsou politicky nestabilní a v budoucnu by eventuálně mohly vzniknout možné komplikace s exportem lithia. Do budoucna se dá předpokládat, že světová spotřeba lithia několikanásobně vzroste, především díky vzrůstajícímu počtu elektromobilů, které potřebují větší množství lithiových baterií. Díky tomu by tento prvkem mohl mít stejné ekonomické postavení jako má nyní například ropa. [28] [29] [30] [31] [1]

² Odhaduje se, že těžitelné zásoby lithia na celém světě jsou asi 39Mt čistého kovu. Podle poslední německé studie Centra pro sluneční energie a výzkum vodíku ze Stuttgartu předpokládáme, že je na světě dostatek lithia pro výrobu akumulátorů až do 10 miliard elektromobilů.

1.3.1 Lithium-iontový akumulátor (Li-ion)

1.3.1.1 Stručná historie

První pokusy vytvořit lithiový článek, tehdy ještě nenabíjecí, začal G. N. Lewis v roce 1912. Návrh a postupný vývoj ovšem začal až kolem roku 1970, navíc se ukázalo, díky mnohým pokusům, že je možné ho vyrábět i v dobíjecí verzi, ovšem stále se vyznačoval mnohými nedostatky³. Obrovský pokrok představila až firma Sony v roce 1990. Její nová technologie využívala pro zápornou elektrodu aktivní materiál směsi uhlíku, který byl navíc obohacen lithiem a polyolefinem. Při nabíjení putují ionty Li^+ z kladné elektrody na zápornou a při vybíjení opačně (obrázek č. 10). Nutno podotknout, že elektromechanické vložení iontů Li^+ do uhlíku, je známo už od roku 1975, ale až firma Sony uskutečnila první praktické využití.



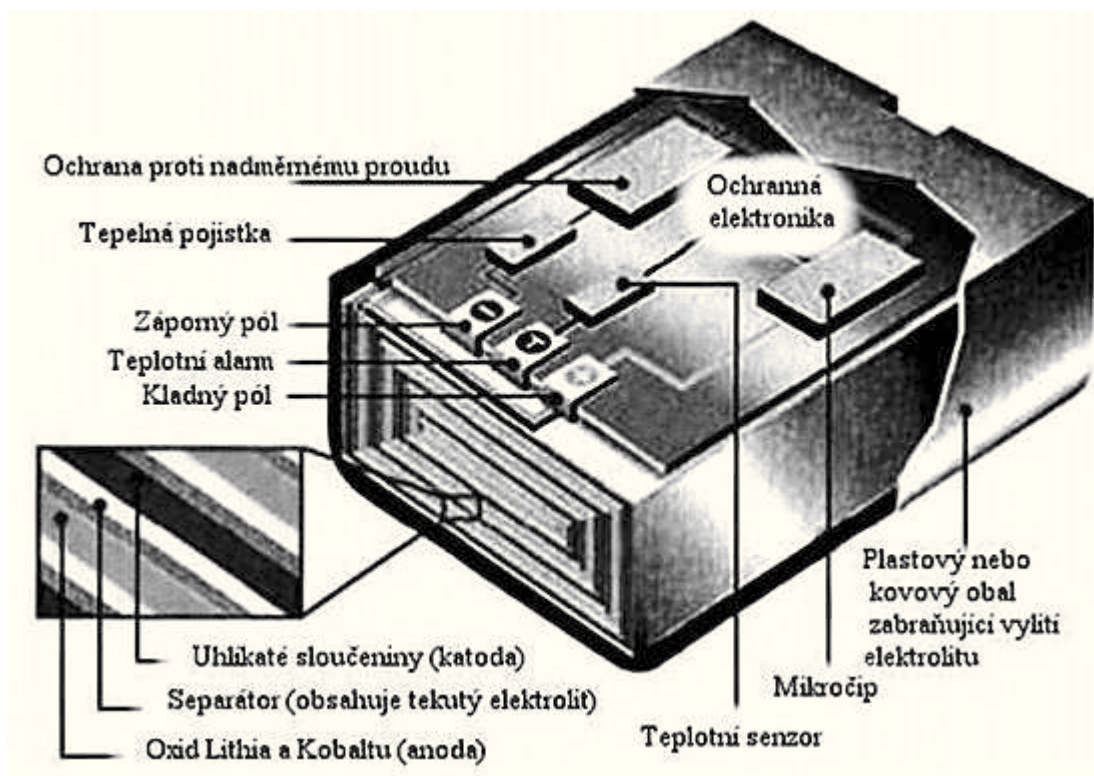
Obrázek 10: Pohyb iontu Li^+ při vybíjení a nabíjení (upraveno autorem) [32]

Ředitel firmy Sony Keizaburo Tozawa zavedl navíc i pojmenování těchto akumulátorů - Li-ion akumulátory. Následně v roce 1995 vyvíjí firma Sony lithium-ion modul, který je určen pro použití do elektrických vozidel. Díky zkušenostem této japonské firmy získalo právě Japonsko značný náskok ve výrobě li-ionových akumulátorů a zcela jednoznačně dominuje světové produkci těchto akumulátorů. [33]

³ Tato velká časová prodleva je odůvodněna především problematickému výrobnímu procesu lithiových akumulátorů. Chemický prvek lithium totiž patří do skupiny alkalických kovů a díky tomu výrobní montáž těchto akumulátorů musí být v takovém prostředí, kde je téměř 0% kyslíku a 0% vodní páry, aby nedošlo právě k bouřlivé reakci. Při manipulaci s lithiem se navíc musí používat ochranné pomůcky, jelikož při styku s kůží by lithium zareagovalo s vodou na povrchu kůže na hydroxid lithný, který je velmi nebezpečný.

1.3.1.2 Konstrukce

Z hlediska konstrukce je Li-ion akumulátor tvořen anodou, která je vyrobena z kovových oxidů (Co, Fe, Mn, Ni) spinelové nebo vrstevnaté struktury⁴ a katodou, u které se jako materiál v současné době obecně využívá mletý grafit. Jako elektrolyt je zde nejčastěji použita fluorovaná sůl lithia. Konstrukce Li-ion článku je znázorněna na obrázku č.11.



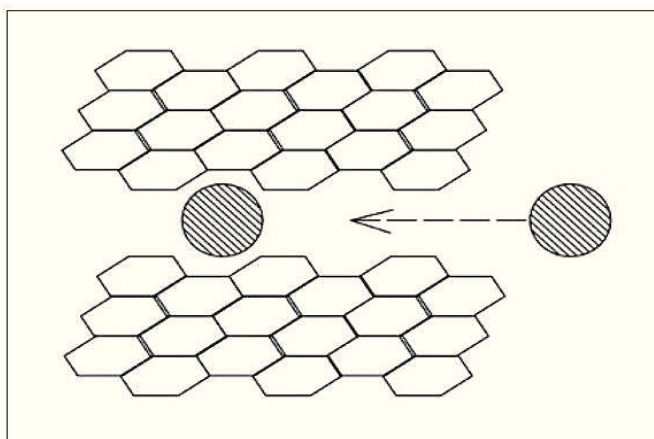
Obrázek 11: Konstrukce Li-Ion článku [34]

V minulosti měli první akumulátory elektrodu z kovového lithia, ovšem upustilo se od toho vzhledem k nedostatkům, a proto se v současné době používají pouze sloučeniny lithia. Na obrázku č.11 si mimo jiné můžeme všimnout několika ochran a senzorů, ty nám slouží pro zajištění bezpečnosti článku. Samotným způsobům zajištění bezpečnosti Li-ion akumulátorů se budu zabývat v samostatné kapitole. [1]

⁴ V současnosti nejvíce preferovaným materiálem pro anodu je Lithium Železo Fosfát (LiFePO_4), který může být navíc dopovaný vzácným prvkem Yttriem.

1.3.1.3 Princip činnosti

Li-ion akumulátory pracují na principu interkalačních reakcí lithiových iontů. Při této reakci se ionty lithia z elektrolytu ukládají do vnitřní struktury elektrodového materiálu, tedy do mezer daných krystalovou strukturou (obrázek č.12). Nutno podotknout, že tento proces je vratný.



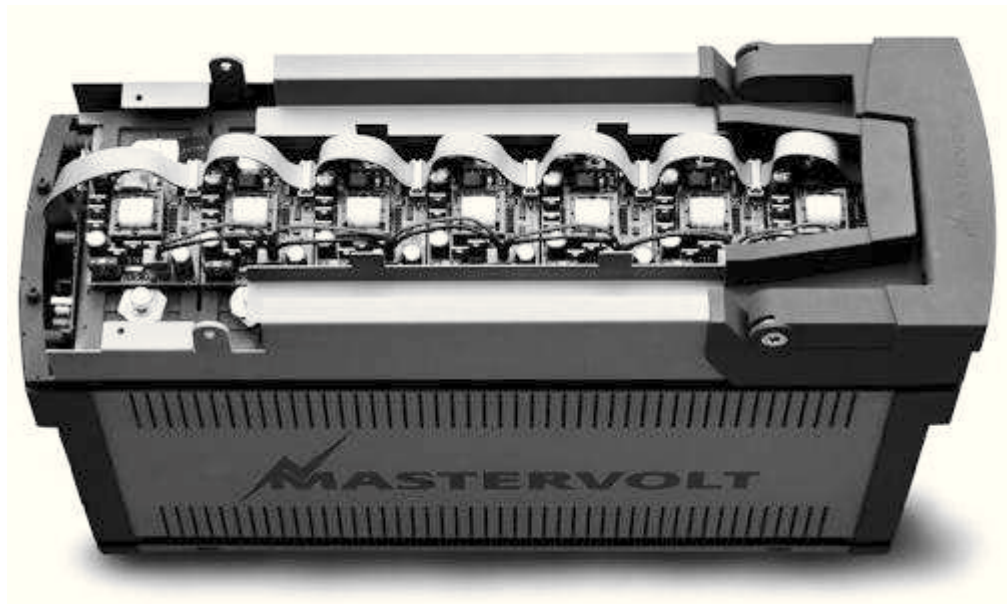
Obrázek 12: Schéma procesu interkalace iontů do krystalové struktury grafitu [35]

Z předešlého textu je tedy patrné, že anoda i katoda mají tzv. otevřenou strukturu. Vlivem působení napětí se ionty lithia přesouvají z jedné elektrody na druhou a opačně (obrázek č.9), přičemž jejich náboj je spjat s přesunem stejného množství elektronů ve vnějším obvodu. Díky tomuto principu a uspořádání nám vzniká jedna z výhod – v článku nám již nevznikají žádné vedlejší elektrochemické reakce, takže samovybití je zanedbatelné a prodlužuje se nám navíc životnost článku. [35]

1.3.1.4 Bezpečnost

Jelikož každý článek Li-ion obsahuje hned několik látek, které mají z hlediska možného vznícení různé vlastnosti, vzniká nám tím pádem jedna z nevýhod. Zabývejme se proto nyní bezpečností Li-ion akumulátorů. Oxidující látky z kladné elektrody nebo hořlavý elektrolyt a látky na elektrodě záporné, nás nutí u těchto článků použít několik typů ochran proti případnému vznícení. Zmíněné některé možné způsoby, kterými lze dosáhnout vznícení, či explozi akumulátoru, jsou například: přehřátí, vnitřní zkrat, nadměrné proudové zatížení při vybíjení a nabíjení, hluboké vybití, přetlak uvnitř akumulátoru a mechanické poškození. Jak tedy předcházíme katastrofickému požáru či výbuchu akumulátoru?

- **První (pasivní) ochranou** je dodržování předepsaných pracovních podmínek, zejména zvýšené pozornosti věnujeme nabíjení akumulátoru. Dále pak můžeme hovořit o umístování akumulátoru do předepsaných klimatických podmínek daných výrobcem a při sestavování článků do baterie se snažíme, aby se články z hlediska technických parametrů (kapacity) příliš nelišily.
- **Druhým typem pasivní ochrany** je snaha o vytvoření Lithio-iontové baterie s použitím takových materiálů, které jsou odolnější vůči vysokým teplotám a mají výrazně menší zápalnost. Tímto výzkumem se již delší dobu zabývají vědci na celém světě.
- Snad nejúčinnějším současným typem ochrany je **aktivní ochrana Li-ion akumulátoru**. Ta spočívá v tom, že u výkonové baterie musí každý jednotlivý článek obsahovat řídicí elektroniku (obrázek č.13), která v případě nežádoucí hodnoty (napětí, proud, vysoká teplota, zkrat) odpojí článek a propojí obvod místo něho zkratem. Tato elektronika se mimo jiné stará například o správné nabíjení akumulátoru a může nám hlásit i užitečné informace o akumulátoru (teplota). Jako negativum se nám po přidání takového ochranného obvodu zvýší vnitřní odpor akumulátoru. [35] [36]



Obrázek 13: Ochranné obvody u každého článku Li-ion akumulátoru od firmy Mastervolt [37]

1.3.1.5 Vlastnosti, použití

Jak už bylo zmíněno, právě lithiové akumulátory mají největší měrnou hustotu elektrické energie při velmi nízké hmotnosti. Tato největší výhoda není jediná, jelikož tento typ akumulátoru má bezesporu další výhody, díky kterým je značně na vzestupu. Samozřejmě má určité záporné vlastnosti, které jsou ale postupem času minimalizovány, a tak se tento typ akumulátoru řadí mezi nejpoužívanější.

Napětí jednoho článku je vysokých 3,6 V, to je rozhodně jedna z výhod. Další výhodou je dlouhá životnost, kde při předepsaném zacházení lze dosáhnout až 2000 cyklů. Oproti NiCd a NiMH akumulátorům je samovybíjení u Li-ion akumulátorů velmi nízké, pohybujeme se kolem 5% za jeden měsíc. Čím se tyto akumulátory mohou ještě nejvíce chlubit, je absence paměťového efektu. Li-ion články tedy nemusí podstoupit celý nabíjecí cyklus, ale můžeme je nabíjet dle naší potřeby a nemusíme se obávat zhoršení parametrů článku. Pokud se budeme dále zabývat negativy li-ion akumulátorů, tak je to především velmi rychlé stárnutí akumulátoru. Toto snižování kapacity za jednotku času při nezávislém používání je dané díky vnitřní konstrukci článku, kde kvůli vysoké reaktivnosti lithia se po nějaké době rozkládá článek sám od sebe. Na stárnutí článku má velký vliv okolní teplota, přesněji čím vyšší teplota, tím větší stárnutí článku. Li-ion akumulátory jsou navíc velmi citlivé, proto jednotlivé články akumulátoru musí mít stejné napětí, kdyby tomu tak nebylo, akumulátor by zdaleka nedosahoval předepsaného výkonu. K tomuto seřízení napětí u jednotlivých článků nám slouží pomocná elektronika v akumulátoru. Jako nebezpečnou nevýhodu uvedu, že Li-ion akumulátory při nesprávném zacházení mohou explodovat nebo začít hořet, ale díky ochranné elektronice toto riziko je sníženo na minimum.



Obrázek 14: Elektrický automobil Nissan Leaf, který používá akumulátor typu Li-ion (upraveno autorem) [38] [39]

Lithiové akumulátory jsou velmi náchylné na přebíjení a podvybíjení, proto musí akumulátor obsahovat řídicí elektronický obvod, který zajistí správný chod nabíjení a nedovolí především vyšší nabíjecí napětí než 4,2 V. Tento elektronický obvod nám taky zajišťuje, aby se při vybíjení nedostalo napětí pod dovolenou mez, kdyby se tak stalo, dochází ke zničení akumulátoru. Během vybíjení dochází rovněž k poklesu napětí, což je výhodné pro sledování zbytkové kapacity akumulátoru, ale při použití v zařízeních, kde potřebujeme stálý příkon, musí s klesajícím napětím vzrůstat vybíjecí proud.

Z předpokládaného vzrůstajícího zájmu o tento typ akumulátorů, se musí zajistit efektivní recyklace. Li-ion akumulátory nejsou tak snadno recyklovatelné, ale na druhou stranu obsahují látky, které nejsou tak agresivní k životnímu prostředí. Při recyklaci musí být akumulátor zcela vybit. Pokud by měl například článek jmenovitý výkon 600W, při 95% vybití by stále hrozil vznik požáru při zkratu. Proto podle legislativy jsou vybité baterie považovány za nebezpečný odpad.

Použití lithiových akumulátorů je v současnosti především u spotřební elektroniky, jako jsou notebooky, mobilní telefony, fotoaparáty atd. Setkáme se s nimi téměř na každém kroku. Vlivem vývoje se tyto akumulátory dostali do použití v automobilovém průmyslu (viz. obrázek č.13), kde zcela jednoznačně převládají. Cena lithiových akumulátorů je vyšší oproti jiným typům, to je odůvodněno především složitějším výrobním postupem a nutností několika senzorů a elektroniky, ale při rostoucí poptávce se předpokládá, že cena bude klesat. [40] [41] [35] [42]

Tabulka 4: Výhody a nevýhody Li-ion akumulátoru

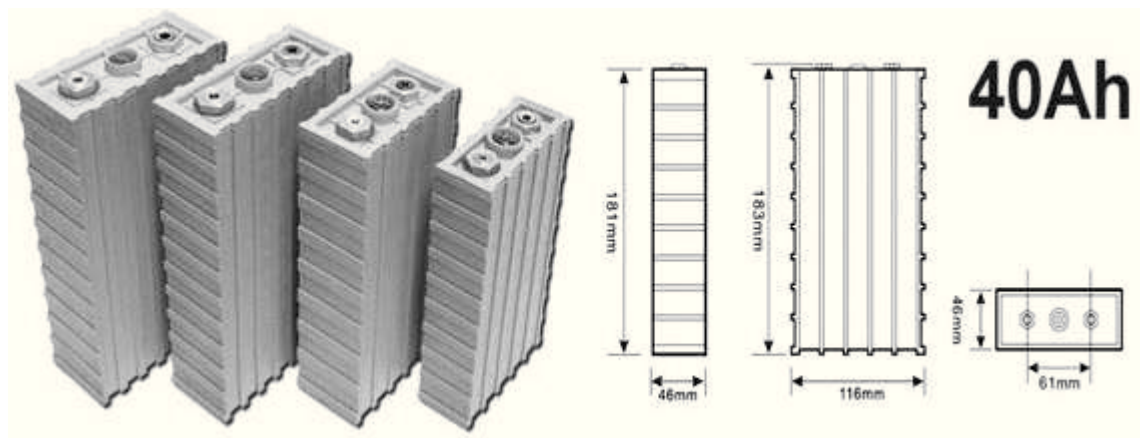
VÝHODY	NEVÝHODY
<ul style="list-style-type: none"> • Největší měrná hustota energie (200 - 300 Wh/kg) • Dostupnost surovin • Nízká hmotnost • Nemá paměťový efekt • Méně závadné pro životní prostředí • Nízké samovybíjení • Dobyty 80% kapacity do jedné hodiny 	<ul style="list-style-type: none"> • Stárnutí akumulátoru • U běžných typů velmi vysoký vnitřní odpor (až 10× větší než u NiCd nebo NiMH) • Nutnost použití ochranných obvodů, senzorů a pojistek • Cena • Riziko požáru, výbuchu

1.3.2 Lithium-železo-fosfátový akumulátor (LiFePO₄)

Tyto akumulátory jsou dalším evolučním stupněm Li-ion akumulátorů. Technologii LiFePO₄ vyvinul tým pod vedením profesora Johna Goodenougha z Texaské univerzity teprve v roce 1996.

