

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Dimenzování trakčních baterií pro vozidla MHD

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav SCHWARZ**
Osobní číslo: **E10N0017K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Dimenzování trakčních baterií pro vozidla MHD**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Výběr baterií vhodných pro použití v trakčních vozidlech.
2. Popis fyzikálních veličin a vlivů, které se podílejí na životnosti baterií.
3. Stanovení a popis postupu včetně kvantifikace při dimenzování trakčních baterií pro vozidla MHD.
4. Tvorba algoritmů (případně programu, není povinný) pro dimenzování baterií.
5. Výběr v současnosti nejoptimálnější varianty baterie pro trakční použití.
6. Zhodnocení dosažených výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- 1. Katalogy výrobců komponent měničů a baterií**
- 2. Firemní literatura ŠKODA**
- 3. Odborné články**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Dr. Ing. Jiří Flajtingr**
Škoda Electric, Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku výběru vhodných trakčních baterií pro vozidla MHD, popisuje fyzikální veličiny a vlivy podílející se na životnosti baterií a stanovuje postup při dimenzování trakčních baterií, včetně výběru neoptimálnější varianty baterie pro použití v elektrické trakci.

Klíčová slova

Trakční baterie, dimenzování baterií, akumulace energie, životnost baterií, rekuperace, elektrické vozidlo

Abstract

Dimensioning of the traction batteries for vehicles by public transport

Master's thesis is focused on the selection of suitable batteries for vehicles, public transport, and describes the effects of physical variables involved in the life battery and establishes the procedure for dimensioning of traction batteries, including the selection of optimal variants of batteries for traction applications.

Key words

Traction batteries, battery dimensioning, energy storage, battery life, recuperation, pure electric vehicle

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 1. 5. 2012

Bc. Jaroslav Schwarz

.....

Poděkování

Tento prostor bych rád věnoval poděkování všem vyučujícím Západočeské univerzity v Plzni, kteří mě během studia vedli a předávali mi znalosti a nové zkušenosti.

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Flajtingrovi za konzultace, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VÝBĚR BATERIÍ PRO POUŽITÍ V TRAKČNÍCH VOZIDLECH	13
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY.....	13
1.1.1 Elektrochemický článek.....	13
1.1.2 Baterie.....	13
1.1.3 Jmenovité napětí.....	14
1.1.4 Jmenovitá kapacita.....	14
1.1.5 Účinnost cyklu.....	14
1.1.6 Samovybití.....	14
1.1.7 Specifická charakteristika.....	14
1.1.8 Životnost.....	15
1.2 AKUMULÁTORY ENERGIE.....	15
1.2.1 Olověná baterie.....	15
1.2.2 NiCd baterie.....	16
1.2.3 NiMH baterie.....	17
1.2.4 Li-Ion baterie.....	17
1.2.5 Li-Pol baterie.....	18
1.2.6 Li-FePO ₄ a Li-FeYPO ₄ baterie.....	19
1.2.7 Superkapacitory.....	19
2 FYZIKÁLNÍ VELIČINY A SKUTEČNOSTI OVLIVŇUJÍCÍ ŽIVOTNOST BATERIÍ	21
2.1 VLIV PRACOVNÍ TEPLoty.....	21
2.2 VLIV VELIKOSTI VYBÍJECÍHO PROUDU.....	22
2.3 VLIV VELIKOSTI NABÍJECÍHO NAPĚTÍ.....	23
2.4 VLIV HLOUBKY VYBITÍ.....	23
2.5 VLIV TECHNOLOGIE.....	25
2.6 VLIV SKLADOVÁNÍ.....	25
3 DIMENZOVÁNÍ TRAKČNÍCH BATERIÍ	26
3.1 CELKOVÁ ENERGETIKA BATERIOVÉHO VOZIDLA.....	26
3.1.1 Jízdní cykly.....	27
3.1.2 Stálé spotřeby.....	27
3.1.3 Ztráty.....	29
3.2 VÝCHOZÍ PŘEDPOKLADY A PODMÍNKY PRO DIMENZOVÁNÍ TRAKČNÍCH BATERIÍ.....	34
3.2.1 Korekce pro zajištění životnosti.....	34
3.2.2 Projekční rezerva.....	35
3.2.3 Omezení maximální hmotností baterií.....	35
3.3 DIMENZOVÁNÍ TRAKČNÍCH BATERIÍ BEZ DOBÍJENÍ BĚHEM DENNÍHO JÍZDNÍHO CYKLU. ALGORITMY PRO DIMENZOVÁNÍ.....	35
3.4 DIMENZOVÁNÍ TRAKČNÍCH BATERIÍ S RYCHLODOBÍJENÍM NA KONEČNÝCH ZASTÁVKÁCH. ALGORITMY PRO DIMENZOVÁNÍ.....	37
3.4.1 Strategie dobíjení pro zvýšení životnosti trakčních baterií.....	39
4 PŘÍKLAD VÝPOČTU DIMENZOVÁNÍ TRAKČNÍCH BATERIÍ PRO REÁLNÝ DENNÍ CYKLUS	40
4.1 VSTUPNÍ PARAMETRY.....	40
4.1.1 Výpočet veličin a konstant potřebných pro další výpočty.....	41
4.1.2 Výpočet energie v jízdním cyklu SORT 2.....	41
4.1.3 Dimenzování trakčních baterií bez dobíjení během jízdního dne.....	47
4.1.4 Dimenzování trakčních baterií s dobíjením na konečných zastávkách.....	48