Anoda je u tohoto akumulátoru tvořena ferrofosfátem lithia (LiFePO₄), vyznačujícím se větší stabilitou. Nejnovější úprava tohoto materiálu spočívá v náhradě malého množství atomů železa atomy vzácného prvku yttria (LiFeYPO₄). Materiál pro katodu a elektrolyt je stejný jako u Li-ion.

Oproti Li-ion akumulátorům se LiFePO₄ vyznačují nespornou řadou výhod. Mezi největší výhody patří schopnost dodávat vyšší proudy v širokém spektru okolních teplot a především vyšší bezpečnost. Nehrozí nám tedy, že by se akumulátor přehřál při dobíjení nebo při extrémních podmínkách začal chemicky reagovat, hořet nebo explodovat. Rovněž na rozdíl od Li-ion se na výrobu těchto akumulátorů nepoužívají vzácné kovy, a tak jsou velmi levné. Prakticky hlavními prvky jsou železo a fosfor. Z hlediska ekologie neobsahuje žádné toxické materiály, tudíž bezesporu další obrovská výhoda. Poslední důležitou výhodou je, že nemají rovněž paměťový efekt. Mezi nevýhody patří menší hustota energie a nižší napětí na článek (3,25V)



Obrázek 15: Články LiFeYPO₄, napětí 3.2V a nominální kapacita 40Ah [43]

LiFePO₄ jsou vylepšením dosavadních Li-ion akumulátorů, z hlediska použití jsou tedy lepší volbou, pokud nám nevádí výše zmíněné nevýhody. Tento typ akumulátoru byl již například použit v roce 2012 při letních olympijských hrách v Číně pro pohon tamních elektrických autobusů. [44] [45]

Tabulka 5: Výhody a nevýhody LiFePO_4 akumulátoru

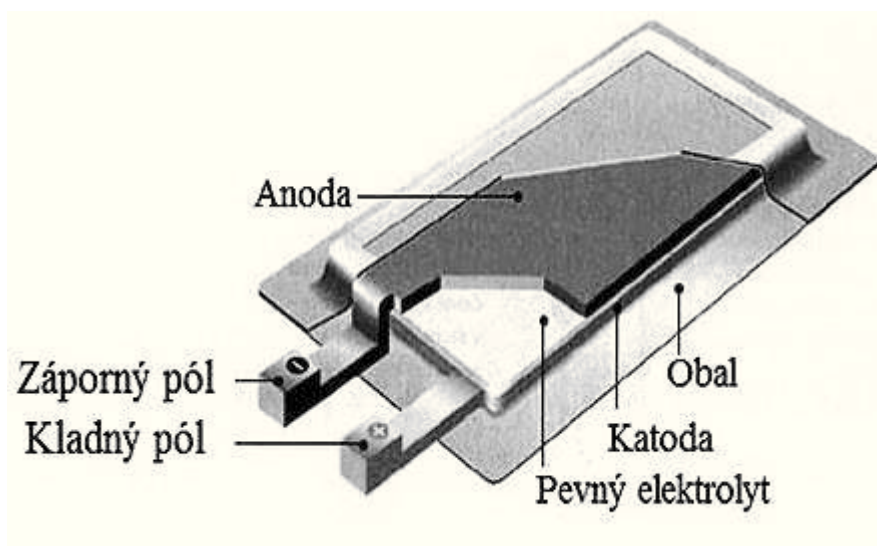
VÝHODY	NEVÝHODY
<ul style="list-style-type: none">• Cena• Zcela plochá křivka až do úplného vybití akumulátoru• Není toxický• Vysoký počet dobíjecích cyklů• Bezpečný• Vysoká životnost (10 let)• Schopnost dodávat vysoký proud při špičkových odběrech	<ul style="list-style-type: none">• Při rychlém dobíjení se nám snižuje životnost akumulátoru• Možné riziko předčasného selhání při větším množství hlubokých cyklů (vybití pod 33%)

1.3.3 Lithium-polymerový akumulátor (Li-Pol)

Tento typ je vyvinut z Lithium-iontových akumulátorů. Do jeho vývoje se investovaly nemalé prostředky, jelikož díky jeho vlastnostem se dá předpokládat značné využití v elektromobilech.

Největším rozdílem oproti Li-ion je použití pevného elektrolytu namísto kapalného. Takovýto elektrolyt nemůže vytéct a článek tudíž nepotřebuje žádný masivní ochranný obal. Nepotřebujeme ani obvyklý separát, jelikož odstup elektrod zajišťuje přímo pevný elektrolyt. Anoda a katoda můžou být ze stejného materiálu jako u Li-ion. Napětí článku je 3,6 V. Jednotlivé komponenty se pak vkládají na sebe (viz. obrázek č.16). Pro základní krytí článku stačí kovová fólie, ale při výkonově náročném nasazení už může být tepelná roztažnost materiálů natolik rozdílná, že hrozí roztržení, proto je nutné použít pevné obaly.

Jelikož Li-Pol je vlastně suchý článek, odpadá nám problém s nevhodným mísením tekuté složky, proto se může Li-Pol akumulátor tvarovat do libovolného vzhledu. Lze je rovněž vyrobít neuvěřitelně ploché (několik milimetrů)⁵. Výhodou oproti Li-ion akumulátorům je vyšší hustota energie při menší hmotnosti, tepelná odolnost, vyšší počet nabíjecí a vybíjecích cyklů. Nevýhodou pak může být nabíjení a vybíjení akumulátoru. Při nabíjení nesmí hodnota napětí překročit 4,2V na článek a při vybíjení akumulátoru je nutno ukončit při hodnotě 3V. Při nedodržení těchto hodnot by hrozilo zničení akumulátoru, proto musí akumulátor obsahovat logické obvody, aby se zabránilo případnému zničení.



Obrázek 16: Znárodnění konstrukce Li-Pol článku (upraveno autorem) [34]

⁵ Při plošší konstrukci je ochranný obvod umístěn separátně.

Do technologie Li-Pol byli vynaloženy nemalé prostředky, to se nyní projevuje na ceně. Složitější výroba a náročný vývoj se nyní musí nějakým způsobem zaplatit. To je hlavní důvod, proč Li-Pol akumulátor jednoznačně nezastoupil na trhu Li-ion akumulátory. V současné době se tento typ používá převážně u špičkovějšího spotřebního zboží, jako jsou například výrobky od firmy Apple. Nejvíce předpokládaným trhem pro tuto baterii je ovšem automobilový trh, kde díky konstrukčním vlastnostem může tato baterie elegantně kopírovat tvar karoserie a zabírat tak každé volné místo na elektromobilu. V současnosti používá Li-Pol akumulátor firma Hyundai ve svém modelu i10, zatím ovšem není uveden na trh. Elektromobil od Hyundai nebude sice disponovat Li-Pol akumulátory, které jsou připevněny na karosérii, ale díky menší prostorové náročnosti Li-Pol článků se ušetří spousta místa. [46] [47] [1] [48]

Tabulka 6: Výhody a nevýhody Li-Pol akumulátoru

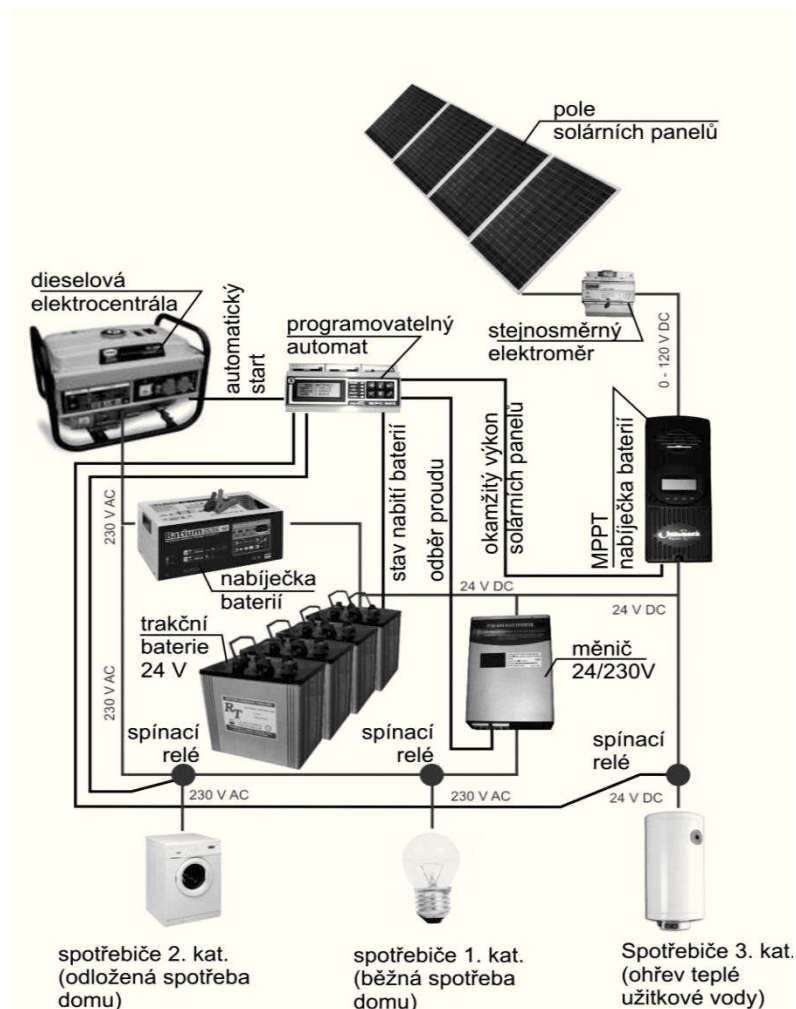
VÝHODY	NEVÝHODY
<ul style="list-style-type: none"> • Možnost konstrukce do různých tvarů • Extrémně tenký • Vyšší hustota elektrické energie, při menší hmotnosti, oproti Li-ion 	<ul style="list-style-type: none"> • Cena • Díky pevně stanoveným mezím pro nabíjení a vybíjení musí obsahovat logický obvod

2. NEJVHODNĚJŠÍ AKUMULÁTORY PRO STACIONÁRNÍ AKUMULAČNÍ STANICI, ELEKTROMOBIL A AKUMULÁTOROVOU LOKOMOTIVU

V druhém bodě bakalářské práce bude proveden výběr vhodného typu akumulátoru pro stacionární akumulaci stanici, elektromobil a akumulátorovou lokomotivu. Výběr bude proveden podle žadáných požadavků jednotlivých aplikací a vlastností akumulátoru.

2.1 STACIONÁRNÍ AKUMULAČNÍ STANICE

Jedná se o systém, ve kterém nám akumulátor slouží jako zdroj elektrické energie. Tento akumulátor je ve zvolené aplikaci zcela klíčový prvek, proto výběr akumulátoru ovlivní například chování, životnost a další investice do obnovy akumulaci stanici. Určitou akumulaci stanici může být například ostrovní systém s akumulací elektrické energie.



Obrázek 17: Zjednodušené schéma ostrovní elektrárny [49]

Pojem ostrovní systém se v posledních letech stává stále vyhledávanějším díky značné nezávislosti a především možností využívat svoji elektřinu téměř zadarmo. Ostrovní systém připadá v úvahu například pro odlehlé chalupy, jachty, karavany a v poslední době také u rodinných domů, prostě všude tam, kde požadujeme komfort domova v podobě elektřiny a nemáme přístup k elektrickému vedení nebo se nechceme připojit k distribuci elektrické energie. U ostrovního systému nám akumulátor slouží jako akumulční zdroj energie, který se v případě přebytků energie nabíjí a v případě nedostatku energii poskytuje. Jako dobíjecí element se používají především solární panely popř. elektrocentrála na fosilní paliva. Pro lepší pochopení principu ostrovního systému slouží obsáhlejší obrázek č.17. Takovýto systém obsahuje samozřejmě, kromě výše zmíněných komponentů, další neméně důležité a potřebné komponenty, které ovšem nejsou předmětem této bakalářské práce, proto se jimi nebude zabývat.

Kromě ostrovního systému může být stacionární akumulční stanice rovněž použita například v nemocnicích, elektrárnách, divadlech a dalších aplikacích, kde vyžadujeme záložní zdroj napájení. V těchto aplikacích vyžadujeme, aby akumulátor byl připravený v případě výpadku dodat elektrickou energii, proto je tento akumulátor neustále nabíjen malým konstantním proudem.

2.1.1 Požadavky na akumulátor

Požadavky, které jsou kladeny na akumulátor ve stacionární akumulční stanici, se mohou dle aplikace lišit. Jde například o použití jako zálohovací akumulční stanice, nebo naopak jako akumulátor pro použití u fotovoltaických panelů. Každá aplikace vyžaduje určité vlastnosti, a proto se může v závěru typ akumulátoru u takovýchto jednotlivých aplikací lišit. Obecné požadavky, které jsou kladeny na akumulátor:

- **Vysoká cyklická odolnost a životnost**
- **Velmi malé samovybíjení, v ideálním případě žádné**
- **Nízká cena**
- **Žádný paměťový efekt**
- **Bezpečnost**
- **Velká kapacita**
- **Schopnost akumulátoru dodávat konstantní proud po co nejdelší dobu**
- **Nízký minimální nabíjecí proud**
- **Minimální nároky na údržbu**
- **Vyšší odolnost vůči hlubokému vybití**

2.1.2 Výběr akumulátoru

Z výše uvedených požadavků bude nyní proveden výběr nejvhodnějšího typu akumulátoru pro stacionární akumulární stanici. K nápomoci bude přehled akumulátorů z první kapitoly.

- Jako první připadá v úvahu klasický **olověný akumulátor**. Tento typ patří v současnosti mezi nejpoužívanější. Důvod je jednoduchý, největší výhodou tohoto akumulátoru je totiž cena a léty prověřená technologie. Navíc bezpečnost akumulátorů je na vysoké úrovni, pokud například použijeme bezúdržbové ventilem řízené akumulátory VRLA, nehrozí nám při špatné manipulaci únik elektrolytu a navíc je vybaven efektivní rekombinací plynů. Pokud se zaměříme na další vlastnosti akumulátoru, zjistíme, že obrovskou nevýhodou je malý počet dobíjecích cyklů a velmi malá hustota energie na kilogram. Nevýhodou v některých aplikacích může být vyšší hmotnost, rozměry, a pokud budeme mít například akumulátor v obytném domě, také možné unikající plyny během nabíjení.
- **Akumulátory na bázi niklu** nejsou zcela vhodnou volbou, a tudíž se pro tuto aplikaci nepoužívají, nebo jen velmi málo. Použití připadá v úvahu v extrémně klimatickém prostředí, kde by akumulátory NiCd s přehledem plnili svoji funkci.
- **Lithiové akumulátory**, konkrétně LiFePO_4 mají pro použití v akumulární stanici nejlepší vlastnosti. Nevýhodou je nutnost balancování jednotlivých článků. K tomuto účelu se proto prodávají speciální komponenty, tzv. balancéry. Tyto balancéry nejsou ovšem stavěny na moc velké proudy, to tedy omezuje nabíjecí proud a prodlužuje se čas do plného nabití a také se velmi snižuje účinnost. Určitým řešením tohoto problému je dobíjet jednotlivé články zvlášť. Regulátor s výstupem pro více článků nebo regulátor pro každý článek zvlášť. Toto by byla asi nejlepší varianta z hlediska účinnosti a rychlosti nabití, ale na druhou stranu nejdražší. Ostatně cena lithiových akumulátorů je v porovnání s olověnými podstatně vyšší. Když ovšem budeme uvažovat 15-ti letou životnost akumulátoru, zjistíme, že nejpозději do 4 let se nám pořizovací cena za LiFePO_4 vrátí.

Závěrem tedy můžeme říci, že výběr vhodného akumulátoru závisí na řadě parametrů (teplota prostředí, proudové špičky atd.), tudíž nelze s určitostí říci, který akumulátor se nejvíce hodí pro akumulární stanici. Olověný akumulátor je v současné době nejvíce používaným díky dlouhému zdokonalování a především ceně se bude určitě nějakou dobu nadále používat. Lithiové akumulátory se ovšem teprve uchycují na trhu a nebyt vyšší ceny, tak jsou jednoznačnou volbou pro stacionární akumulární stanice. **Proto se jako nejvhodnější akumulátor pro stacionární akumulární stanici jeví právě LiFePO_4 akumulátor.** [50] [51]

2.2 ELEKTROMOBIL

Ropy je na světě pouze omezené množství, z toho důvodu je potřeba hledat náhrady pro pohon automobilů. Jednou z takových může být například elektrická energie.

Elektromobil je vozidlo, které tedy využívá k pohybu elektromotor namísto klasického spalovacího motoru. Výhody elektromobilu těží především z výhod elektromotoru, jakými jsou zejména spolehlivost, životnost, velká účinnost a díky provozu na elektřinu především nízké provozní náklady (tabulka č.7). Určitou výhodou je, také díky použití elektromotoru, možnost rekuperace elektrické energie⁶. Nevýhodami elektromobilu jsou vyšší pořizovací cena, omezený dojezd a v České republice málo dobíjecích míst. Většina nevýhod je dána možnostmi akumulátoru, je tedy logické, že nejdůležitějším prvkem pro elektromobily je akumulátor. Parametry a cena akumulátorů jsou v současné době jedinou limitující součástí elektromobilu, aby plně mohl nahradit klasické spalovací automobily.

Tabulka 7: Srovnání provozních nákladů [52]

ORIENTAČNÍ SROVNÁNÍ CENY ELEKTRICKÉ ENERGIE A BENZÍNU		
Typ vozidla	Elektromobil	Automobil
Spotřeba na 100 km	15 kWh (elektrické energie)	8 litrů (benzínu Natural 95)
Průměrná cena za jednotku	4,54 Kč/kWh	35 Kč/l
Cena na 100 km	68 Kč	280 Kč

Akumulátory zatím nemohou stačit na měrnou kapacitu benzínu, která je 11 kWh/kg, přičemž například lithiový akumulátor obsahuje „pouze“ 200 Wh/kg. Je tedy snahou vědců stále vyvíjet lepší akumulátory, které by se mohli vyrovnat benzínu. [52] [53]

2.2.1 Požadavky na akumulátor

Vhodný výběr akumulátoru se odvíjí od požadavků, které jsou kladeny pro použití v elektromobilech. Jsou jimi v ideálním případě:

- **Velká kapacita (Ah/kg) a výkon (kW/kg)** – je pochopitelné, že s elektromobilem budeme chtít ujet minimálně 100 km na jedno nabití, proto potřebujeme co největší kapacitu. Rovněž požadujeme po akumulátoru, aby svým výkonem dostatečně pokryl špičkový výkon vozidla, který vzniká při jeho akceleraci.

⁶ Rekuperace je proces přeměny kinetické energie zpět na využitelnou elektrickou energii při elektrodynamickém brzdění. Tato vlastnost je dána elektrickým motorem, který může pracovat jako generátor elektrické energie.

- **Bezpečnost** – na tento požadavek je kladen velmi velký důraz. Při autonehodě by například, při použití Li-ion akumulátoru, mohlo auto zažít okamžitě hořet. Akumulátor by měl být taky například odolný vůči zkratům.
- **Velká životnost a počet pracovních cyklů** – dnešní akumulátory použité v elektromobilech mají životnost zhruba 10 let. Délka životnosti závisí především na druhu baterie a intenzitě používání. Tato doba je poměrně malá, a jelikož cena akumulátoru tvoří velkou část pořizovací ceny elektromobilu, nevyplatí se proto po uplynutí této doby pořízení nového akumulátoru.
- **Minimální samovybíjení** – požadujeme po elektromobilu, aby se vlivem samovybíjením akumulátoru, například nevybil elektromobil přes noc v garáži.
- **Odolnost proti extrémním vlivům prostředí** – tento parametr přímo souvisí s bezpečností. Ideální akumulátor by měl být odolný a neměly by se měnit parametry při extrémních teplotách, vibracích a zvýšené vlhkosti.
- **Dostupnost materiálů, cena, recyklace** – pro masové rozšíření elektromobilů je klíčové, aby cena akumulátorů byla co nejmenší a hlavně, aby je bylo z čeho vyrábět. Samozřejmostí jsou i politické aspekty. Je nutné také vymyslet účinnou infrastrukturu hromadné recyklace akumulátorů.
- **Žádný paměťový efekt** – je pochopitelné, že pokud by akumulátor v elektromobilu měl paměťový efekt, jeho použití by bylo značně omezené.
- **Nízká hmotnost a malá rozměry** – Velikost akumulátoru by měla být přímo úměrná energetické spotřebě vozidla. Určit optimální velikost akumulátoru do elektromobilu je poměrně složité. [27]

2.2.2 Výběr akumulátoru

Z požadavků, které jsou kladeny na akumulátor v elektromobilu, bude nyní proveden výběr nejvhodnějšího akumulátoru pro použití v elektromobilu. K vhodnému výběru rovněž poslouží seznam akumulátorů z první kapitoly.

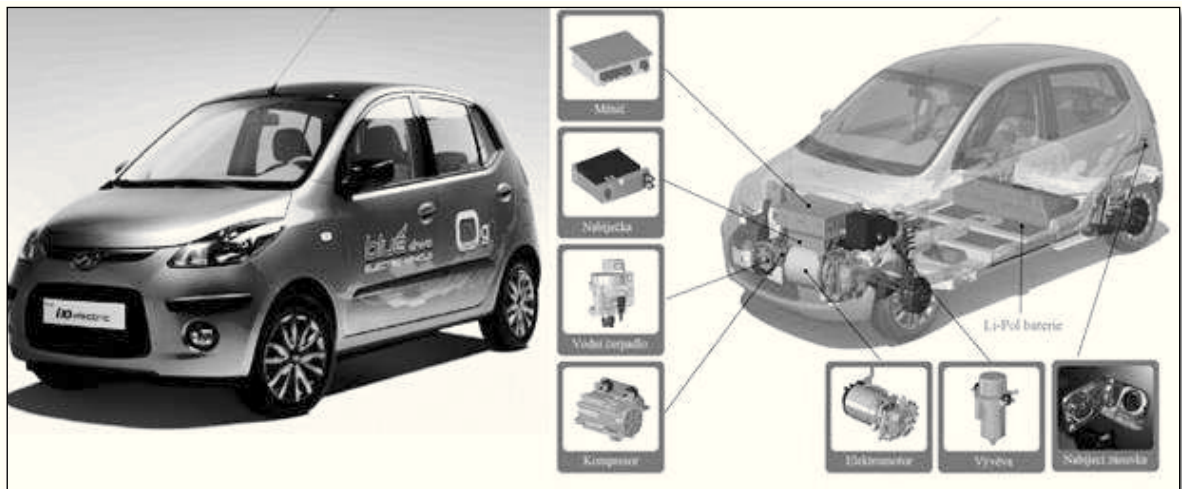
- **Olověný akumulátor** je pro použití v elektromobilu absolutně nevhodný! Toto je zapříčiněno především velmi malou hustotou energie na kilogram. Navíc olověný akumulátor má velmi vysokou hmotnost a malý počet dobíjecích cyklů.

- **Niklové akumulátory**, konkrétně NiMH se z hlediska vlastností rovněž příliš nehodí pro použití v elektromobilu. Jejich nevýhody nejsou tak razantní jako u olovených akumulátorů, ale jejich hustota energie je rovněž nedostatečná pro dostačující provoz elektromobilu. Přesto některé elektromobily měli tento typ akumulátoru, ale postupně se od nich upustilo. Rovněž japonská automobilka Toyota montuje tyto akumulátory do svého nejznámějšího hybridního automobilu na světě Toyota Prius. NiMH akumulátory mají totiž dobré parametry v oblasti vybíjení, dobíjení a jsou levné, proto se můžou jevit jako dobrá volba do hybridních automobilů. Nejnovější model této japonské automobilky Toyota Prius plug-in už ovšem využívá novější Li-ion akumulátor pro hybridní pohon.
- **Lithiové akumulátory** jsou v současné době svými parametry nejlepší volbou pro použití do elektromobilu. Mají ze všech možných akumulátorů největší hustotu energie, jsou lehké, dají se rychle nabít do určité kapacity, neustále se vyvíjí, nemají paměťový efekt a žádné samovybíjení. Automobilové firmy na celém světě proto jednoznačně montují do svých elektromobilů právě lithiové akumulátory. Nevýhoda je zde v podobě bezpečnosti. Při použití Li-ion článků nám totiž hrozí možnost požáru či výbuchu, ať už při případné havárii elektromobilu, vlivem špatného nabíjení, zkratu apod. Kvůli tomu je každý článek chráněn ochrannými obvody, články jsou v nehořlavém boxu a jsou opatřeny mnoho dalšími snímači, čidly, ochrannými pasivními i aktivními prvky. Negativem je taky životnost akumulátoru, která je přibližně 10 let. Kvůli lepším vlastnostem, především pak kvůli větší bezpečnosti, používají výrobci aut převážněji LiFePO_4 popř. LiFeYPO_4 akumulátory. Nejnovější modely automobilů, především pak od japonských firem, používají nejnovější Li-Pol akumulátory, které se vyznačují ještě vyšší hustotou energie a menšími rozměry oproti klasickým Li-ion a jsou navíc velmi bezpečné. Li-Pol baterie jsou například v elektromobilu Hyundai i10 – BlueOn (obrázek č.18).

Díky přesným požadavkům se dá zcela jednoznačně říci, že v současné době nejvhodnějším typem akumulátoru, z hlediska vlastností, do elektromobilu jsou Li-ion, LiFePO_4 , LiFeYPO_4 , Li-Pol akumulátory. Každý výrobce automobilu pak preferuje určitý typ, který používá do svých automobilů. K masovému růstu elektromobilů má podle odborníků teprve přijít. Dá se tak očekávat až cena baterií vlivem vyšší poptávky značně klesne a zvýší se dojezd elektromobilu. K trakčnímu akumulátoru se v současné době do elektromobilu přidávají tzv. Ultrakapacitory⁷. Jejich opodstatnění je především možnost snáze pokrýt výkonové špičky, které vznikají při prudkém přidání plynu. Na závěr je důležité zmínit, že do vývoje elektromobilů se mnoho investuje, a tak jde vývoj současných elektromobilů a hlavně akumulátorů do nich neustále

⁷ Ultrakapacitor je vlastně dvouvrstvý elektrochemický kondenzátor s velmi vysokou energetickou hustotou. Je schopný na krátký čas uchovat velmi velké množství energie a navíc se rychle dobíjet i nabíjet.

dopředu. Je potřeba vyřešit spoustu problémů, ať už jde o rychlost nabíjení, vzdálenost dojezdu atd. Z hlediska vývoje baterií je velmi perspektivním typem například Li-air (Lithium-vzduch). Tato baterie obsahuje vzdušný kyslík jako materiál kladné elektrody, a tím se nezvyšuje hmotnost článku. Teoreticky by také mohly mít až neuvěřitelných až 10 000 Wh/kg! Jsou zde ovšem problémy, které se vědci snaží vyřešit, aby se mohly Li-air baterie začít používat v elektromobilech a nejen v nich. Jde například o reakci lithia s vodními parami obsaženými ve vzduchu a krátkou životnost baterie. O tomto typu baterií určitě ještě v budoucnosti uslyšíme, ale prozatím s ním nemůžeme počítat jako s nejvhodnějším akumulátorem pro elektromobil. [35]



Obrázek 18: Hyundai i10 electric BleuOn a jeho zjednodušená konstrukce (upraveno autorem) [54]
[55]

2.3 AKUMULÁTOROVÁ LOKOMOTIVA

Železniční doprava bývá, již dlouhou dobu, obecně pokládána za šetrnou k životnímu prostředí. Přesto je ale velké procento lokomotiv stále poháněno pomocí fosilních paliv. Tento fakt je především zapříčiněným tím, že železniční sítě elektrického vedení nejsou pokryta všechna místa vlakové infrastruktury. Určitým řešením pohonu lokomotivy v místech, kde chybí elektrické vedení, může proto být lokomotiva, která využívá ke svému pohonu elektrickou energii uloženou v akumulátorech. Provoz takovýchto lokomotiv je zcela jistě nejen ekologický, ale navíc i finančně výhodnější pro provozovatele oproti klasické lokomotivě na fosilní paliva. V poslední době se již můžeme setkávat s určitým typem elektrické lokomotivy, který představuje tzv. hybridní lokomotiva. Tato lokomotiva má



Obrázek 19: Akumulátorová lokomotiva 710.201- (A 314) [73]

klasický pohon na fosilní palivo, ale obsahuje navíc akumulátor, do kterého se zachytává a ukládá energie. Zachytávání a ukládání energie do akumulátoru může mít mnoho způsobů řešení. Například americká společnost GE Transportation vyvinula lokomotivu, která dokáže účinně recyklovat tepelnou energii a následně ji ukládat do akumulátorů. Dalším řešením může být zachytávání a ukládání energie, jež vzniká při brzdění nebo při průjezdech zatáčkami. Hybridní lokomotiva může nacházet své uplatnění například v dalekých horských oblastech, kde není zajištěna elektrifikace kolejí.

Klasická elektrická lokomotiva může být napájena buď z vnějšího zdroje, nebo akumulátoru. Většina elektrických lokomotiv, které jsou napájeny z elektrického vedení, využívá akumulátory pro napájení palubní sítě, tudíž neslouží pro pohon, ale existuje i několik lokomotiv, které mají akumulátory pro pohon v případě odpojení od elektrické sítě. Lokomotiva, která pro svůj pohon používá čistě energii uloženou v akumulátorech, působí především jako posunovací průmyslová lokomotiva, například ve výrobních závodech na převoz surovin. Tady se používá z důvodů snížení provozních nákladů, ekologie provozu a snadné obsluhy. Použití klasické motorové posunovací lokomotivy je totiž značně neefektivní, jelikož lokomotiva při delším prostoji spotřebovává palivo a navíc využíváme pouze nepatrný zlomek z celkového možného výkonu motoru. Akumulátorová posunovací lokomotiva je například model 710.201-5 - A 314 (obrázek č. 19) od firmy Arrow line, a.s. Pokročilejším modelem je A415 Lok4Envi, na vývoji této lokomotivy se mimo jiné podíleli i odborníci z Vysoké školy báňské – technické univerzity Ostrava. V této části bakalářské práce

bude řešen problém výběru vhodného akumulátoru pouze pro akumulátorovou posunovací lokomotivu. [56] [57]

Důležitou vlastností, kterou využívají kolejová vozidla, je pojem rekuperace energie, jelikož jízdní odpory ocel po oceli jsou velmi malé. O jízdních odporech týkajících se kolejových vozidel pojedná kapitola číslo tři.

2.3.1 Požadavky na akumulátor

Hlavními požadavky kladené na akumulátor v posunovací lokomotivě jsou:

- **Velký výkon (kW/kg)**
- **Bezpečnost**
- **Odolnost proti extrémním vlivům prostředí**
- **Velká životnost a počet pracovních cyklů**
- **Žádný paměťový efekt**
- **Minimální samovybíjení**
- **Cena**

2.3.2 Výběr akumulátoru

Nyní bude proveden výběr nejvhodnějšího akumulátoru pro akumulátorovou posunovací lokomotivu. K vhodnému výběru poslouží seznam akumulátorů z první kapitoly.

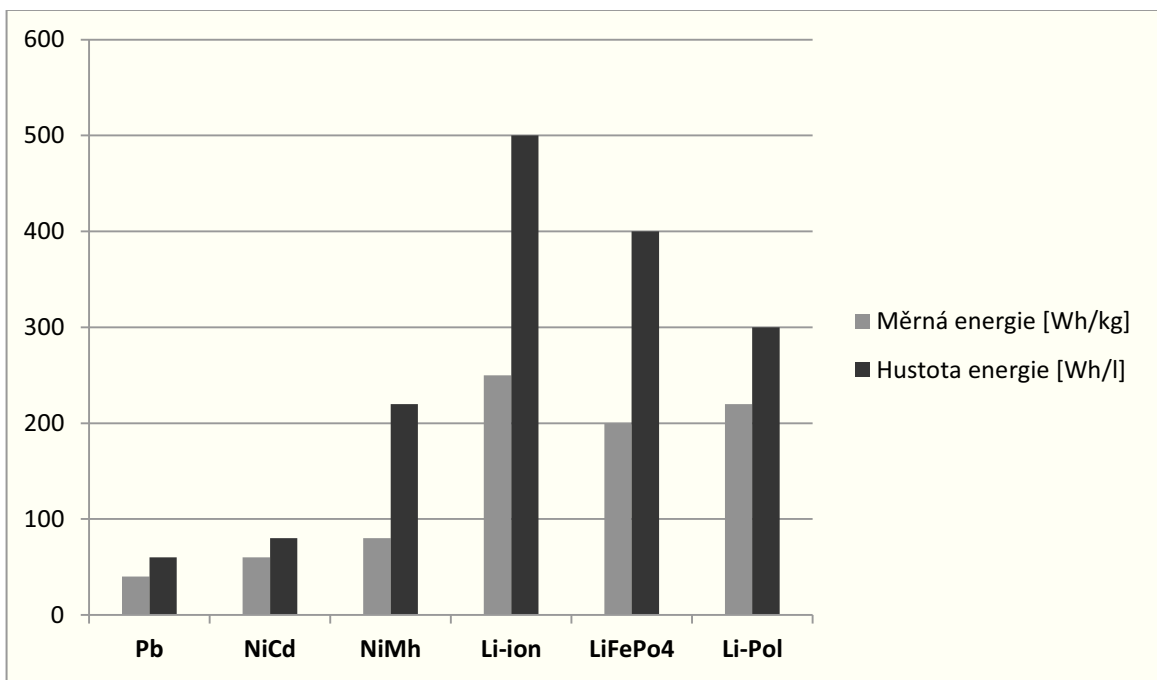
- **Olověný akumulátor** je zcela dominantní volbou pro akumulátorovou lokomotivu. Mnoho let vývoje a zdokonalování umožnily využít právě tento akumulátor. Olověný trakční akumulátor je velmi tvrdý zdroj elektrické energie, který umožňuje krátkodobě dodávat několikanásobky nominálního proudu. Velmi velkou výhodou je především rovněž cena. Nevýhodou, kterou představují olověné akumulátory – vysoká hmotnost a velké rozměry nám u posunovací lokomotivy nevadí. Posunovací lokomotiva využívá právě vyšší váhu baterie k adhezi (nedochází k prokluzu hnacích kol) a větší rozměry akumulátorů nemusíme řešit, jelikož místa pro uskladnění máme dostatek. Nízká kapacita olověných akumulátorů je na zvažení. Díky nižší kapacitě akumulátoru se nám zmenší dojezd a budeme muset akumulátor častěji dobíjet, ale jelikož se bavíme o posunovací lokomotivě, která nám slouží pouze např. pro převoz surovin z jedné výrobní haly firmy do druhé, jsme ochotni toto negativum akceptovat. Akumulátor je samozřejmě chráněn proti hlubokému vybití elektronickým zařízením.

- **Niklové akumulátory**, konkrétně Nikl-kadmiový akumulátor je spolu s olověným akumulátorem dalším akumulátorem, který se používá v akumulátorových posunovacích lokomotivách. Jeho mechanická odolnost a extrémní odolnost vůči vlivům prostředí dává možnost využití například pro výbušná prostředí či důlní aplikace. Ovšem díky nevýhodám v podobě paměťového efektu, vysoké ceně a především použití kadmia v akumulátoru, se tento akumulátor používá již minimálně. Nikl-metal hydridový akumulátor se díky vysoké ceně rovněž nehodí pro posunovací akumulátorovou lokomotivu.
- **Lithiové akumulátory**. Jelikož nepožadujeme až tak velké energetické hustoty akumulátorů, je použití lithiových akumulátorů nadbytečné. Dá se ovšem předpokládat, že postupem času lithiové akumulátory vystrnadí olověné akumulátory i z tohoto odvětví. Současným problémem může být například vyšší cena oproti olověným akumulátorům. Pokud bychom nebrali v úvahu cenu akumulátoru, bylo by nejlepší volbou pro akumulátorovou posuvnou lokomotivu použití LiFePO_4 , popř. LiFeYPO_4 akumulátorů.

Podle předešlého rozboru a požadavků lze říci, že **pro akumulátorovou posunovací lokomotivu je nejvhodnější olověný akumulátor**. To je zapříčiněno především cenou tohoto akumulátoru a vnitřní strukturou akumulátoru. Nejlepším řešením pro akumulátorovou posunovací lokomotivu by byla kombinace použití olověného akumulátoru a superkapacitoru, který by byl schopen akumulovat energii ve výkonových špičkách. [58] [59]

2.4 Celkové zhodnocení akumulátorů

Ve druhé kapitole bakalářské práce bylo ověřeno, že každý typ akumulátoru se hodí pro jiné aplikace. Jejich odlišné vlastnosti vyzdvihují určité typy do konkrétních aplikací a především za jakou cenu požadujeme akumulátor. Zpočátku se může zdát, že nasazení novějších technologií akumulátorů může být lepší volbou než léty prověřené a osvědčené akumulátory. Toto tvrzení nemusí být v současné době zcela pravdivé, avšak díky neustálému vývoji lithiových akumulátorů se možná za pár let dočkáme převládajícího zastoupení tohoto typu a ústup ostatních typů akumulátorů.