4.2	PROGRAM PRO VÝPOČET DIMENZOVÁNÍ TRAKČNÍCH BATERIÍ	49
4.2.1	<i>Systémové požadavky</i>	49
4.2.2	<i>Stručný popis programu</i>	49
4.2.3	<i>Zadávání dat</i>	50
4.2.4	<i>Výstup programu</i>	51
5	VÝBĚR NEJOPTIMÁLNĚJŠÍ VARIANTY TRAKČNÍ BATERIE	53
5.1	KRITÉRIA VÝBĚRU TRAKČNÍ BATERIE.....	53
5.2	VÝBĚR TRAKČNÍ BATERIE	53
6	ZÁVĚR.....	55
	POUŽITÁ LITERATURA	57

Úvod

Akumulace elektrické energie je trendem současné doby, ve které stále rostoucí nároky na její spotřebu jsou spojeny s velmi rychlým zvyšováním její ceny. V neposlední řadě je to i důsledkem její „ekologické“ výroby, na kterou jsou vyvozovány tlaky z hlediska omezování produkovaných emisí. V elektrické trakci tedy vzniká požadavek snížení její spotřeby. Ke splnění tohoto požadavku vedou dva hlavní směry technických řešení. První je konstrukce nových technologií pohonů s podstatně menší energetickou náročností. Druhý směr je vydanou energii při rozjezdu s určitou účinností získat zpět, k čemuž je zapotřebí vhodný energetický akumulátor. Existují různé metody akumulace energie, například pomocí energie elektrického nebo magnetického pole. Dalším způsobem je tradiční metoda využívající elektrochemické přeměny – akumulátorů. Problémem tohoto způsobu ukládání je dlouhá doba probíhání chemického procesu, která brání okamžitému vstřebání poměrně velkého množství energie. Určitým omezením je malá hmotnostní a objemová energetická hustota. V oblasti vývoje akumulátorů došlo v poslední době k výraznému zlepšení těchto parametrů, zejména u akumulátorů na bázi Lithia (Li-Ion, Li-Pol akumulátory).

Existují také další metody pro ukládání energie, například ve formě kinetické energie setrvačníku. U všech výše zmíněných metod dochází k uložení prostřednictvím přeměny energie z jedné formy do druhé, přičemž sehrává důležitou úlohu účinnost této přeměny.

Práce obsahuje šest hlavních částí; první popisuje baterie vhodné pro akumulaci energie v trakčních vozidlech, druhá popisuje fyzikální veličiny a vlivy ovlivňující životnost baterií, v třetí části je stanoven postup při dimenzování trakčních baterií pro vozidla MHD. Čtvrtá část obsahuje příklad výpočtu a popis programu pro dimenzování baterií, v páté části je proveden výběr neoptimálnější varianty baterie pro trakční použití, v závěrečné části je provedeno zhodnocení dosažených výsledků.

S vedoucím práce bylo dohodnuto, že algoritmy dimenzování trakčních baterií budou vytvořeny pro čistě bateriovébusy.

Seznam symbolů a zkratk

a	Zrychlení vozidla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
a, b, c	Konstanty jízdních odporů vozidla [-]
C	Kapacita trakční baterie [Ah]
C_N	Jmenovitá kapacita baterie [Ah]
e_m	Hustota energie [$\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$]
E	Energie (elektrická práce) [$\text{J} = \text{Ws}$]
E_{BAT}	Energie dimenzované baterie [Wh]
E_{BCZ}	Celková energie akumulovaná trakční baterií během životnosti [Wh]
E_r	Rotační kinetická mechanická energie [J]
E_{SS}	Energie spotřebovaná stálými spotřebiči [Wh]
E_{SUMI}	Celková spotřeba energie mezi jednotlivými dobíjenými [Wh]
F_N	Normálová síla [N]
F_O	Celkový jízdní odpor [N]
F_S	Odpor stoupání trati [N]
F_{TR}	Trakční síla na obvodu kola [N]
F_V	Vozidlový odpor [N]
g	Tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
G_V	Tíha vozidla [N]
G_{Vk}	Tíha vozidla [kN]
h	Převýšení [m]
h_{DOD}	Hloubka vybíjecího cyklu [%]
J	Moment setrvačnosti rotujících částí [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
k	Směrnice změny rychlosti v čase [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
k_{DOD}	Koeficient hloubky vybíjecího cyklu [-]
k_J	Koeficient navýšení pohotovostní hmotnosti [-]
k_{PKP}	Koeficient poklesu kapacity trakční baterie [-]
k_{REP}	Koeficient projekční rezervy [-]
l	Délka stoupání [m]
m_{BAT}	Hmotnost dimenzované trakční baterie [kg]
m_E	Ekvivalentní hmotnost vozidla [kg]
m_{MAX}	Maximální povolená hmotnost trakční baterie [kg]