Obrázek 20: Energetická hustota akumulátorů (upraveno autorem) [35]

3. NÁVRH AKUMULÁTOROVÉ BATERIE PRO ZVOLENOU APLIKACI

V posledním třetím bodě této bakalářské práce bude proveden výpočet akumulátorů pro tři předešlé aplikace, aby co nejlépe plnily svoji funkci, především pak z pohledu kapacity akumulátoru.

3.1 STACIONÁRNÍ AKUMULAČNÍ STANICE

V tomto bodě bude proveden návrh akumulátoru pro fotovoltaickou ostrovní elektrárnu v rodinném domě (obrázek č.21). Požadujeme, aby tento akumulátor byl schopen pokrýt celkovou vypočítanou spotřebu včetně ztrát po dobu jednoho dne, přičemž v tu dobu uvažujeme nulovou dodávku energie z distribuční sítě a solárních panelů, tzv. autonomní den.

Nejprve, pro správné dimenzování akumulátoru, je potřeba propočítat kolik energie bude pro dané spotřebiče potřeba. Zajímá nás tedy, kolik máme spotřebičů, jaká je jejich spotřeba elektrické energie a kolik hodin denně je používáme.

$$\text{Spotřeba energie} = \text{příkon} \cdot \text{doba provozu} \quad \left[\frac{Wh}{d}, W, \frac{h}{d} \right]$$

Tabulka 8: Průměrná spotřeba rodinného domu

SPOTŘEBIČ	MNOŽSTVÍ	DOBA PROVOZU ZA DEN [H]	PŘÍKON SPOTŘEBIČE [W]	SPOTŘEBOVANÁ ENERGIE ZA DEN [WH/D]
Počítač	1	4	200	800
Pračka	1	2	800	1600
Chladnička	1	24	50	1200
Žárovka	5	3	60	900
Pečící trouba	1	0,5	2000	1000
Televize	1	5	100	500
Rychlovarná konvice	1	0,5	1500	750
Myčka	1	1	1300	1300
Vysavač	1	0,5	1500	750
Mikrovlnná trouba	1	0,5	800	400
Rádio	1	3	80	240
Celková energie spotřebovaná za den je 9440 Wh				

V tabulce č.8⁸ jsou uvedeny příklady spotřebičů a jejich spotřeba energie, následně je vypočítána celková spotřeba za jeden den.

Nyní můžeme spočítat množství energie, které potřebujeme pro celkové pokrytí spotřebičů. Na začátku je uvedeno, že vyžadujeme, aby akumulátor pokryl celkově jeden den bez dodávky elektrického proudu, proto je doplněn jeden den.

$$\text{Potřebné množství energie} = \text{počet dnů} \cdot \text{celková denní spotřeba} \quad [Wh, -, Wh]$$

$$\text{Potřebné množství energie} = 1 \cdot 9440 = 9440Wh$$

Následně potřebujeme převést Watthodiny na Ampérhodiny, jelikož je v nich udávána kapacita akumulátorů. K tomu nám stačí, když pouze elektrickou energii podělíme napětím systému. Napětí systému je 12 V, vyjde:

$$\text{Potřebné množství energie} = \frac{\text{potřebné množství energie}}{\text{napětí systému}} \quad [Ah, Wh, V]$$

$$\text{Potřebné množství energie} = \frac{9440}{12} = 786,666 Ah$$

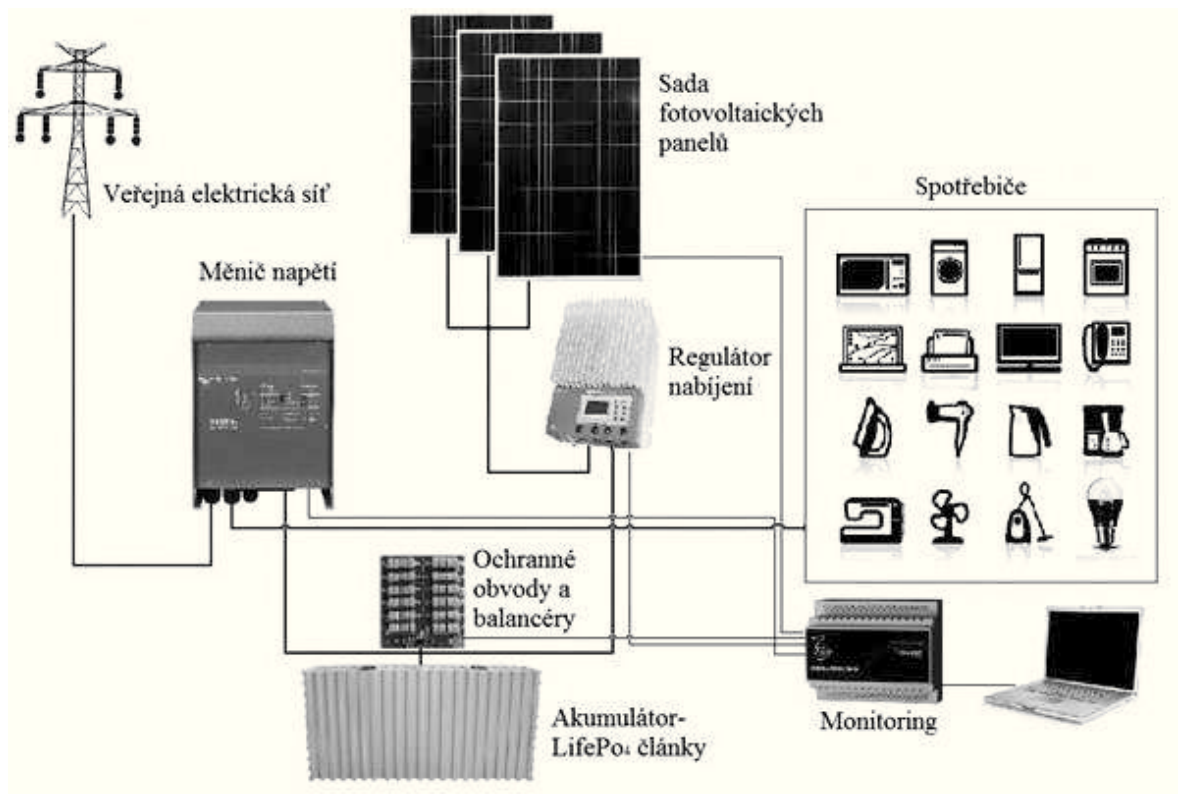
Dostali jsme hodnotu spotřebovaných ampérhodin během dne – 786,666 Ah. Nyní musíme ještě započítat skutečnou využitelnou kapacitu akumulátoru, tedy maximální hloubku vybití akumulátoru v procentech. Při použití LiFePO₄ článků je určena hloubka vybití na 80%, tím bychom měli plně docílit životnosti akumulátoru danou výrobcem.

$$\text{Potřebná kapacita akumulátoru} = \frac{\text{spotřeba Ah/den}}{\text{hloubka vybití akumulátoru}} \quad [Ah, Ah, V]$$

$$\text{Potřebná kapacita akumulátoru} = \frac{786,666}{0,8} = 983,332Ah$$

Potřebnými výpočty bylo zjištěno, že minimální kapacita akumulátoru pro použití v rodinném domě s ostrovním systémem a fotovoltaickými panely je 983,332 Ah.

⁸ V tabulce č.8 jsou uvedeny jen nejčastější spotřebiče v domácnosti a jejich časové použití je pouze orientační.



Obrázek 21: Zjednodušené schéma fotovoltaického ostrovního systému s možností dodávky elektrické energie z veřejné sítě (upraveno autorem) [60]

Velikost kapacity akumulátoru má rovněž také vliv na nejvyšší možný proud, který je schopen akumulátor dodat. Abychom získali potřebnou kapacitu, je možné spojovat akumulátory do série paralelně nebo sérioparalelně. Pokud spojíme akumulátory do série, získáme vyšší napětí. Naopak pokud akumulátory spojíme paralelně, získáme vyšší proud. U ostrovního systému se akumulátory obvykle řadí paralelně. Paralelní řazení akumulátorů se provádí pouze za použití všech stejných akumulátorů. Akumulátory tedy musí mít stejnou kapacitu, musí být stejného typu, od jednotného výrobce a stejné výrobní série. Pokud bychom tato kritéria nedodrželi, akumulátory by se navzájem ovlivňovaly a ve výsledku bychom nedosáhli potřebné kapacity a zbytečně zkracovali životnost akumulátorů.

Na závěr je důležité zmínit, že tato kapitola se věnuje pouze vhodnému návrhu akumulátoru. Fotovoltaický ostrovní systém se skládá z mnoha komponentů, které mají na akumulátor značný vliv, jde například o měnič napětí, díky kterému se nám zvýší celková spotřeba energie. Vhodným návrhem ostatních komponentů se tato bakalářská práce nezabývá. [61] [62]

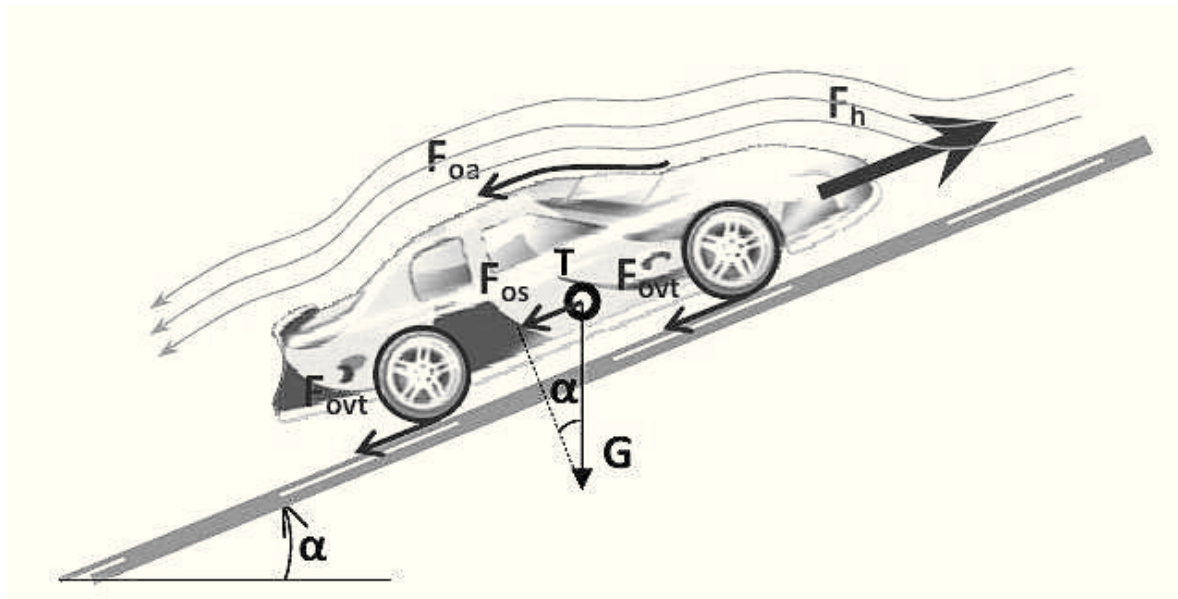
3.2 ELEKTROMOBIL

V kapitole 2.2 bylo určeno podle kritérií, že nejvhodnějším typem akumulátoru do elektromobilu je LiFePO_4 . Tato kapitola se bude zabývat určením vhodných parametrů tohoto akumulátoru, aby co nejlépe plnil svoji funkci v elektromobilu. Klíčové hodnoty potřebné k výpočtu, jako je třeba dojezd elektromobilu, budou zvoleny tak, aby co nejlépe vyhovovaly běžnému uživateli elektromobilu, přičemž bude uvažováno s reálnými možnostmi dané konstrukcí elektromobilu a vlastností akumulátoru.

3.2.1 Fyzikální rozbor

Síla, která nám pohání vozidlo F_h , musí překonat následující jízdní odpory:

- Aerodynamický odpor - F_{oa}
- Odpor stoupání - F_{os}
- Odpor valivého tření - F_{ovt}
- Odpor zrychlení - F_{oz}



Obrázek 22: Odporové síly působící na vozidlo během jízdy [63]

3.2.1.1 Aerodynamický odpor

Tento odpor nám vzniká při jízdě, kdy v horní části automobilu je karoserie vozu vzduchem obtékána a ve spodní je vzduch protlačován mezi vozovkou a karoserií. Výrobci automobilů se problematikou aerodynamiky zabývají velice pečlivě, jelikož právě aerodynamika vozu může snížit spotřebu paliva a zlepšit jízdní vlastnosti vozu. Elektromobil má určitou výhodu v podobě absence výfukového potrubí a palivové nádrže, díky tomu je aerodynamika spodní části vozu na velmi

dobré úrovni. Velikost aerodynamického odporu je tedy dána tvarem, povrchem karosérie, třecími silami, nesejností tlaku nad a pod vozidlem. Můžeme tedy určit velikost celkového odporu:

$$F_{oa} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_x \cdot (v + v_0)^2 \quad [N, kg \cdot m^{-3}, -, m^2, m \cdot s^{-1}] \quad [1]$$

Kde:

v – rychlost vozidla (náporová rychlost proudění vzduchu)

v_0 – rychlost protivětru

ρ – hustota vzduchu

C_x – aerodynamický koeficient

A_x – čelní plocha vozidla

Tabulka 9: Hodnoty aerodynamického koeficientu a čelní plochy vozidla [63]

TYP VOZIDLA	C_x [-]	A_x [m ²]
Osobní Vozidla	0,3 – 0,4	1,6 – 2,0
Sportovní Vozy	0,3 – 0,35	1,3 – 1,6
Závodní Vozy	0,25 – 0,35	0,8 – 1,5
Autobusy	0,5 – 0,7	5 - 7
Nákladní Vozy	1,0 – 1,2	9

3.2.1.2 Odpor stoupání

Tento odpor je vlastně poměrné zatížení elektromobilu gravitační silou v horizontální rovině. Poměr určíme z úhlu nakloněné roviny.

Výpočet odporu stoupání je dáno podle vzorce:

$$F_{os} = G \cdot \sin(\alpha) \quad [N, N, rad] \quad [2]$$

Kde:

α – úhel, který je svírán mezi vodorovnou rovinou a rovinou vozovky

G – celková tíha

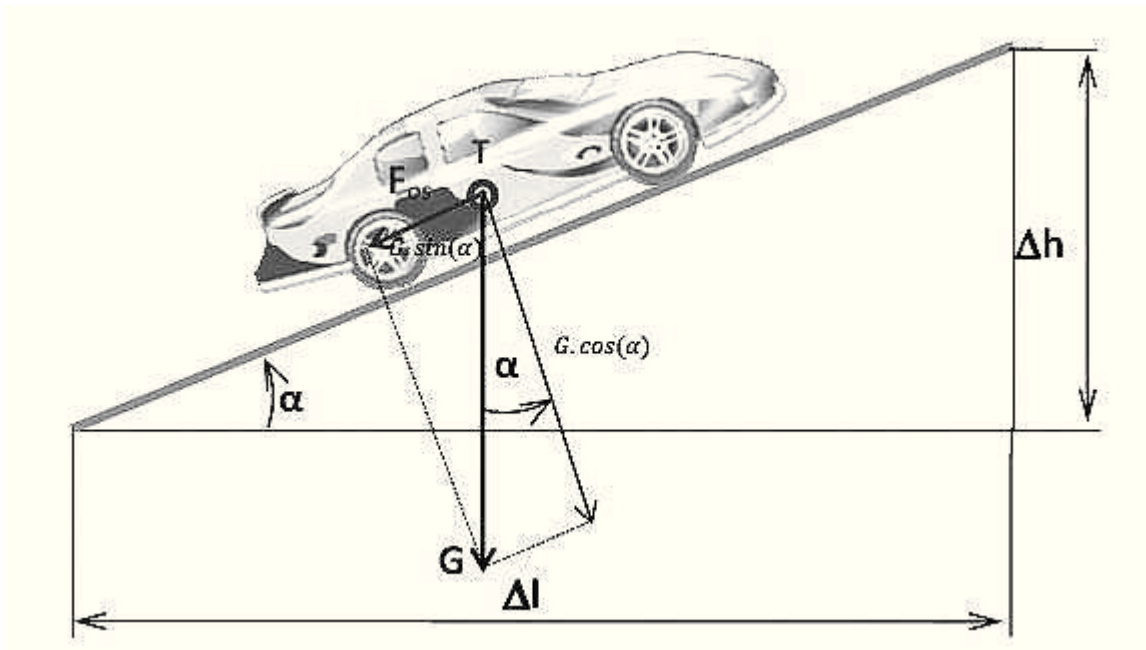
Na reálných cestách se setkáme spíše s pojmem sklon vozovky s (stoupání), pro který by platil vztah:

$$s = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \operatorname{tg}(\alpha) \quad [-, -, rad] \quad [3]$$

Jelikož na silnicích je maximální stoupání 12% a na dálnici 6%, můžeme použít jiný vztah pro výpočet, který je do hodnoty úhlu $\alpha = 17^\circ$, což je stoupání $s = 30\% = 0,3$.

$$F_{os} = G \cdot s \quad [N, N, -] \quad [4]$$

Pro jízdu z kopce nám vyjde hodnota F_{os} záporná a při jízdě po rovině bude tato hodnota logicky nulová.



Obrázek 23: Rozklad sil odporu stoupání [63]

3.2.1.3 Odpor valivého tření

Tento odpor vzniká deformací pneumatiky a vozovky. Platí, že pokud je vozovka pevná, pak nám dochází pouze k deformaci pneumatiky. Odpor valení vzniká v přední části pneumatiky ve směru jízdy. V zadní části se pneumatika znovu navrácí do svého původního stavu a tlačí na vozovku. Ztrátová energie, která vzniká při stlačování a znova narovnání pneumatiky se mění v teplo. Deformace pneumatiky je závislá především na tlaku uvnitř pneumatiky, kde při nedostatečném tlaku dochází k větší deformaci pneumatiky a odpor valení se nám zvýší. Zohledem na rychlost vozidla můžeme říci, že do rychlosti 80 km/h je součinitel valivého odporu zanedbatelný, při vyšších rychlostech ovšem dochází k nelineárnímu zvyšování odporu. Součinitel valivého odporu f závisí tedy na povrchu vozovky (tabulka č.10), na deformaci pneumatiky a na rychlosti otáčejícího se kola. Odpor valivého tření tedy pak můžeme napsat jako:

$$F_{ovt} = Z_k \cdot f = G \cdot \cos(\alpha) \cdot f = mg \cdot f \sqrt{1 - s^2} \quad [N, kg, m \cdot s^{-2}, -, -] \quad [5]$$

Kde:

Z_k – zatížení kol

$\cos(\alpha)$ – úhel stoupání mezi rovinou vozovky a vodorovnou rovinou

s – stoupání vozovky

Přičemž, pokud bychom uvažovali jízdu po rovině:

$$F_{ovt} = Z_k \cdot f = G \cdot f = mg \cdot f \sqrt{1 - s^2} \quad [N, kg, m \cdot s^{-2}, -, -] \quad [6]$$

Tabulka 10: Součinitel valivého odporu [63]

POVRCH VOZOVKY	f [-]
Asfalt	0,01 – 0,02
Beton	0,015 – 0,025
Dlažba	0,02 – 0,03
Makadam	0,03 – 0,04
Čerstvý Sníh	0,20 – 0,30
Ocel	0,0077

Odpor valivého tření je při jízdě do kopce nebo při jízdě z kopce stejný.

3.2.1.4 Odpor zrychlení

Při zrychlování vozidla působí proti směru zrychlení setrvačná síla, kterou nazýváme odporem zrychlení, ta se skládá pak z odporu zrychlení posuvné části a rotujících částí.

$$F_{oz} = F_{zpos} + F_{zrot} = \left(m + \sum_i \frac{J_{ki}}{r_{di} \cdot r_{ki}}\right) \cdot a \quad [N, kg, kg \cdot m^2, m, m, m \cdot s^{-2}] \quad [7]$$

Kde:

F_{zpos} je složka odporu zrychlení posuvné části, tedy:

$$F_{zpos} = m \cdot a \quad [N, kg, m \cdot s^{-2}] \quad [8]$$

Složka F_{zrot} je odporem zrychlení rotačních částí, tedy:

$$F_{zrot} = \sum_i \frac{J_{ki}}{r_{di} \cdot r_{ki}} \cdot a \quad [N, kg \cdot m^2, m, m, m \cdot s^{-2}] \quad [9]$$

Kde:

r_k - je fiktivní veličina, tzv. valivý poloměr kola. Udává nám poloměr volně se valícího kola, ovšem má stejnou dopřednou rychlost a úhlovou rychlost jako skutečné kolo. r_d - je dynamický poloměr, tedy skutečný poloměr kola (vzdálenost daná kolmicí od středu kola k vozovce).

Pokud kolo nepřenáší žádnou obvodovou sílu, potom se $r_k = r_d$, tedy valivý poloměr kola se rovná dynamickému poloměru kola. Při přenosu hnacího momentu, vlivem tečné deformace a prokluzu, se r_k zmenší oproti r_d . Naopak při přenosu brzdného momentu se poloměr r_k zvětší. Pokud by nám hnací kolo prokluzovalo na místě, je valivý odpor r_k roven nule a kdyby bylo kolo blokováno při brzdění, bude se valivý odpor r_k blížit nekonečnu. Odpor rotační části vozidla překonáme tak, že přivedeme na kola vozidla moment M_{rot} , který je dán vztahem:

$$M_{rot} = M_{rm} + M_{rp} + M_{rk} = F_{Zrot} \cdot r_d \quad [Nm, N, m] \quad [10]$$

M_{rm} - moment na hnacích kolech automobilu, který potřebujeme na zrychlení rotujících částí motoru, je dán vztahem:

$$M_{rm} = J_m \cdot \varepsilon_M \cdot i_c \cdot \eta \quad [Nm, kg \cdot m^2, rad \cdot s^{-2}, -, -] \quad [11]$$

Kde:

J_m - moment setrvačnosti motoru

ε_M - úhlové zrychlení motoru

$i_c = i_p \cdot i_r$ - celkový převod mezi hnacími koly a motorem, i_p je převod převodovky a i_r je převod rozvodovky

η - mechanická účinnost

M_{rp} - potřebný moment ke zrychlení části převodového ústrojí, je dán vztahem:

$$M_{rd} = J_p \cdot \varepsilon_p \cdot i_r \cdot \eta \quad [Nm, kg \cdot m^2, rad \cdot s^{-2}, -, -] \quad [12]$$

M_{rk} - moment potřebný ke zrychlení kol vozidla, je dán vztahem:

$$M_{rk} = \sum_i J_{ki} \cdot \varepsilon_{ki} \quad [Nm, kg \cdot m^2, rad \cdot s^{-2}] \quad [13]$$

Úhlové zrychlení kol automobilu se dá vyjádřit v závislosti na podélném zrychlení, tedy vztahem:

$$\varepsilon_k = \frac{a}{r_k} \quad [rad \cdot s^{-2}, m \cdot s^{-2}, m] \quad [14]$$

Nyní po dosazení každé jednotlivé složky do rovnice č.10 dostaneme:

$$M_{rot} = \left[(J_m \cdot i_c^2 + J_p \cdot i_r^2) \cdot \eta + \sum_i J_{ki} \right] \frac{a}{r_k} \quad [Nm, kg \cdot m^2, -, kg \cdot m^2, m \cdot s^{-2}, m] \quad [15]$$

Výsledný odpor zrychlení je pak dán součtem odporů posuvných: $F_{Zpos} = m \cdot a$ a rotačních částí:

$$F_{Zrot} = \sum_i \frac{J_{ki}}{r_{di} \cdot r_{ki}} \cdot a, \text{ potom tedy:}$$

$$F_{oz} = ma + \frac{M_{rot}}{r_d} = ma + \frac{1}{r_d} \left[(J_m \cdot i_c^2 + J_p \cdot i_r^2) \cdot \eta + \sum_i J_{ki} \right] \frac{a}{r_k}$$

$$[Nm, kg, m \cdot s^{-2}, m, kg \cdot m^2, -, -, kg \cdot m^2, m \cdot s^{-2}, m] \quad [16]$$

Za předpokladu rovnosti valivého poloměru kola a skutečného poloměru kola ($r_k \approx r_d$) můžeme předchozí rovnici napsat v následujícím tvaru:

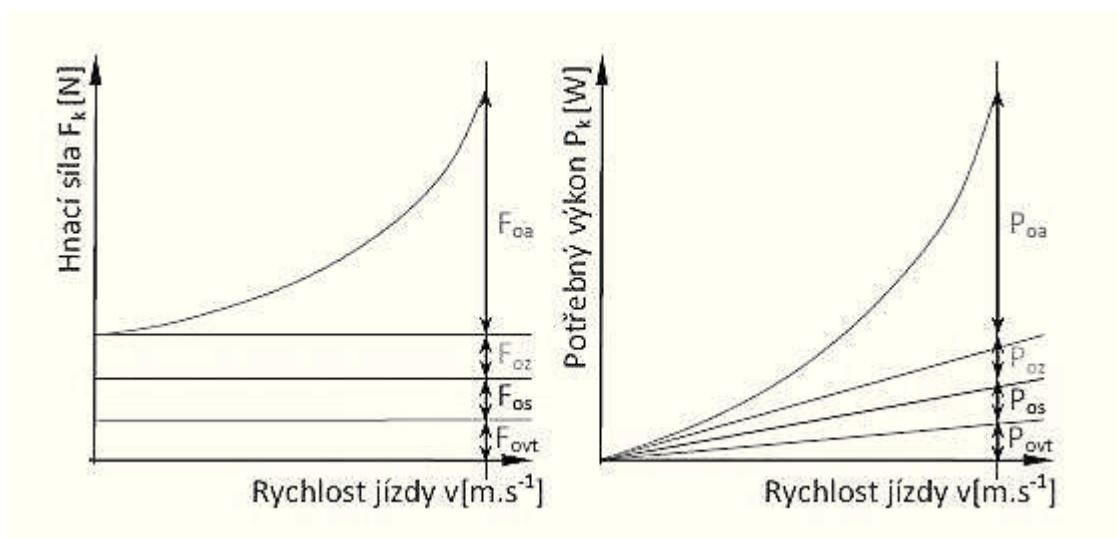
$$F_{oz} = \left[1 + \frac{(J_m \cdot i_c^2 + J_p \cdot i_r^2) \cdot \eta + \sum_i J_{ki}}{mr_d^2} \right] ma = \lambda ma \quad [N, -, kg, m \cdot s^{-1}] \quad [17]$$

Kde: λ je součinitel vlivu rotačních součástí

3.2.1.5 Celkový odpor a potřebná hnací síla

Pokud sečteme všechny jízdní odpory, které jsou na vozidlo kladené během jízdy, dostaneme hodnotu celkového jízdního odporu vozidla. Tento odpor nám mimo jiné udává potřebnou sílu, kterou musí elektromobil překonat během jízdy v určité rychlosti. Platí tedy:

$$F_o = F_{ovt} + F_{oa} + F_{os} + F_{oz} \quad [N, N, N, N, N] \quad [18]$$



Obrázek 24: Hnací síla a potřebný výkon pro překonání jízdních odporů [63]

Pokud dosadíme do předešlé rovnice jednotlivé rovnice jízdních odporů, dostaneme celkový odpor vozidla nebo lépe řečeno dostaneme potřebnou hnací sílu F_h pro překročení jízdních odporů.

$$F_h = F_o = G \cdot f \cdot \cos(\alpha) + \frac{\rho \cdot C_x \cdot A_x (v + v_0)^2}{2} \pm G \cdot \sin(\alpha) + \lambda m a$$

$$[N, N, -, \text{rad}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, N, \text{rad}, -, \text{kg}, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad [19]$$

Při jízdě po rovině a bez zrychlení působí na vozidlo pouze valivý a vzdušný odpor ($v_0=0$), potom celkový jízdní odpor je:

$$F_o = G \cdot f + \frac{\rho \cdot C_x \cdot A_x \cdot v^2}{2} \quad [N, N, -, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [20]$$

A nyní hnací výkon vozidla, který musíme přivádět na hnací kola k překonání jízdních odporů:

$$P_k = F_o v = \frac{M_k v}{r_d} \quad [W, Nm, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}] \quad [21]$$

Pokud nyní dosadíme za celkový jízdní odpor F_o jednotlivé jízdní odpory:

$$P_k = (F_{ovt} + F_{oa} + F_{os} + F_{oz})v \quad [W, Nm, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}] \quad [22]$$

Tedy:

$$P_k = G \cdot \cos(\alpha) \cdot f \cdot v + \frac{v \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_x (v + v_0)^2}{2} \pm G \cdot \sin(\alpha) \cdot v + \lambda m a v$$

$$[W, N, \text{rad}, -, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, N, \text{rad}, -, \text{kg}, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [23]$$

Potom při jízdě po rovině při konstantním zrychlení bude potřebný výkon:

$$P_k = G \cdot f \cdot v + \frac{\rho \cdot C_x \cdot A_x \cdot v^3}{2} \quad [W, N, -, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [24]$$

Můžeme tedy říct, že výkon potřebný k překonání valivého odporu, odporu zrychlení a valivého odporu roste lineárně s rychlostí automobilu v . Výkon potřebný k překonání vzdušného odporu roste s třetí mocninou v .

3.2.2 Parametry elektromobilu

Abychom mohli spočítat co nejpřesněji parametry akumulátoru, je třeba nejprve se zaměřit na některé parametry elektromobilu a teprve pak přistoupit k návrhu akumulátoru. Pro určení vhodných parametrů byly použity informace z reálných elektromobilů.

- **Hmotnost elektromobilu:** $m_e = 1200 \text{ kg}$

Snažíme se, aby hmotnost elektromobilu byla co nejmenší, přičemž elektromobil musí mít dobré jízdní vlastnosti a především nízkou spotřebu energie. Hmotnost elektromobilu byla vyhodnocena od reálných elektromobilů na trhu.

- **Maximální rychlost vozu:** $v_e = 36,1 \text{ m/s}$

Jako maximální rychlost je zvolena hodnota 130 km/h. Tato hodnota je maximální přípustná rychlost na českých dálnicích a navíc se předpokládá, že elektromobily se nejprve uchytí především jako městský automobil, proto tato rychlost je dostačující.

- **Minimální dojezd elektromobilu:** $s_e = 200 \text{ km}$

Na minimální dojezd elektromobilu mají, kromě kapacity akumulátoru, rovněž vlivy fyzikální, jako je odpor vzduchu a odpor valivého tření apod. Předpokládaný minimální dojezd činí 200 km.

- **Hodnota aerodynamického koeficientu a čelní plochy vozidla:** $C_x = 0,33$ a $A_x = 1,9 \text{ m}^2$ Tyto hodnoty byly vybrány jako průměrné hodnoty u současných automobilů, k nápomoci slouží tabulka č.9.

- **Hustota vzduchu:** $\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Tento parametr nesouvisí s parametry vozidla, avšak jeho hodnota je důležitá pro budoucí výpočty. Hodnota $1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ odpovídá tlaku vzduchu 101,3 kPa při teplotě 15 °C.

- **Součinitel valivého odporu:** $f = 0,0175$

Tato hodnota je zvolena podle tabulky č.10, předpokládá se tedy jízda po tvrdém povrchu vozovky.

- **Celková tíha elektromobilu:** $G = 11768 \text{ N}$

Je dána vztahem: $G = m_e \cdot g = 1200 \cdot 9,807 = 11768 \text{ N}$. Kde právě m_e je hmotnost elektromobilu a g je gravitační zrychlení.

3.2.3 Výpočet akumulátoru

Pro správný výpočet energie akumulátoru je nutné nejprve zjistit potřebný výkon elektromobilu, použijeme tedy vzorec č.24.

$$P_k = G \cdot f \cdot v_e + \frac{\rho \cdot C_x \cdot A_x}{2} \cdot v_e^3 \quad [\text{W}, \text{N}, -, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, -, \text{m}^2, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Následně po dosazení hodnot z kapitoly 3.2.2 dostaneme:

$$P_k = G \cdot f \cdot v_e + \frac{\rho \cdot C_x \cdot A_x}{2} \cdot v_e^3 = 11768 \cdot 0,0175 \cdot 36,1 + \frac{1,25 \cdot 0,33 \cdot 1,9}{2} \cdot 36,1^3 = 25870 \text{ W}$$

Tato výsledná hodnota je myšlena pro jízdu po rovině při konstantním zrychlení.

Nyní se dostáváme k výpočtu energie akumulátoru, přičemž platí:

$$E_{aku} = \frac{P_k \cdot s_e}{v_e \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{přev}} \quad [kW \cdot h^{-1}, W, m, m \cdot s^{-1}, \%, \%] \quad [25]$$

Kde:

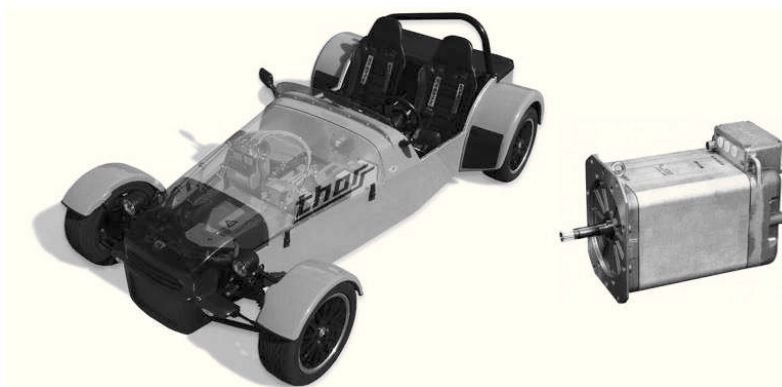
P_k – potřebný výkon (25870 W)

s_e – je naše minimální hodnota dojezdu elektromobilu (200 000 m)

v_e – maximální rychlost elektromobilu (36,1 m/s)

η_{mot} – je účinnost elektromotoru (97%)

$\eta_{přev}$ – je účinnost převodového ústrojí (98%)



Type	AC Induction Motor
Cooling Media	Water-Glycol
Rated Voltage DC	650 V
Rated Power	67 kW
Rated Torque	160 Nm
Max. Torque	360 Nm @ 250A 430 Nm @ 300A
Rated Current	124 A
Max. Speed	10,000 rpm
Weight	90 kg
Dim. (LxWxH)	425 x 245 x 245 mm
Ambient Temperature	- 30 °C to 70 °C
Degree of Protection	IP 65 / 9k

Obrázek 25: Elektromobil Evisol Thorr a z téhož automobilu elektromotor Siemens (upraveno autorem) [64] [65]

Jako elektromotor je použit asynchronní typ, konkrétně Siemens 1PV5135-WS28 s výkonem 67 kW tedy 91 hp, který využívá například sportovní elektromobil Evisol Thorr (obrázek č.25). Převodové ústrojí je vybráno jednostupňové. Předpokládáme, že elektromotor bude dostačující díky svému výkonu.

Po dosažení hodnot vychází:

$$E_{aku} = \frac{P_k \cdot s_e}{v_e \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{přev}} = \frac{25,870 \cdot 200}{130 \cdot 0,97 \cdot 0,98} = 41,868 \text{ kW/hod}$$

Tato výsledná hodnota je pro elektromobil, který jede konstantní rychlostí 130 km/h při konstantním výkonu 25870 W, tedy je zřejmé, že v reálných podmínkách této hodnoty nikdy nedosáhneme. Výsledná hodnota je také udávána bez dalšího odběru vozidla jako je klimatizace, rádio, topení, světla a elektronické obvody. Díky tomu nám reálně narůstá hodnota až o 30%. Pokud bychom požadovali výslednou hodnotu energie akumulátoru v jednotkách Ah, bylo by zapotřebí znát napětí systému vozidla.

Pro kontrolu správnosti výsledku můžeme vypočítat hodnotu dojezdu elektromobilu:

$$s = \frac{E_{aku}}{P_k} \cdot v_e \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{přev} \quad [km, kW, km \cdot h^{-1}, \%, \%, W] \quad [26]$$

$$s = \frac{E_{aku}}{P_k} \cdot v_e \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{přev} = \frac{41,868}{25,870} \cdot 130 \cdot 0,97 \cdot 0,98 = 200 \text{ km}$$

Na závěr tedy můžeme říci, že minimální kapacita akumulátoru v elektromobilu (jedoucí konstantní rychlostí při konstantní výkonu a pouze po rovině) pro dosažení minimální vzdálenosti 200 km činí 41,868 kW/h. Nutno podotknout, že výpočty byly prováděny bez vedlejších ztrát energie, které jsou v elektromobilu. Pokud bychom se měli zaměřit na optimální velikost a váhu akumulátoru, nastává zde nelehký úkol, jelikož můžeme říci, že právě velikost a váha by měly být přímo úměrné k elektrické spotřebě vozidla. [35] [66] [63]

3.3 AKUMULÁTOROVÁ LOKOMOTIVA

V této kapitole bude proveden výběr vhodného akumulátoru z hlediska jeho parametrů, jako je např. kapacita. V kapitole 2.3 byl z hlediska kritérií, které jsou na akumulátor kladeny, vybrán jako nejvhodnější olovený typ akumulátoru.