m_{osob}	Střední hodnota hmotnosti přepravovaných osob [kg]
m_{poh}	Pohotovostní hmotnost vozidla [kg]
m_V	Celková hmotnost vozidla [kg]
n_{NAB}	Počet nabíjení během jízdního dne
n_{TMEZ}	Počet nabíjecích cyklů při mezní teplotě (45°C)
P_{24V}	Příkon palubní sítě 24 V DC [W]
P_{KLIM}	Příkon klimatizace [W]
P_{PP}	Příkon pomocných pohonů [W]
P_{SS}	Příkon stálých spotřebičů [W]
P_{TOP}	Příkon topení [W]
P_{TR}	Trakční výkon na obvodu kola [W]
s	Dráha [m]
$s\%$	Sklon trati (ve směru jízdy) [%]
t	Čas [s]
t_{RZIV}	Požadovaná životnost [rok]
T	Celková doba denního provozu [h]
T_C	Doba trvání jednoho cyklu [s]
U	Napětí trakční baterie [V]
U_N	Jmenovité napětí baterie [V]
v	Rychlost [m.s ⁻¹]
v_k	Rychlost [km.h ⁻¹]
W_{TR}	Trakční energie v jednom jízdním cyklu [J]
x_C	Násobek kapacity baterie
α	Úhel stoupání od vodorovné roviny [°]
ΔE	Celkové ztráty za dobu provozu (jízdní den) [Ws]
ΔE_{cykl}	Celkové ztráty za jeden cykl [Ws]
ΔE_{JOcycl}	Ztráty jízdními odpory za jeden cykl [Ws]
ΔE_{TRcycl}	Ztráty v trakčním řetězci za jeden cykl [Ws]
ΔW_{JOcycl}	Ztráty energie na jízdních odporech v jednom jízdním cyklu [Ws]
η_B	Účinnost trakční baterie [-]
η_C	Účinnost měniče [-]
η_M	Účinnost trakčního motoru [-]
η_G	Účinnost převodovky [-]

η_{TR}	Účinnost trakčního řetězce [-]
ω	Úhlová rychlost [rad.s ⁻¹]
BMS	System řízení baterie (B attery M anagement S ystem)
DOD	Hloubka vybití v % jmenovité kapacity [%] (D eep O f D ischarge)
SOC	Stav nabití v % jmenovité kapacity [%] (S tate O f C harge)

1 Výběr baterií pro použití v trakčních vozidlech

1.1 Základní pojmy

Názvosloví a základní definice v oblasti baterií upravuje norma ČSN IEC 60050–482. Ve smyslu této normy jsou uváděny následující základní pojmy. Jelikož se v praxi, ale i v některých publikacích či dokumentacích používá tradiční názvosloví, které se v některých případech liší od normalizovaného, je v následujícím textu pro usnadnění orientace uváděna i tato terminologie.

1.1.1 Elektrochemický článek

Elektrochemický též galvanický článek je soustava tvořená kladnou a zápornou elektrodou. Tyto elektrody jsou vzájemně odděleny separátory a jsou ve styku s vhodným iontově vodivým elektrolytem. Podle principu se elektrochemické články dále dělí do tří skupin:

- primární, články určené na jedno vybití
- sekundární, v těchto článcích probíhají obousměrné elektrochemické reakce, při kterých se elektrická energie přeměňuje na energii chemickou, kterou je možno v případě potřeby přeměnit zpět na elektrickou energii. Na základě těchto vlastností jsou vhodné pro akumulaci elektrické energie, odtud získali označení akumulátory.
- palivové

Záporná elektroda obsahuje aktivní hmotu, která při elektrochemické reakci působí jako reaktant, který při vybíjení článku oxiduje a uvolňuje elektrony.

Kladná elektroda aktivní hmotou je reaktant, na němž během vybíjení dochází k redukční reakci a přijímá uvolněné elektrony.

Separátor je materiál s propustnou strukturou pro ionty. Jedná se o pórovitý nebo perforovaný izolant, který vzájemně izoluje elektrody různé polarity.

Elektrolyt je látka kapalného nebo pevného skupenství s obsahem volných iontů. Iontovou vodivostí umožňuje průchod proudu mezi elektrodami.

1.1.2 Baterie

Baterie (akumulátorová baterie) je skupina dvou a více elektrochemických článků, které jsou vhodně spojeny.

Sériové zapojení je nejčastější a používá se pro dosažení napětí vyššího, než je

jmenovité napětí článku. Do série lze spojovat pouze články stejného typu, stáří a stejné jmenovité kapacity. Celkové napětí baterie je dáno součtem napětí jednotlivých článků. Kapacita zůstává nezměněna a odpovídá kapacitě jednoho článku.

Paralelním zapojením se zvyšuje kapacita baterie tolikrát, kolik článků je paralelně spojeno, napětí zůstává na hladině jednoho článku. Paralelně lze spojovat jen články stejného typu a se stejným jmenovitým napětím.