3.3.1 Fyzikální rozbor

Stejně jako u elektromobilu budou i tady nejprve přiblíženy různé fyzikální síly, které působí na kolejové vozidlo během jízdy. Budeme se tedy zabývat trakčními odpory, které nám při jízdě působí na kolejové vozidlo, vyjma tažné síly. Tyto trakční odpory lze rozdělit podle místa, kde vznikají, viz tabulka č.11.

Tabulka 11: Trakční odpory rozdělené podle místa jejich vzniku [58]

ODPORY KOLEJOVÉHO VOZIDLA	TRAŤOVÉ ODPORY
Jízdní odpor (vzduchové, valivé, smykové tření)	Odpor ze stoupání
Odpor zrychlení	Odpor z tunelu
Brzdná síla	Odpor v oblouku

V rámci zjednodušení úvah byl stanoven pojem ideální kolejové vozidlo, tedy uvažujeme pouze síly tíhové a síly rovnoběžné se směrem pohybu vozidla. Pohyb kolejového vozidla uvažujeme rovnoběžný se směrem jízdy, tedy jeden stupeň volnosti. Dále považujeme kolejové vozidlo za hmotný bod.

3.3.1.1 Odpory kolejového vozidla

1) JÍZDNÍ ODPOR

Tento odpor vzniká třením na kolejovém vozidle. Celkově obsahuje tři části, přičemž platí:

$$F_o = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad [N, km \cdot h^{-1}] \quad [27]$$

Kde:

A – smykové tření v ložiskách kolejového vozidla

$B \cdot V$ – valivé tření kola po kolejnici

$C \cdot V^2$ – aerodynamický odpor

a) Smykové tření v ložiskách kolejového vozidla

V ložiskách valivých i kluzných vznikají třecí síly, které působí momentem proti rotaci kola. V lokomotivě vzniká smykové tření v ložiskách při otáčení čepu nápravy v dvojkolí ložiska. Velikost takového tření je závislá na typu ložisek, konstrukci, zaběhnutí ložiska a dalších parametrech. Velikost síly, která je potřebná k překonání odporu z tření ložiska v jednom kole nám určí vztah:

$$F_{A1} = A_1 = \frac{r}{r_k} \cdot \varphi \cdot G_1 \quad [N, m, m, N \cdot kN^{-1}, kN] \quad [28]$$

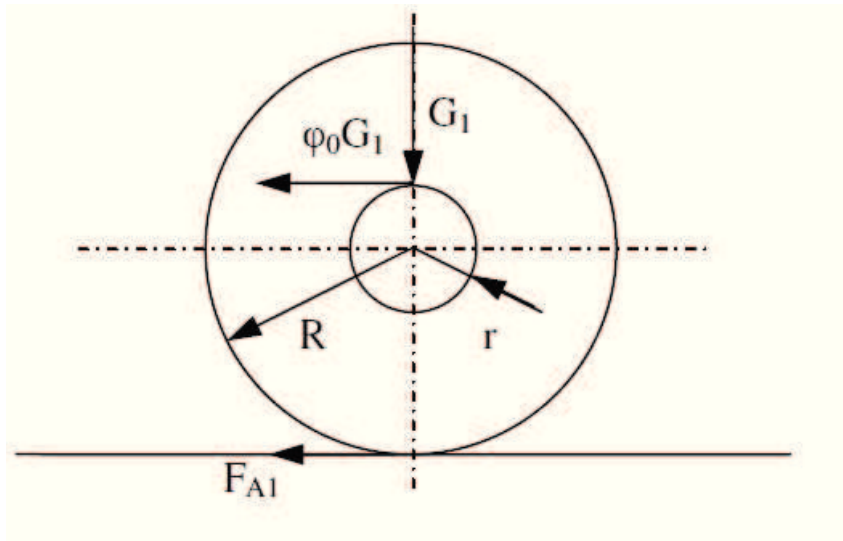
Kde:

r – poloměr čepu nápravy

r_k – poloměr kola

φ – součinitel tření v ložiskách

$G_1 = \frac{G}{2 \cdot n}$ - částečná tíha vozidla připadající na 1 kolo (n značí počet náprav kolejového vozidla)



Obrázek 26: Složka jízdního odporu z tření v ložiskách (upraveno autorem) [58]

Následně celkový odpor tření v ložiskách pro celé kolejové vozidlo:

$$F_{A1} = A = 2n \cdot A_1 = \frac{r}{r_k} \cdot \varphi \cdot G_1 \cdot 2n = \frac{r}{r_k} \cdot \varphi \cdot G \quad [N] \quad [29]$$

b) Valivé tření

Toto tření vzniká při pohybu kola po kolejnici. Tento odpor nesouvisí s adhezním třením ani se smykovým. Vznik tření závisí na pružné deformaci materiálu kola a kolejnice v místě dotyku. Je tedy patrné, že závisí právě na materiálu kol a kolejníc. Jízdní odpor tohoto tření (ocel po oceli) je velmi malá (viz. tabulka č.10), díky tomu má u kolejových vozidel velké využití rekuperace elektrické energie. Valivému tření se rovněž věnuje kapitola 3.2.1.3 u návrhu elektromobilu, díky tomu můžeme využít vzorec:

$$F_{ovt} = Z_k \cdot f = G \cdot \cos(\alpha) \cdot f = mg \cdot f \sqrt{1 - s^2} \quad [N, kg, m \cdot s^{-2}, -, -] \quad [5]$$

Kde:

Z_k – zatížení kol na kolejnici

f – součinitel valivého odporu

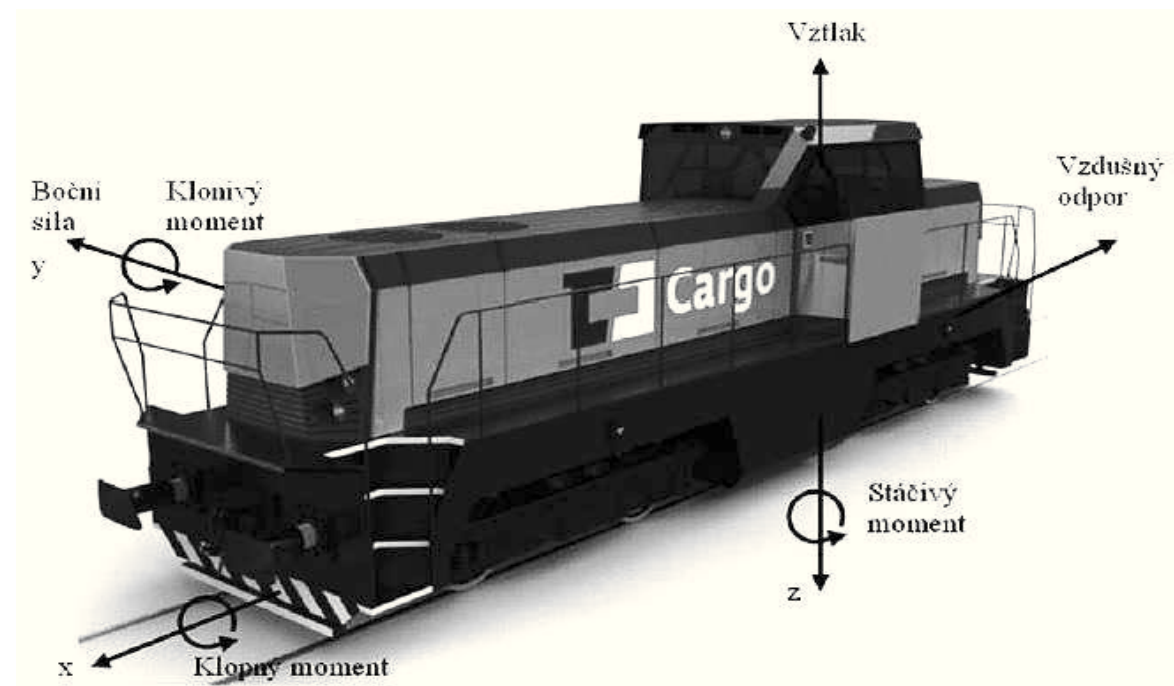
G – tíha lokomotivy

$\cos(\alpha)$ – úhel stoupání mezi rovinou vozovky a vodorovnou rovinou

s – stoupání vozovky

c) Aerodynamický odpor

Můžeme říci, že celková aerodynamická síla má obecnou velikost a směr.



Obrázek 27: Souřadný systém pro aerodynamická měření momentů a sil [58]

Pokud bychom chtěli posoudit vliv této síly na zatížení kolejového vozidla, je třeba ji velice vhodně rozložit. Na obrázku č.27 je znázorněné možné rozložení aerodynamických účinků, jedná se o síly jak silové (aerodynamický odpor, aerodynamický vztlak, aerodynamická boční síla), tak momentové (stáčivý moment, klopný moment, klonivý moment). Aerodynamickému odporu se věnuje kapitola 3.2.1.1 u návrhu elektromobilu, tedy platí vzorec:

$$F_{oa} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_x \cdot (v + v_0)^2 \quad [N, kg \cdot m^{-3}, -, m^2, m \cdot s^{-1}] \quad [1]$$

Kde:

v – rychlost kolejového vozidla (náporová rychlost proudění vzduchu)

v_0 – rychlost protivětru

ρ – hustota vzduchu

C_x – aerodynamický koeficient

A_x – čelní plocha kolejového vozidla

2) ODPOR ZRYCHLENÍ

Můžeme říci, že veškeré objekty, pokud jsou v pohybu, se snaží odolávat změnám. Tedy mají setrvačnost, ta je přímo úměrná hmotnosti, přičemž pokud je objekt těžší, má větší tendenci vzdorovat změnám když se pohybuje. Pokud uvažujeme pohybující se kolejové vozidlo, koná veškerá hmota posuvný pohyb. Kolejové vozidlo obsahuje ale i rotační části (alternátory, brzdové kotouče, nápravy), ty se rovněž podílí na celkové kinetické energii vozu. Vzhledem k faktu, že vlak nemůže měnit maximální brzdou ani tažnou sílu, vychází tím pádem najevo, že vlak potřebuje k těmto úkonům větší energii. Toto se následně projeví jako dlouhá brzdná dráha a delší dobou rozjezdu. Při odborných výpočtech se zavádí součinitel rotačních hmot ρ_d . Součinitel rotačních hmot je možné vypočítat pro každé konkrétní vozidlo, a to jako součet všech složek rotační energie, které podělíme všemi složkami energie posuvného pohybu a k výsledku přičteme jedničku.

Tabulka 12: Některé hodnoty součinitele rotujících hmot [67]

Druh kolejového vozidla	Hodnota ρ_d
Osobní vozy	0,06
Nákladní prázdné vozy	0,1
Nákladní naložené vozy	0,04
Motorové a elektrické lokomotivy	0,20
Motorové a elektrické vozy a jednotky	0,15

Zrychlení se vypočítá podle vzorce:

$$a = \frac{F_{oz}}{(1 + \rho) \cdot m} \quad [m \cdot s^{-2}, N, -, kg] \quad [30]$$

Přičemž pro odpor zrychlení platí:

$$F_{oz} = m \cdot a \cdot (1 + \rho_d) \quad [N, kg, m \cdot s^{-2}, -] \quad [31]$$

3) BRZDNÁ SÍLA

Brzdná síla slouží ke snížení rychlosti vlaku nebo zastavení vlaku. Kolejové vozidlo ztrácí vlivem brzdění pohybovou energii, ta se mění v nevyužitelné teplo. U elektrických kolejových vozidel, pokud to umožní konstrukce, se využívá rekuperační brzdění. Vlivem tohoto brzdění se velká část pohybové energie mění na elektrickou energii.

3.3.1.2 Traťové odpory

1) ODPOR ZE STOUPÁNÍ

Tento odpor je nejvýznamnější složkou traťového odporu. Odpor ze stoupání neboli sklon trati je obecně vyjádřen jako přírůstek výšky koleje na určité délce. Na hlavních tratích dosahuje hodnot 15‰, na vedlejších tratích může být slon ještě větší. Číselné vyjádření odporu může být kladné (jízda do kopce) nebo záporné (jízda z kopce). Odpor ze stoupání je dán vztahem:

$$F_{os} = G \cdot \sin(\alpha) \quad [N, N, rad] \quad [2]$$

Kde:

α – je svírán mezi vodorovnou rovinou a rovinou vozovkou

G – celková tíha

Za předpokladu velmi malých úhlů je možné napsat zjednodušeně stoupání neboli sklon vozovky:

$$s = \frac{\Delta h}{\Delta l} = tg(\alpha) \quad [-, -, rad] \quad [3]$$

Kde:

h – výška stoupání tratě

l – délka tratě

Podrobněji odporu ze stoupání se věnuje kapitola 3.2.1.2.

2) ODPOR Z TUNELU

Při průjezdu kolejového vozidla tunelem se zvětší aerodynamický odpor. Tato vlastnost je díky zhoršené možnosti obtékání vozidla vzduchem v tunelu. Velikost součinitele odporu z jízdy tunelem je závislé na rozměrech tunelu. U jednokolejného tunelu jde o hodnotu 2 N/kN a u dvoukolejného je to 1N/kN.

3) ODPOR V OBLOUKU

Pokud pojedou kolejové vozidlo po kolejnici obloukem, vzniká působením třecích a řídicích sil mezi kolem a kolejnicí odpor z jízdy obloukem. Při této jízdě koná kolejové vozidlo obecný pohyb, který je možné nahradit posuvným křivočarým pohybem, jehož trajektorie je shodná s osou koleje a otáčením kolejového vozidla, které se koná kolem svislé osy, přičemž prochází středem kolejového vozidla. Velikost odporu při jízdě vozidla obloukem je ovlivněna mnoha činiteli (poloměr oblouku, součinitel tření, tvar kol), proto jsou pro výpočty použity empirické vztahy podle Rockwella, které berou v potaz pouze veličinu s největším vlivem, a to je poloměr oblouku R , přičemž na rychlosti kolejového vozidla nezáleží. V našich podmínkách se používají dva vztahy pro hlavní tratě [32] a vedlejší [33].

$$F_{or} = \frac{650}{R - 55} \quad [N, kN] \quad [32]$$

$$F_{or} = \frac{500}{R - 30} \quad [N, kN] \quad [32]$$

3.3.1.3 Celkový odpor a potřebná hnací síla

Po sečtení jízdních odporů, které jsou na kolejové vozidlo kladené během jízdy, dostaneme hodnotu celkového jízdního odporu vozidla. Tento odpor nám mimo jiné udává potřebnou sílu, kterou musí kolejové vozidlo překonat.

$$F_{ct} = F_o + F_{os} + F_{or} + F_{oz} + F_{ob} \quad [N, N, N, N, N, N] \quad [33]$$

Kde:

F_{ct} – tažná síla na obvodě hnacích kol

F_o – jízdní odpor kolejového vozidla

F_{os} – odpor ze stoupání

F_{or} – odpor z oblouku

F_{oz} – odpor zrychlení

F_{ob} – brzdny odpor

Je zřejmé, že při jízdě kolejového vozidla se všechny síly v rovnici nevyskytují najednou.

3.3.2 Parametry lokomotivy a tratě

Pro návrh potřebné kapacity akumulátoru byl zvolen model akumulátorové lokomotivy s hmotností $m_l = 380000$ kg, která se bude rozjíždět nulovou počáteční rychlostí z bodu A. Uvažujme prvních 300 metrů rovný úsek trati s nulovým sklonem. Po překročení hranice 300 metrů začíná táhlé stoupání 8‰ a oblouk o poloměru 500 metrů a délce 300 metrů. Lokomotiva má konstantní zrychlení $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (z 0 na 100 km/h za 55,6 sekund) a jede po hlavní koleji. Potřebujeme zjistit, kolik energie je potřeba až do rychlosti lokomotivy 120 km/h.

3.3.3 Výpočet akumulátoru

Nejdříve je potřeba vypočítat dráhu, kterou lokomotiva potřebuje pro rozjezd z rychlosti $v_0 = 0$ m/s na rychlost $v_1 = 33,33$ m/s se zrychlením $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Použijeme rovnici rovnoměrného zrychleného pohybu:

$$x = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2 \cdot a} = \frac{33,33^2 - 0^2}{2 \cdot 0,5} = 1110,89 \text{ m} \quad [m, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}] \quad [34]$$

Pro výpočet potřebné tažné síly k rozjezdu vlaku použijeme pohybovou rovnici:

$$F_s = m_l \cdot (1 + \rho_d) \cdot a + F_o + F_t \quad [N, kg, -, m \cdot s^{-2}, N, N] \quad [35]$$

Kde:

F_s – potřebná tažná síla k rozjezdu vlaku

m_l – hmotnost lokomotivy

ρ_d – součinitel rotačních hmot

a – zrychlení vlaku

F_o – odpor kolejového vozidla

F_t – odpor trati

Součinitel rotačních ploch ρ_d lze vypočítat, avšak pro zjednodušení byly staticky určeny průměrné hodnoty (tabulka č.12). Pro náš případ je zvolena hodnota $\rho_d = 0,20$.

F_o jako celkový odpor kolejového vozidla je dán vztahem č.27. Jelikož můžeme říci, že tato velikost je značně proměnlivá, pro praktické výpočty byly proto stanoveny matematické výrazy pro výpočet tohoto odporu v závislosti na rychlosti kolejového vozidla. V tabulce č.13 jsou znázorněny rovnice pro vybrané řady hnacích vozidel, které užívá akciová společnost České dráhy.

Tabulka 13: Rovnice měrného vozidlového odporu některých řad hnacích kolejových vozidel [68]

ŘADA HNACÍHO VOZIDLA	ROVNICE ODPORU KOLEJOVÉHO VOZIDLA F_o [N/kN]
130	$F_o = 4,74 + 0,00051 \cdot V^2$
150, 151	$F_o = 3,5 + 0,0015 \cdot V + 0,00065 \cdot V^2$
162, 163	$F_o = 3,52 + 0,002 \cdot V + 0,00067 \cdot V^2$
460	$F_o = 2,2 + 0,015 \cdot V + 0,00038 \cdot V^2$
680	$F_o = 2,4 + 0,0024 \cdot V + 0,00018 \cdot V^2$
751	$F_o = 3,87 + 0,006 \cdot V + 0,00077 \cdot V^2$
754	$F_o = 2,96 + 0,005 \cdot V + 0,0006 \cdot V^2$
810	$F_o = 1,86 + 0,00161 \cdot V^2$
814	$F_o = 0,47 + 0,002 \cdot V + 0,00029 \cdot V^2$

Pro náš modelový výpočet byla stanovena rovnice:

$$F_o = 2,4 + 0,0024 \cdot V + 0,00018 \cdot V^2$$

Pokud bychom brali v úvahu zapojené vozy za lokomotivu, jejich měrný odpor je uveden v tabulce č.14. Pro náš výpočet uvažujeme pouze hnací kolejové vozidlo.

Tabulka 14: Rovnice měrného odporu vozů [67]

SOUPRAVA VOZŮ	ROVNICE ODPORU KOLEJOVÉHO VOZIDLA F_o [N/kN]
Osobní čtyřnápravové vozy	$F_o = 1,35 + 0,0008 \cdot V + 0,00033 \cdot V^2$
Osobní a nákladní vozy	$F_o = 1,9 + 0,000465 \cdot V^2$
Osobní čtyřnápravové vozy lehké stavby	$F_o = 1,8 + 0,01 \cdot V + 0,000476 \cdot V^2$
Osobní dvounápravové vozy lehké stavby	$F_o = 1,5 + 0,00089 \cdot V^2$
Prázdné dvounápravové nákladní vozy	$F_o = 2 + 0,000125 \cdot V^2$
Prázdné čtyřnápravové nákladní vozy	$F_o = 2 + 0,0008 \cdot V^2$
Ložené dvounápravové nákladní vozy	$F_o = 1,7 + 0,0033 \cdot V + 0,00018 \cdot V^2$
Ložené čtyřnápravové nákladní vozy	$F_o = 1,3 + 0,00033 \cdot V^2$

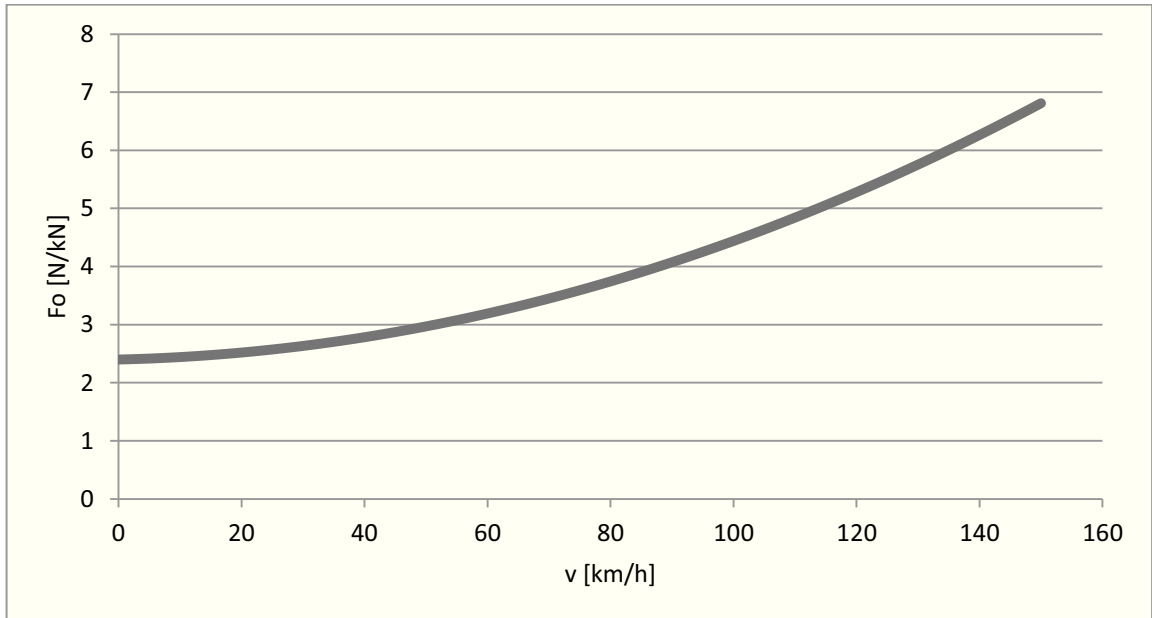
Při nulové počáteční rychlosti tedy platí:

$$F_o = 2,4 + 0,0024 \cdot 0 + 0,00018 \cdot 0^2 = 2,4 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$$

a při maximální rychlosti platí:

$$F_o = 2,4 + 0,0024 \cdot 120 + 0,00018 \cdot 120^2 = 2,4 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1} = 5,28 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$$

Hodnoty měrného vozidlového odporu se tedy pohybují v rozmezí od 2,4 N/kN při nulové rychlosti do 5,28 N/kN při rychlosti 120 km/h. Závislost tohoto odporu na rychlosti zobrazuje obrázek č.28.



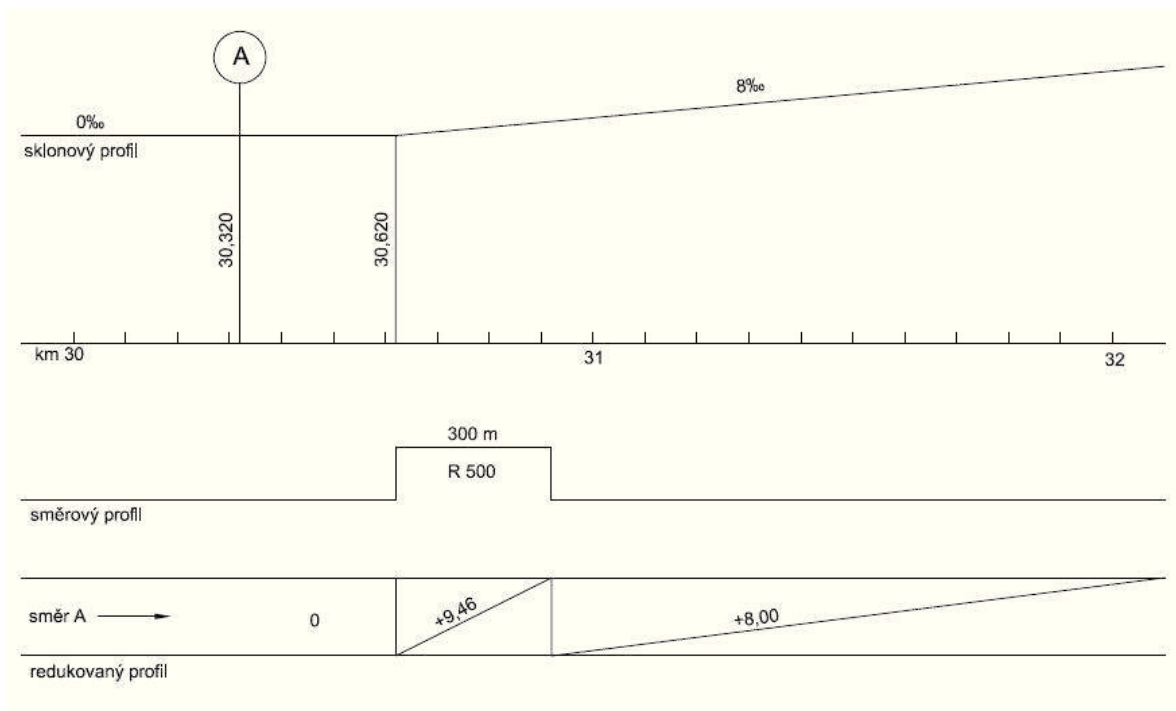
Obrázek 28: Měrný vozidlový odpor

V intervalu 0 až 120 km/h byl vypočítán průměrný měrný vozidlový odpor 3,9345 N/kN. Následně:

$$F_o = F_o \cdot (m_l \cdot g) = 3,9345 \cdot (380 \cdot 9,81) = 14667 \text{ N}$$

Nyní je potřeba spočítat traťové odpory, které jsou během jízdy na kolejové vozidlo kladeny. Můžeme říci, že traťové odpory se mění podle směrového a sklonového profilu trati. Sklonový profil je znázorněn na obrázku č.29 nad kilometráží. Lokomotiva se rozjíždí z bodu A (km trati 30,320) na vodorovném úseku a po 300 m své jízdy (km 30,620) začíná stoupání 8 ‰. Lokomotiva potřebuje na rozjezd 1110,89 m od km 30,620 až do dosažení rychlosti 120 km/h lokomotiva pojedou do stoupání 8 ‰ (v tomto úseku trati je měrný odpor ze sklonu trati 8N/kN). Podle směrového profilu na obrázku č.29 vidíme, že lokomotiva jede od rozjezdu do km 30,620 a pak od km 30,920 až do dosažení požadované rychlosti 120 km/h po přímé koleji. Tudíž v úseku mezi km 30,620 až 30,920 je oblouk s poloměrem 500m, pro výpočet měrného odporu z oblouku použijeme vzorec 32.

$$F_{or} = \frac{650}{R - 55} = \frac{650}{500 - 55} = 1,46 \text{ N/kN}$$



Obrázek 29: Profil kolejové trati

Redukovaný profil (obrázek č.29) vznikne spojením směrového a sklonového profilu. První úsek trati o délce 300m je rovný s nulovým sklonem a tedy traťovým odporem 0 N/kN. Druhý úsek od km 30,620 až km 30,920 je působení odporu ze sklonu trati o měrném odporu 8N/kN a zároveň nám působí odpor z oblouku o měrném odporu 1,46 N/kN. Pokud sečteme měrné odpory a využijeme faktu, že sklon je roven měrnému odporu, můžeme říci, že redukovaný sklon v trati km 30,320 až 30,620 je:

$$S_r = F_{Os} + F_{Or} = 8 + 1,46 = 9,46 \text{ ‰}$$

Kde:

S_r – redukovaný sklon trati

Poslední úsek železniční trati začíná v km 30,920 po 600 m jízdy lokomotivy a končí v km 31,431, kdy lokomotiva dosáhne po 1111 m požadované rychlosti 120 km/h. Tento poslední úsek trati je rovný se sklonem 8‰. Pro hodnoty traťových odporů vynásobíme hodnoty všech měrných odporů výrazem $m_1 \cdot g$. Pro zpřehlednění jsou výsledné údaje zapsány v tabulce č.15.

Tabulka 15: Přehled vypočítaných traťových odporů

ÚSEK TRATI	REDUKOVANÝ SKLON TRATI S_r [‰]	DÉLKA ÚSEKU x [m]	TRAŤOVÝ ODPOR F_t [N]
Úsek 1	0	300	$F_{t1} = 0 \cdot (380 \cdot 9,81) = 0$
Úsek 2	9,46	300	$F_{t2} = 9,46 \cdot (380 \cdot 9,81) = 35265$
Úsek 3	8	511	$F_{t3} = 8 \cdot (380 \cdot 9,81) = 29822$

Jestliže máme konstantní zrychlení, je logické, že se v každém traťovém úseku s odlišným redukováným sklonem bude měnit i potřebná síla F_s . Hodnoty této síly jsou přehledně uvedeny v tabulce č.16.

Tabulka 16: Potřebná tažná síla v jednotlivých úsecích trati

ÚSEK TRATI	TAŽNÁ SÍLA F_s [N]
Úsek 1	$F_{s1} = m_l \cdot (1 + \rho_d) \cdot a + F_o + F_{t1} = 380000 \cdot (1 + 0,20) \cdot 0,5 + 14667 + 0 = 242667$
Úsek 2	$F_{s2} = m_l \cdot (1 + \rho_d) \cdot a + F_o + F_{t2} = 380000 \cdot (1 + 0,20) \cdot 0,5 + 14667 + 35265 = 277932$
Úsek 3	$F_{s3} = m_l \cdot (1 + \rho_d) \cdot a + F_o + F_{t3} = 380000 \cdot (1 + 0,20) \cdot 0,5 + 14667 + 29822 = 272489$

Z tabulky č. 16 a z délky jednotlivých úseků můžeme spočítat mechanickou práci.

$$W = (F_{s1} \cdot x_1) + (F_{s2} \cdot x_2) + (F_{s3} \cdot x_3) = (242667 \cdot 300) + (277932 \cdot 300) + (272489 \cdot 511) = 295421kJ$$

Po převedení:

$$W = 295421 kJ = 295421kWs = 82 kWh$$

Z výsledku vyplývá, že pro náš modelový příklad rozjezdu lokomotivy na rychlost 120 km/h na popsaném úseku kolejové trati bude spotřeba elektrické energie 82 kWh. Kapacita akumulátoru musí tedy mít minimálně tuto hodnotu. Pokud bychom požadovali výslednou hodnotu v Ah, je potřeba znát napětí systému lokomotivy. Skutečná spotřeba lokomotivy je samozřejmě vyšší, jelikož ve výpočtech nebyla započítána účinnost lokomotivy a další negativní vlivy, jako je třeba stav kolejí. [67] [58] [68]

Závěr

V prvním bodě teoretické části mé práce jsem vytvořil přehled neznámějších akumulátorů, které mají své použití v trakčních aplikacích. Každý jednotlivý typ jsem podrobně zhodnotil z hlediska konstrukce, vlastností a vyjmenoval neznámější využití. U každého typu jsem na závěr uvedl nejzásadnější výhody a nevýhody v podobě přehledné tabulky. Z první kapitoly, celkového uceleného přehledu akumulátorů, je tedy možné určit typ akumulátoru pro určitou aplikaci. Největší zaměření v první kapitole věnuju lithiovým akumulátorům. Ty představují kapacitně nejvýkonnější systémy, a tudíž pro budoucnost akumulace elektrické energie jsou nejperspektivnější volbou. V druhém bodě bakalářské práce jsem vybral nejvhodnější akumulátor pro elektromobil, stacionární akumulární stanici a akumulátorovou lokomotivu. U těchto aplikací jsem zjistil, že ne vždy je právě použití lithiových akumulátorů vhodné. U elektromobilu jsem dle kritérií, které jsou kladeny na akumulátor, vybral jako nejvhodnější lithiový akumulátor a ke stejnému výběru akumulátoru jsem se dopracoval i u stacionární akumulární stanice. Použití olověného akumulátoru se jeví jako nejvhodnější volba u akumulátorové lokomotivy. V poslední praktické části bakalářské práce jsem realizoval předešlé poznatky a zaměřil se na správný výběr akumulátoru z hlediska kapacity pro zvolené aplikace. Jako první aplikace byl zvolen elektromobil. Nejdříve jsem si zadal všechny potřebné parametry, které jsem odvodil z reálných parametrů elektromobilů. Následně jsem sepsal fyzikální rozbor neboli jízdní odpory elektromobilu. Díky tomu jsem se mohl dopočítat k potřebnému výkonu, který musím překonat, abych docílil požadovaného dojezdu, z čehož plyne potřebná kapacita akumulátoru. Druhou aplikací pro výpočet akumulátoru byl zvolen ostrovní systém s fotovoltaickými panely. V tomto případě jsem vybral modelový rodinný dům s určitými spotřebiči a následně vypočítal celkový denní odběr energie. Kapacita akumulátoru byla spočítána tak, aby plně pokryla celkový odběr spotřebičů po dobu jednoho dne. Jako poslední aplikace jsem zvolil modelovou akumulátorovou lokomotivu. U této aplikace, podobně jako u elektromobilu, jsem si nejprve zvolil parametry lokomotivy a tratě, provedl fyzikální rozbor a následně vypočítal potřebný výkon pro dosažení požadované rychlosti.

Literatura

1. **Cieslar, Stanislav.** AKUMULACE elektrické energie #1 [video]. *O akumulaci elektrické energie s profesorem Vondrákem*. [Online] Elekrika.tv, 2012. [Citace: 18. únor 2013.] <http://www.allforpower.cz/clanek/o-akumulaci-elektricke-energie-s-profesorem-vondrakem/>.
2. Voltaic pile with slovak description. *www.wikipedie.cz*. [Online] 25. květen 2008. [Citace: 5. leden 2013.] http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Voltaic_pile_sk.png.
3. **BATTEX, spol. s r.o.** Trocha historie. *www.battex.cz*. [Online] BATTEX, spol. s r.o. [Citace: 20. únor 2013.] <http://www.battex.info/elektrochemicke-zdroje-proudu-obecne/trocha-historie>.
4. History of the battery. *www.en.wikipedia.org/*. [Online] Wikipedia. [Citace: 22. únor 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_battery.
5. **Marconi.** Skoro vše o akumulátorech a nabíjení. *www.cezeta487.ic.cz/*. [Online] 20. prosinec 2008. [Citace: 18. únor 2013.] <http://www.cezeta487.ic.cz/Documents/akumulatory.pdf>.
6. **Růžička, Lukáš a Ducháček, Jarda.** Akumulátor. *www.motorkari.cz*. [Online] Motorkáři.cz, 25. duben 2005. [Citace: 18. únor 2013.] <http://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/akumulator-3031.html>.
7. Lead–acid battery. *www.en.wikipedia.org/*. [Online] Wikipedia. [Citace: 27. únor 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery.
8. **Šimoník, Petr.** Palubní síť, systémy pro řízení provozu palubních akumulátorů, řízení napětí palubní sítě. *Automobilová elektronika (Bc.) - přednáška 2*. Ostrava : Katedra elektroniky, FEI, VŠB - TU Ostrava, 2009.
9. **BPS Průmyslové Služby, s.r.o.** Trakční baterie midac PzS. <http://www.midac.cz>. [Online] 2012. [Citace: 13. leden 2013.] <http://www.midac.cz/baterie/trakcni>.
10. **Yuasa.** Yuasa AGM Battery Cutaway. *www.yuasabatteries.com*. [Online] 2013. [Citace: 25. leden 2013.] <http://www.yuasabatteries.com/cutaways.php?action=cutaway&id=1>.
11. **Hammerbauer, Jiří.** Olověné akumulátory. *www.renerga.cz*. [Online] [Citace: 26. únor 2013.] <http://www.renerga.cz/content/file/AKUMUL%C3%81TORY%20TEORIE%202.PDF>.
12. **Hnilica, Pavel.** Akumulátory pro měniče napětí. *www.menice-napeti.cz*. [Online] 2010. [Citace: 26. únor 2013.] <http://www.menice-napeti.cz/akumulatory-pro-menice-napeti.html>.
13. Olověné baterie. *www.elektromobil.vseznamu.cz*. [Online] 2010. [Citace: 26. únor 2013.] <http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech/oloveny-akumulator>.
14. **Krejčí, František.** Akumulátory. *www.elektrika.cz*. [Online] 18. únor 2010. [Citace: 27. únor 2013.] <http://elektrika.cz/data/clanky/akumulatory>.
15. **Woodbank Communications.** Electropedia - Battery and Energy Technologies. *www.mpoweruk.com*. [Online] Woodbank Communications, 2005. [Citace: 1. únor 2013.] http://www.mpoweruk.com/images/lg_cylindrical.gif.
16. Nickel–cadmium battery. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 2. březen 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium_battery.
17. NiCd akumulátory. *www.battex.info*. [Online] BATTEX, spol. s r.o., 2009-2013. [Citace: 1. březen 2013.] <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory>.
18. NiCd akumulátor. *www.elektromobil.vseznamu.cz*. [Online] 2010. [Citace: 2. březen 2013.] <http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech/nicd-akumulatory>.