Séριο-paralelním spojením se dosáhne zvýšení jak kapacity, tak i napětí baterie. V sestavě se nejprve spojují jednotlivé články sériově, a poté se řady baterií spojí na koncích paralelně.

1.1.3 Jmenovité napětí

Jmenovité napětí článku U_N [V] hodnota používaná k označení článku, obvykle se jedná o zaokrouhlenou hodnotu středního vybíjecího napětí.

1.1.4 Jmenovitá kapacita

Jmenovitá kapacita C_N [Ah] – součin vybíjecího proudu a celkové doby vybíjení. Představuje hodnotu elektrického náboje, který lze v článku uložit, udává ji výrobce.

1.1.5 Účinnost cyklu

Energetická účinnost – poměr elektrické energie odebrané z baterie během vybíjení k elektrické energii dodané do baterie k obnovení počátečního stavu nabití.

1.1.6 Samovybíjení

Samovybíjení je ztráta kapacity baterie, která není připojena k vnějšímu elektrickému obvodu. Způsobují ho elektrochemické reakce uvnitř článku, vzrůstá se stoupající teplotou a je provázáno poklesem napětí naprázdno. Uvádí se v procentech jmenovité kapacity při pokojové teplotě 20°C až 23°C.

1.1.7 Specifická charakteristika

Specifická charakteristika elektrický parametr vztažený na jednotku mechanického parametru baterie (hmotnost nebo objem). Pro výběr trakčních baterií je to jeden z klíčových parametrů.

Měrná energie m_E [Wh.kg⁻¹] je množství elektrické energie [Wh], které lze získat z 1 kg hmotnosti akumulátoru.

Hustota energie [Wh.dm⁻³] odpovídá množství elektrické energie [Wh], které je možné získat z 1 dm³ objemu akumulátoru.

1.1.8 Životnost

Životnost baterie vyjadřuje dobu provozování baterie za stanovených podmínek. Je vymezena počtem cyklů (nabití a vybití) nebo dobou v rocích, kdy baterie dosahuje jmenovitých parametrů. Je závislá na konstrukci elektrod, teplotě okolí a způsobu provozu akumulátoru. Pokles kapacity pod 80 % jmenovité hodnoty je považován za konec životnosti baterie (pokud tomu nebrání provozní podmínky, lze baterii dále provozovat). Tento parametr, reprezentovaný zejména počtem cyklů, je významný při selekci trakčních baterií.

1.2 Akumulátory energie

Akumulátory jako zásobníky energie představují podstatnou součást pohonu elektrického nebo hybridního vozidla. Správný návrh akumulátorů je důležitý z několika hledisek. První oblastí výběru jsou ryze technické požadavky dané především typem elektrického pohonu, velikostí vozidla – tedy výkonem trakčních motorů, druhem provozu a v neposlední řadě náročností terénu, v němž bude vozidlo nejčastěji provozováno. Volba vychází především z požadované kapacity, nabíjecích a vybíjecích výkonů, hmotnosti a velikosti vozidla. Dalším významným hlediskem, které je potřeba při výběru zohlednit, jsou ekonomicko-technologické vlastnosti zejména pořizovací cena, náročnost údržby, životnost, spolehlivost, průběhy cyklů nabíjení a vybíjení, nebo také riziko poškození a celková bezpečnost provozu akumulátorů.

Trakční baterie – jsou speciálním druhem průmyslových akumulátorů, navržené pro hluboké vybíjení, mnohem méně podléhají opotřebením elektrod při častém nabíjení a vybíjení. Tyto baterie mají zesílené elektrody s těžkými mřížkami a přebytkem aktivního materiálu, které sice nejsou schopny dodat tak velký vybíjecí proud jako startovací baterie, ale vydrží časté a hluboké vybíjení. Používají se v aplikacích, kde se často opakují cykly nabíjení a vybíjení – trakční vozidla, hybridní vozidla, elektromobily, fotovoltaické systémy, atd.

Základní dělení akumulátorů je podle chemického složení a tomu odpovídajících vlastností.

1.2.1 Olověná baterie

Olověné baterie jsou nejstarší akumulátory energie, které se v dopravní technice používaly. Byly nasazeny v první polovině devadesátých let minulého století u prvních

hybridů, následně je vytlačily modernější typy akumulátorů. V současné době je jejich použití spíše výjimečné, vyskytují se jen v případech dožívajících elektromobilů a hybridů.

Hustota energie 30–50 Wh/kg, nabíjecí doba 2–5 hod., životnost až 400 nabíjecích cyklů, jmenovité napětí 2 V/článek, samovybíjení 5 % za měsíc, pracovní teplota –20°C až +50°C.

Výhody:

- elektrická robustnost
- příznivá cena

Nevýhody:

- velká hmotnost a rozměry
- dlouhá doba nabíjení
- malá životnost
- značná náročnost na údržbu
- kapacita prudce klesá s teplotou



Obr. 1.1 Olověná trakční baterie [18]

1.2.2 NiCd baterie

Nikl-kadmiové baterie znamenaly, v porovnání s olověnými články, výrazný pokrok, ale dnes jsou již překonané a v nových aplikacích trakčních pohonů se nepoužívají. Jeden z důvodů, proč také došlo k omezení jejich výroby je, že obsahují kadmium, které je klasifikováno jako látka škodlivá pro životní prostředí.

Hustota energie 50–80 Wh/kg, nabíjecí doba 1 hod., životnost až 1500 nabíjecích cyklů, jmenovité napětí 1,2 V/článek, samovybíjení 20 % za měsíc, pracovní teplota –40°C až +70°C.

Výhody:

- vyšší odolnost proti přebíjení a podvybití
- možnost odběru vysokých proudů (až 10C)
- velký rozsah pracovních teplot
- vysoká životnost



Obr. 1.2 Ni-Cd trakční baterie [19]

Nevýhody:

- paměťový efekt, projevující se snížením kapacity
- náhlý pokles napětí na konci vybíjení
- malá hustota energie vztažená na jednotku hmotnosti nebo objemu

1.2.3 NiMH baterie

Nikl-metal hydridový akumulátor našel uplatnění jako náhrada nikl-kadmiového akumulátoru, protože má větší hustotu energie vztaženou na jednotku hmotnosti nebo objemu a představuje menší zátěž pro životní prostředí. V dobách nedávno minulých byly nejvýznamnějším a nejrozšířenějším typem akumulátorů používaných v hybridních vozidlech, např. Toyota Prius. Dnes se však jako primární zdroj energie nebo pro trakční použití projektují jen výjimečně.

Hustota energie 60–110 Wh/kg, nabíjecí doba 2–3 hod., životnost 300–500 nabíjecích cyklů, jmenovité napětí 1,2 V/článek, samovybíjení 30 % za měsíc, pracovní teplota -30°C až $+50^{\circ}\text{C}$.

Výhody:

- středně velká hmotnostní i objemová kapacita
- malý paměťový efekt

Nevýhody:

- menší rozsah klimatických i mechanických odolností
- vyšší samovybíjení
- větší vnitřní impedance – menší proud, zvláště ve špičkových průbězích
- nízká účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu
- menší životnost



Obr. 1.3 Ni-MH trakční baterie [19]

1.2.4 Li-Ion baterie

Lithium-iontové baterie jsou v současnosti běžně používány ve spotřebitelské elektronice. Značný boom zaznamenaly i pro akumulaci elektrické energie v hybridních vozidlech. Přestože již nepředstavují nejmodernější a technicky nejvyspělejší řešení, jsou

stále ve středu zájmu konstruktérů a pravděpodobně tak zůstanou ještě několik let. Jsou použity v hybridních vozidlech Volvo, GM Chevrolet Volt, Formule 1 a TriHyBus.

Hustota energie až 200 Wh/kg, nabíjecí doba 1–3 hod., životnost 500–2000 nabíjecích cyklů, jmenovité napětí 3,7 V/článek, samovybíjení do 5 % za měsíc, pracovní teplota -20°C až $+40^{\circ}\text{C}$.

Výhody:

- velká hmotnostní i objemová kapacita
- vysoká účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu
- nemá paměťový efekt
- vysoké napětí na článek (3,7 V)

Nevýhody:

- ztrácí kapacitu s časem, bez ohledu na používání
- citlivá na vysoké teploty a přebíjení
- menší nabíjecí/vybíjecí proudy (2C až 3C)
- úplné vybití může způsobit její zničení



Obr. 1.4 Li-Ion trakční baterie [19]

1.2.5 Li-Pol baterie

Lithium-polymerový akumulátor je dalším vývojovým stupněm v bateriích na bázi Lithia. Je velmi lehký a tvarovatelný. Při maximálním využívání jeho parametrů však výrazně klesá životnost. Nabíjení musí probíhat relativně pomalu a nabíjecí cyklus by měl trvat asi hodinu. I při malém přepětí na článek (4,235 V), hrozí jeho exploze, proto je nutné každý článek samostatně monitorovat elektronikou (ochranné obvody, balancéry a BMS). Tyto vlastnosti a malá elektrická robustnost zatím brání jeho využití v trakčních pohonech.

Hustota energie 100–250 Wh/kg, nabíjecí doba 1–1,5 hod., životnost až 800 nabíjecích cyklů, jmenovité napětí 3,65 V/článek, samovybíjení 3 % za měsíc.

Výhody:

- značná hmotnostní i objemová kapacita
- výborná účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu
- nemá paměťový efekt

Nevýhody:

- nebezpečí výbuchu při přetížení, nebo mechanickém poškození
- malá elektrická robustnost
- nízká životnost

1.2.6 Li-FePO₄ a Li-FeYPO₄ baterie

Lithium-železo-fosfátové označení získaly díky katodě vyrobené z tohoto materiálu. Anoda je jako u ostatních Li-ion baterií vyrobena z uhlíku. Představují v současné době nejsofistikovanější variantu akumulátorů na bázi Lithia. Ve srovnání s Li-Pol jsou bezpečnější, i v extrémních podmínkách jsou bezpečné. Hlavní překážkou širšího využití byla nízká vnitřní vodivost. Tento problém již byl vyřešen potažením LiFePO₄ částic vodivými materiály (např. uhlíkem) a částečně využitím dopovaných polovodičů, články s příměsí Ytria LiFeYPO₄. Vývoj pokračuje také v oblasti nanotechnologií, např. Li₄Ti₅O₁₂. Tyto baterie mají vlastnosti, které upřednostňují jejich aplikaci v elektrických nebo hybridních vozidlech.