19. Jak na baterie NiCd a NiMH. *www.cettra.cz*. [Online] CETTRA, s. r. o, 2006-2008. [Citace: 3. březen 2013.] <http://www.cettra.cz/vysilacky-radiostanice/MOTOROLA/Baterie-NiCd,-NiMH-.../Jak-na-baterie/20>.
20. Bateie na bázi Ni-MH. *www.powerwiki.cz*. [Online] [Citace: 5. únor 2013.] <http://www.powerwiki.cz/attach/APE/elch64.pdf>.
21. **DVOHAPER & Elektromobil company**. Nickel-Metal Hydride baterie od firmy Matsushita Battery Industrial - Panasonic. *www.electroauto.cz*. [Online] DVOHAPER & Elektromobil company, 2005. [Citace: 10. únor 2013.] <http://www.electroauto.cz/toyota.html>.
22. **Dexter, Paul**. When Hybrid Batteries Die. *www.automotive-fleet.com*. [Online] Government Fleet - WebXclusive, duben 2009. [Citace: 3. březen 2013.] <http://www.automotive-fleet.com/channel/green-fleet/article/story/2009/04/when-hybrid-batteries-die.aspx?prestitial=1>.
23. NiMH akumulátory. *www.battex.info*. [Online] BATTEX, spol. s r.o., 2009-2013. [Citace: 4. březen 2013.] <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nimh-akumulatory>.
24. **Horčík, Jan**. Toyota zůstane u NiMH baterií. *www.hybrid.cz*. [Online] 22. prosinec 2010. [Citace: 1. únor 2013.] <http://www.hybrid.cz/clanky/toyota-zustane-u-nimh-baterii>.
25. Nejmenší Toyota Prius upravená od TRD. *www.tuzing.cz*. [Online] [Citace: 11. únor 2013.] <http://tuzing.cz/nejmensi-toyota-prius-upravena-od-trd/>.
26. Jak funguje Toyota Prius. *www.baracudaj.blog.cz*. [Online] Ringier Axel Springer CZ a.s., 13. srpen 2008. [Citace: 26. únor 2013.] <http://baracudaj.blog.auto.cz/2008-08/hybridni-automobily-3-jak-funguje-toyota-prius/>.
27. **Vondrák, Jiří a Sedlaříková, Marie**. Baterie - minulost, současnost a perspektivy. *www.odbornecasopisy.cz*. [Online] září 2012. [Citace: 5. březen 2013.] http://odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/Perspektivy_elektromobility_AMPER_2012/09-Vondrak_VUT_Baterie_elektromobily.pdf.
28. **Horký, Petr**. Na Cínovci se zřejmě začne opět těžit lithium. *www.zpravy.e15.cz*. [Online] Mladá fronta a. s, 20. Červenec 2012. [Citace: 27. březen 2013.] <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/na-cinovci-se-zrejme-zacne-opet-tezit-lithium-834320>.
29. **Vokáč, Luděk**. Lithia máme dost pro baterky 10 miliard elektromobilů, je ale v nejistých zemích. *www.auto.idnes.cz/*. [Online] MAFRA a.s., 3. Září 2010. [Citace: 27. Březen 2013.] http://auto.idnes.cz/lithia-mame-dost-pro-baterky-10-miliard-elektromobilu-je-ale-v-nejistych-zemich-1xb-/automoto.aspx?c=A100826_190836_automoto_vok.
30. **Lázňovský, Matouš**. *www.ekonom.ihned.cz/ Nasolený poklad*. [Online] Economia, a.s, 6. Leden 2011. [Citace: 27. Březen 2013.] <http://ekonom.ihned.cz/c1-49224590-nasoleny-poklad>.
31. **Hradil, Ivo**. Lithia je dostatek, tvrdí vědci z Fordu a Michiganské univerzity. *www.hybrid.cz*. [Online] Chamanne s.r.o., 9. Srpen 2011. [Citace: 27. Březen 2013.] <http://www.hybrid.cz/lithia-je-dostatek-tvrdi-vedci-z-fordu-michiganske-univerzity>. ISSN 1802-5323.
32. Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část) - Úvod, historie lithiových akumulátorů. *www.extranotebook.cnews.cz*. [Online] Extra Publishing, s. r. o., 15. duben 2011. [Citace: 6. březen 2013.] <http://extranotebook.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1cast>. ISSN 1804-9907.
33. Historie Li-akumulátory. *www.battex.info*. [Online] BATTEX, spol. s r.o., 2009-2013. [Citace: 12. březen 2013.] <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/historie>.

34. Lithiové akumulátory. *www.cettra.cz*. [Online] CETTRA, s. r. o., červenec 2004. [Citace: 15. březen 2013.] <http://www.cettra.cz/vysilacky-radiostanice/MOTOROLA/Baterie-NiCd,-NiMH-.../Co-s-Li-Ion-clanky/22>.
35. **Vondrák, Jiří a Sedlaříková, Marie.** Baterie pro elektromobily - minulost, současnost a perspektivy. *www.odbornecasopisy.cz*. [Online] březen 2012. [Citace: 12. březen 2013.] http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2012/13/Elektro_13_2012_output/web/flipview_erxpress.html?pn=10. ISSN 1210-0889.
36. Li-ion baterie: principy, provoz, rady (2.část). *www.extranotebook.cnews.cz*. [Online] Extra Publishing, s. r. o., 20. duben 2011. [Citace: 26. březen 2013.] <http://extranotebook.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-2cast>.
37. Mastervolt - The power to be independent. *www.mastervolt.cz*. [Online] 7. září 2010. [Citace: 118. březen 2013.] <http://www.mastervolt.cz/mastervolt-cz/eshop/16-1-Baterie-Mastervolt/0/5/215-Li-Ion-baterie-Mastervolt-MLI-24-160>.
38. **Gale, Zach.** Electric Deal: Certain Nissan Leaf Dealers Offering Nearly \$10,000 in Lease Cash Incentives. *www.wot.motortrend.com/*. [Online] MotorTrend Magazine, 21. prosinec 2012. [Citace: 1. duben 2013.] <http://wot.motortrend.com/electric-deal-certain-nissan-leaf-dealers-offering-nearly-10000-in-lease-cash-incentives-308223.html#axzz2PPNAqILq>.
39. Nissan's Leaf up close. *www.money.cnn.com/*. [Online] Cable News Network, 17. únor 2010. [Citace: 1. duben 2013.] http://money.cnn.com/galleries/2010/fortune/1002/gallery.nissan_leaf.fortune/index.html.
40. Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část) - Klady a zápory lithiových akumulátorů. *www.extranotebook.cnews.cz/*. [Online] Extra Publishing, s. r. o., 15. duben 2011. [Citace: 2. duben 2013.] <http://extranotebook.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1cast/strana/0/1>. ISSN 1804-9907.
41. Abeceda baterií a akumulátorů - Základní charakteristiky. *www.battex.info/*. [Online] BATTEX, spol. s r.o. [Citace: 2. duben 2013.] <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/zakladni-charakteristiky>.
42. Elektromobily informace - Li-Ion baterie. *www.elektromobil.vseznamu.cz/*. [Online] 2010. [Citace: 2. duben 2013.] <http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech/li-ion-akumulatory>.
43. **Richter, Pavel.** Malý fotovoltaický ostrovní systém – akumulátor a úschova energie. *www.pavelrichter.net*. [Online] 20. duben 2010. [Citace: 11. duben 2013.] <http://pavelrichter.net/>.
44. LiFePO4 akumulátory. <http://elektromobil.vseznamu.cz/>. [Online] 2010. [Citace: 5. duben 2013.] <http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech/lifepo4-akumulatory>.
45. **Ježek, David.** LiFePO4 - akumulátorový zázrak míří i do tužkových baterek! *www.diit.cz/*. [Online] CD-R server s.r.o., 9. září 2011. [Citace: 5. duben 2013.] <http://diit.cz/clanek/lifepo4-akumulatorovy-zazrak-miri-i-do-tuzkovych-baterek>. ISSN 1213-2225.
46. I10 ELECTRIC – ELEKTROMOBIL BLUE DRIVE. <http://www.hyundai.cz/>. [Online] Hyundai Motor Czech s.r.o., 14. září 2009. [Citace: 5. duben 2013.] <http://www.hyundai.cz/ospolecnosti/tiskove-zpravy/2009/i10-electric-elektromobil-blue-drivetm.html>.
47. **Pavlis, Jakub.** Li-Pol akumulátory - proč se nejpokročilejší technologie neprosazuje? *www.notebook.cz/*. [Online] Viktor Péder, 22. červen 2011. [Citace: 5. duben 2013.] <http://notebook.cz/clanky/technologie/2011/Li-Pol-akumulatory>. ISSN 1214-2875.

48. **Zandl, Patrick.** Nové trendy v bateriích: Lithium-Polymer. *www.mobil.idnes.cz*. [Online] MAFRA a.s., 4. Květen 1999. [Citace: 5. Duben 2013.] http://mobil.idnes.cz/nove-trendy-v-bateriich-lithium-polymer-fd2-/telefony.aspx?c=990504_0001013_mob_prakticky.
49. Ostrovní dům. *www.ostrovnidum.cz*. [Online] [Citace: 9. Duben 2013.] http://www.ostrovnidum.cz/index.php?s=texty&o=fve_ostrovní_system.
50. Olověné baterie pro ostrovní systémy. <http://www.recenze-produktu.cz/>. [Online] [Citace: 10. Duben 2013.] <http://www.recenze-produktu.cz/clanky-olovene-baterie-pro-ostrovní-systemy.html>.
51. Staniční baterie - akumulátory pro záložní napájení systémů. <http://www.fg-forte.cz/>. [Online] fgFORTE s.r.o. [Citace: 10. Duben 2013.] <http://www.fg-forte.cz/cz/kategorie/186-stanicni-baterie.aspx>.
52. Jaké jsou provozní náklady elektromobilu? *www.eon.energieplus.cz/*. [Online] © E.ON Česká republika, s.r.o. [Citace: 13. Duben 2013.] <http://eon.energieplus.cz/ekologicka-doprava/elektromobily/jake-jsou-provozni-naklady-elektromobilu->
53. Baterie v elektromobilech. *www.elektromobil.vseznamu.cz/*. [Online] [Citace: 13. Duben 2013.] <http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech>.
54. **Beaverton Hyundai.** New Hyundai Cars: The 'Electrifying' New BlueOn. <http://www.beavertonhyundaiblog.com/>. [Online] Beaverton Hyundai Blog, 10. Září 2010. [Citace: 13. Duben 2013.] <http://www.beavertonhyundaiblog.com/new-hyundai-cars-the-electrifying-new-blueon/>.
55. Frankfurt IAA 2009. *www.autoconcept-reviews.com/*. [Online] 2009. [Citace: 13. Duben 2013.] http://www.autoconcept-reviews.com/motor_shows/frankfurt-iaa-electric-2009/events_frankfurt-iaa-electric-2009.html.
56. **Janda, Martin.** Změní hybridní lokomotivy svět dopravy? *www.21stoleti.cz*. [Online] RF-Hobby s.r.o, 19. Říjen 2007. [Citace: 15. Duben 2013.] <http://21stoleti.cz/blog/2007/10/19/zmeni-hybridni-lokomotivy-svet-dopravy/>.
57. **Kunz, Daniel.** Czech Raildays 2012: ukázal se RegioPanter, nechyběla ani hybridní lokomotiva. *www.hybrid.cz/*. [Online] Chamanne s.r.o., 22. Červen 2012. [Citace: 15. Duben 2013.] <http://www.hybrid.cz/czech-raildays-2012-ukazal-se-regiopanter-nechybela-ani-hybridni-lokomotiva>. ISSN 1802-5323.
58. **Kupec, Tomáš.** *Modelování provozních stavů akumulátorových*. Ostrava : Bakalářská práce, 2012. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroniky.
59. Kolejové tahače a lokomotivy KT. *www.arrowline.cz*. [Online] Arrow line, a.s. [Citace: 16. Duben 2013.] <http://www.arrowline.cz/kolejova-vozidla-tahace.html#lokomotivy>.
60. Solární fotovoltaické ostrovní elektrárny. *www.solar.elant.cz*. [Online] [Citace: 19. Duben 2013.] <http://solar.elant.cz/>.
61. **Hnilica, Pavel.** Trakční baterie (akumulátor) pro ostrovní fotovoltaické elektrárny. *www.solarnimoduly.cz*. [Online] [Citace: 19. Duben 2013.] <http://www.solarnimoduly.cz/jaky-akumulator.html>.
62. **Rábl, Tomáš.** *Využití energie z fotovoltaických článků pro dům a zahradu*. Ostrava : Bakalářská práce, 2009. VŠB- Technická univerzita Ostrava, Hornicko - geologická fakulta-Institut ekonomiky a systému řízení.

63. **Vaculík, Petr.** *Zdrojové struktury pohonných jednotek hybridních vozidel.* Ostrava : Disertační práce, 2011. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroniky.
64. Siemens Drive Motor. *www.metricmind.com.* [Online] Metric Mind Corporation. [Citace: 21. Duben 2013.] <http://www.metricmind.com/wp-content/uploads/2011/09/1pv5135-4ws28.pdf>.
65. Evisol ThoRR - konkurence pro elektromobil Tesla Roadster? *www.hybrid.cz.* [Online] Chamanne s.r.o., 2. Květen 2008. [Citace: 22. Duben 2013.] <http://www.hybrid.cz/novinky/envisol-thorrr-konkurence-pro-elektromobil-tesla-roadster>. ISSN 1802-5323.
66. **Příkryl, Karel.** *Návrh dálničního osobního vozidla na elektrický pohon.* Brno : Diplomová práce, 2011. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav automobilového a dopravního inženýrství.
67. **Zítka, Martin.** Co spotřebuje vagón? *www.vagony.cz.* [Online] [Citace: 24. Duben 2013.] <http://www.vagony.cz/vagony/energie.html>.
68. **Navrátil, Jiří.** *Vliv vozidlové odporu na trakční výpočty.* Pardubice : Bakalářská práce, 2011. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
69. **Sealed Performance Batteries.** Battery Construction AGM. *www.sealedperformance.com.* [Online] 2013. [Citace: 30. leden 2013.] http://www.sealedperformance.com.au/power_sonic_battery_construction.
70. **Firneis, Christian.** Lithium. *http://www.chemische-experimente.com.* [Online] [Citace: 28. březen 2013.] <http://www.chemische-experimente.com/Lithium.htm>.
71. Baterie na plný plyn. *www.fg-forte.cz.* [Online] fgFORTE s.r.o. [Citace: 4. Duben 2013.] <http://www.fg-forte.cz/cz/kategorie/technicke-informace.aspx>.
72. **Kejdana, Jiří.** Atlas lokomotiv. *www.atlaslokomotiv.net.* [Online] 21. Prosinec 2006. [Citace: 13. Duben 2013.] <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-114.html#fotogalerie>.
73. Hnací kolejová vozidla, energetika, projekce a inženýring. *www.arrowline.cz/.* [Online] Arrow line, a.s. [Citace: 15. Duben 2013.] <http://www.arrowline.cz/kolejova-vozidla-tahace.html#lokomotivy>.
74. Odpor zrychlení rotujících hmot. [Online] [Citace: 23. Duben 2013.] http://homen.vsb.cz/~sli95/mvd/mvd_zry.htm.

Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1: Schématické znázornění Voltova sloupu (upraveno autorem) [2].....	13
Obrázek 2: Trakční údržbový olověný akumulátor Midac MF120 (bez údržby 120 cyklů) [9]	17
Obrázek 3:Znázornění olověného akumulátoru s použitou technologií AGM od firmy Yuasa (upraveno autorem) [10].....	19
Obrázek 4: Olověný gelový akumulátor od firmy fgFORTE, označení: 4OPzS200 [71].....	19
Obrázek 5: Konstrukce NiCd akumulátoru válcového tvaru (upraveno autorem) [15].....	21
Obrázek 6: Konstrukce hermetického NiMH článku [20].....	23
Obrázek 7: Zjednodušená konstrukce NiMH od firmy Matsushita Battery Industrial – Panasonic (upraveno autorem) [21].....	24
Obrázek 8: Hybridní automobil Toyota Prius a NiMH akumulátor z téhož automobilu [25] [26].....	25
Obrázek 9: Prvek lithium a jeho řez (upraveno autorem) [70].....	26
Obrázek 10: Pohyb iontu Li ⁺ při vybíjení a nabíjení (upraveno autorem) [32]	27
Obrázek 11: Konstrukce Li-Ion článku [34]	28
Obrázek 12: Schéma procesu interkalace iontů do krystalové struktury grafitu [35]	29
Obrázek 13: Ochranné obvody u každého článku Li-ion akumulátoru od firmy Mastervolt [37]	30
Obrázek 14: Elektrický automobil Nissan Leaf, který používá akumulátor typu Li-ion (upraveno autorem) [38] [39].....	31
Obrázek 15: Články LiFeYPO ₄ , napětí 3.2V a nominální kapacita 40Ah [43].....	33
Obrázek 16: Znázornění konstrukce Li-Pol článku (upraveno autorem) [34].....	35
Obrázek 17: Zjednodušené schéma ostrovní elektrárny [49].....	37
Obrázek 18: Hyundai i10 electric BleuOn a jeho zjednodušená konstrukce (upraveno autorem) [54] [55].....	43
Obrázek 19: Akumulátorová lokomotiva 710.201-5 (A 314) [73]	44
Obrázek 20: Energetická hustota akumulátorů (upraveno autorem) [35].....	47
Obrázek 21: Zjednodušené schéma fotovoltaického ostrovního systému s možností dodávky elektrické energie z veřejné sítě (upraveno autorem) [60].....	50
Obrázek 22: Odporové síly působící na vozidlo během jízdy [63].....	51
Obrázek 23: Rozklad sil odporu stoupání [63]	53
Obrázek 24: Hnací síla a potřebný výkon pro překonání jízdních odporů [63]	56
Obrázek 25: Elektromobil Evisol Thorr a z téhož automobilu elektromotor Siemens (upraveno autorem) [64] [65].....	59
Obrázek 26: Složka jízdního odporu z tření v ložiskách (upraveno autorem) [58].....	62
Obrázek 27: Souřadný systém pro aerodynamická měření momentů a sil [58].....	63
Obrázek 28: Měrný vozidlový odpor.....	69
Obrázek 29: Profil kolejové trati	70

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Výhody a nevýhody olověného akumulátoru</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 2: Výhody a nevýhody nikl-kadmiového akumulátoru</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 3: Výhody a nevýhody nikl-metal hydridového akumulátoru</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 4: Výhody a nevýhody Li-ion akumulátoru</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 5: Výhody a nevýhody LiFePO4 akumulátoru</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 6: Výhody a nevýhody Li-Pol akumulátoru</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 7: Srovnání provozních nákladů [52]</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 8: Průměrná spotřeba rodinného domu</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 9: Hodnoty aerodynamického koeficientu a čelní plochy vozidla [63]</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 10: Součinitel valivého odporu [63]</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 11: Trakční odpory rozdělené podle místa jejich vzniku [58]</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 12: Některé hodnoty součinitele rotujících hmot [67]</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 13: Rovnice měrného vozidlového odporu některých řad hnacích kolejových vozidel [68]</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 14: Rovnice měrného odporu vozů [67]</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 15: Přehled vypočítaných traťových odporů</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 16: Potřebná tažná síla v jednotlivých úsecích trati</i>	<i>71</i>