Hustota energie 100–180 Wh/kg, nabíjecí doba 0,5–2 hod., životnost 3000–8000 nabíjecích cyklů, jmenovité napětí 3,25 V/článek, samovybíjení 2 % za měsíc, pracovní teplota –45°C až +85°C [23].

Výhody:

- jsou bezpečné
- malý vnitřní odpor – vysoká účinnost cyklu (70–95 %)
- schopnost dodávat vysoký proud při špičkových průbězích
- životnost

Nevýhody:

- nižší hmotnostní a objemová kapacita
- vyšší cena



Obr. 1.5 Li-FeYPO₄ články [20]

1.2.7 Superkapacitory

Kondenzátor je jediná součástka, ve které lze akumulovat energii přímo v elektrické formě v elektrostatickém poli. U všech dosud uvedených typů akumulátorů je energie uchovávána v chemické formě. Každá přeměna energie způsobuje ztráty, navíc při ní

dochází i k určité časové prodlevě, která snižuje proudovou zatížitelnost akumulátoru. Pro akumulaci energie v relativně krátkém čase je tedy kondenzátor principiálně nejvýhodnější, jelikož není potřeba elektrickou energii transformovat do jiné formy. Klasický elektrolytický kondenzátor však pro akumulaci elektrické energie není vhodný, zejména z důvodu malé hustoty energie 0,1–0,2 Wh/kg.

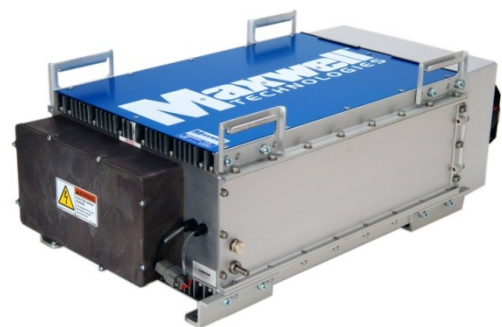
Vývoj v oblasti akumulace elektrické energie značně pokročil a byl vyvinut dvouvrstvý elektrochemický kondenzátor vyrobený speciální technologií, která umožňuje dosažení obrovské kapacity řádu stovek až tisíců Faradů. Aktivní plocha elektrod je zvětšena použitím práškového uhlíku naneseného na hliníkové fólii. S touto součástí se nejčastěji můžeme setkat pod názvem superkapacitor, superkondenzátor, označují se také zkratkou EDLC (Electrochemic Double Layer Capacitor), společnost Maxwell je vyrábí pod značkou BOOSTCAP.

Superkapacitory mají malý vnitřní odpor 0,3–1,2 mΩ a vysoký měrný výkon. Doba nabíjení se pohybuje v řádech jednotek sekund. Díky těmto parametrům leží superkapacitory v oblasti mezi baterií a elektrolytickým kondenzátorem. Jeví se jako perspektivní akumulátor **pro rychlé ukládání a dodávání elektrické energie** vhodný pro použití v hybridních vozidlech. Snižují špičkový odběr z baterií a tím prodlužují jejich životnost (životnost superkapacitorů až 100x více cyklů než u baterií).

Výkonová hustota 10 kW/kg (až 10x větší vůči bateriím), hustota energie okolo 2,5 Wh/kg, životnost až 1 000 000 nabíjecích cyklů, jmenovité napětí 2,3–2,7 V/článek.

Výhody:

- velký měrný výkon a dobrá měrná energie
- velmi vysoká účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu až 98 %
- vysoká rychlost nabíjení/vybíjení, schopnost velmi vysokých proudů
- velikost napětí vypovídá o velikosti akumulované energie
- bezproblémová funkce i při nízkých teplotách až -40°C



Obr. 1.6 Superkapacitor
63 F/125 V [21]

Nevýhody:

- poměrně malá kapacita – vývoj však stále pokračuje
- vysoká cena

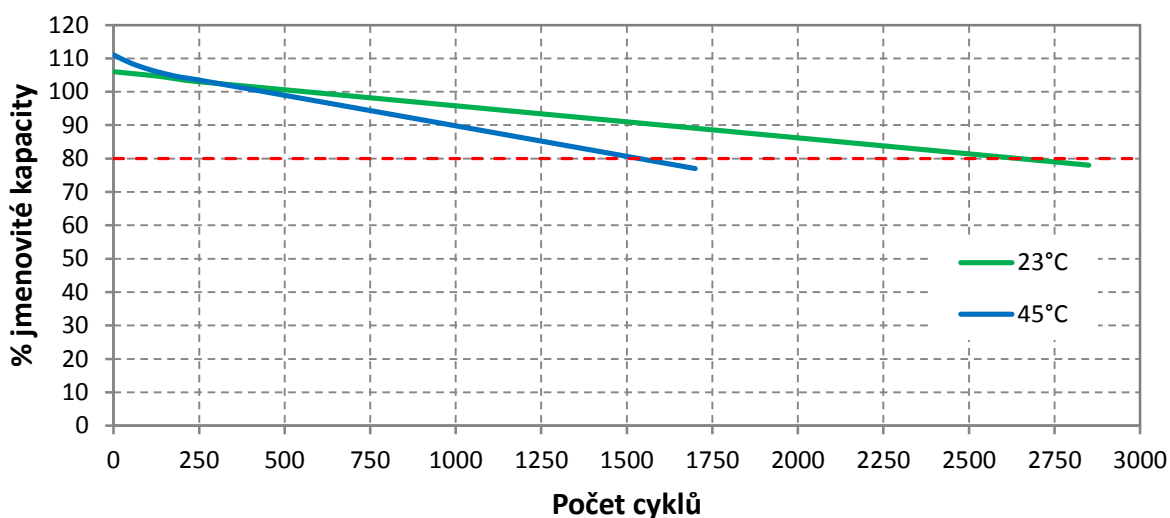
2 Fyzikální veličiny a skutečnosti ovlivňující životnost baterií

Jak již bylo řečeno v předchozí části, teoretická životnost většiny elektrochemických akumulátorů se pohybuje řádově ve stovkách až tisících cyklů. Je závislá na konstrukci elektrod, teplotě okolí a způsobu provozu akumulátoru. Po tuto dobu postupně klesá kapacita akumulátoru, tj. celkový náboj, který je akumulátor schopen při plném nabití absorbovat. Pokles kapacity pod 80 % jmenovité hodnoty je považován za konec životnosti baterie, nejčastěji je důsledkem chemické degradace elektrod akumulátoru. Pokud tomu nebrání provozní podmínky, lze baterie s nižší kapacitou nadále provozovat.

2.1 Vliv pracovní teploty

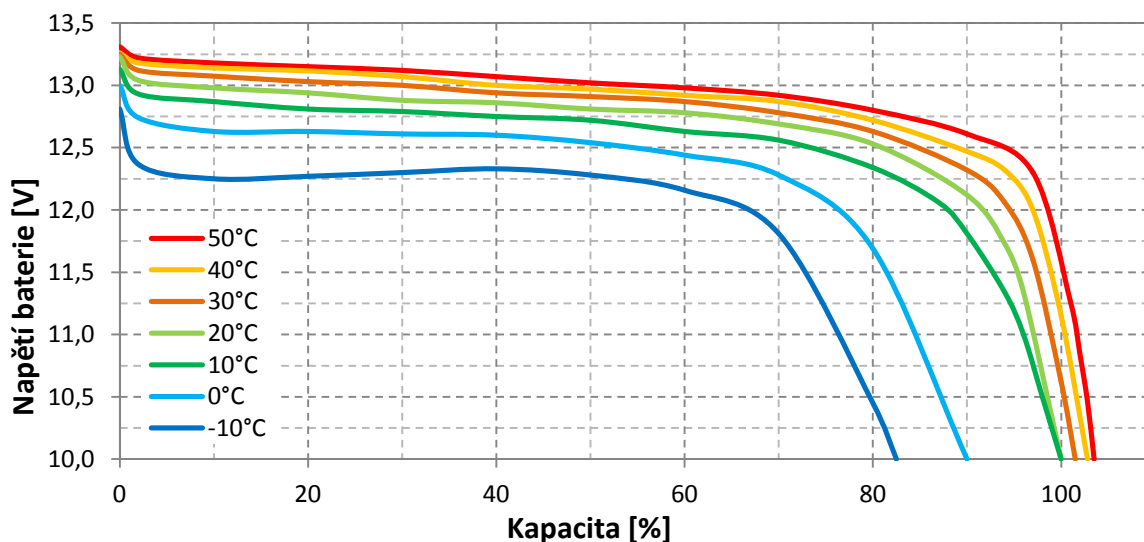
Pracovní teplota je teplotní interval, ve kterém mohou být akumulátory provozovány. Ke změnám teploty akumulátorů dochází nejen vlivem změn teploty okolí, ale i vlivem jejich činnosti. Při probíhajících elektrochemických dějích se uvolňuje teplo, které způsobuje nárůst teploty akumulátoru. Určitá část tepla vniká i Joulovými ztrátami v materiálu elektrod a v elektrolytu. Množství uvolněného tepla je úměrné velikosti prošlého náboje. Joulovy ztráty odpovídají kvadrátu velikosti procházejícího proudu.

Vysoká teplota urychluje chemické reakce probíhající uvnitř akumulátoru. Se vzrůstající teplotou se poněkud zvyšuje kapacita akumulátoru, ale vzrůstá samovybíjení. Z obrázku 2.1 je zřejmé, že dlouhodobý provoz akumulátorů při teplotě vyšší než jmenovité výrazně snižuje jejich životnost.



Obr. 2.1 Závislost jmenovité kapacity LiFePO4 baterií na počtu cyklů při různé provozní teplotě [22]

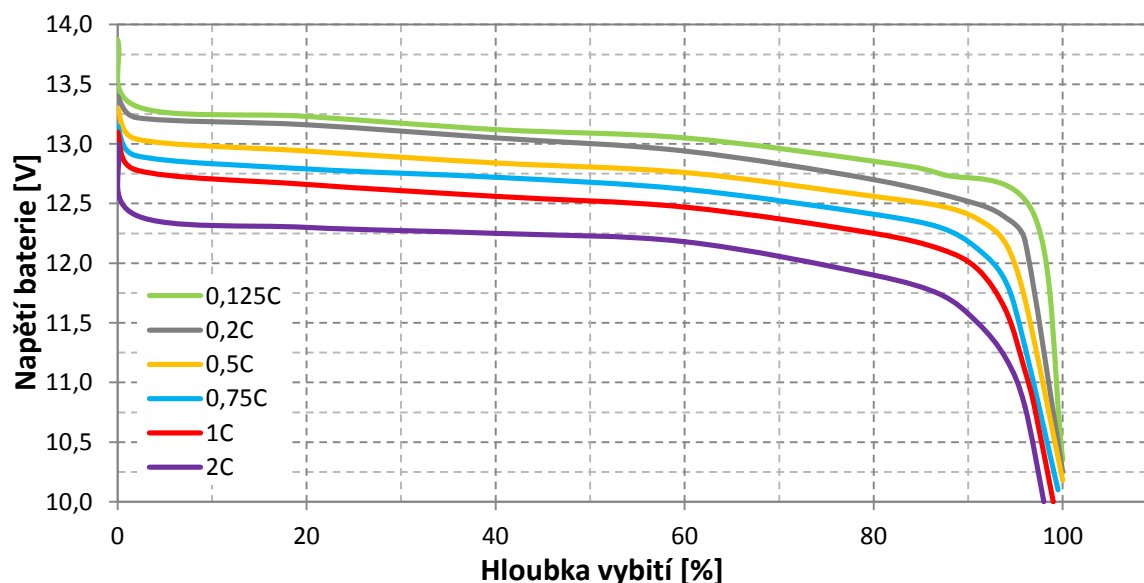
Nízká teplota způsobuje zpomalením chemických reakcí zvýšení vnitřního odporu článků, důsledkem je snížení vybíjecího proudu a také snížení kapacity baterie (obr. 2.2). Na životnost baterií nemá nízká teplota negativní vliv, zvýšením teploty na jmenovitou hodnotu se parametry vracejí na původní úroveň.



Obr. 2.2 Vliv teploty na kapacitu LiFePO_4 baterie [22]

2.2 Vliv velikosti vybíjecího proudu

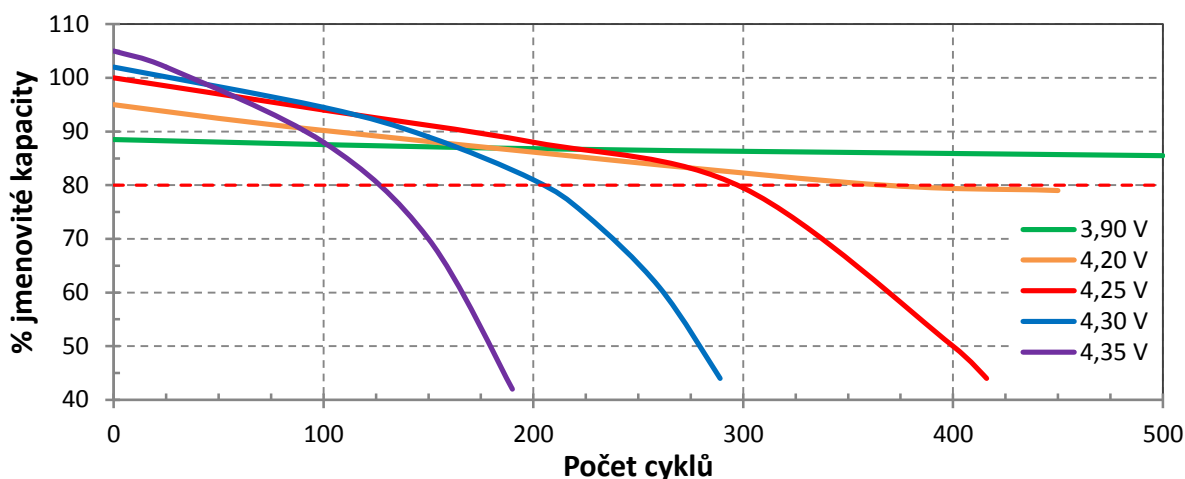
Výrobce baterií stanovuje u každého typu článku vybíjecí charakteristiku. Vybíjecí proud je stanoven jako násobek jmenovité kapacity článku, např. 2C u 100 Ah článku znamená vybíjecí proud 200 A. Výrobce určená maximální hodnota vybíjecího proudu se nesmí překračovat, jinak dochází ke zkracování životnosti baterie. Pokud je potřeba vyšších hodnot vybíjecího proudu, je nutné volit paralelní řazení jednotlivých větví baterií.



Obr. 2.3 Vybíjecí charakteristika LiFePO_4 baterie [22]

2.3 Vliv velikosti nabíjecího napětí

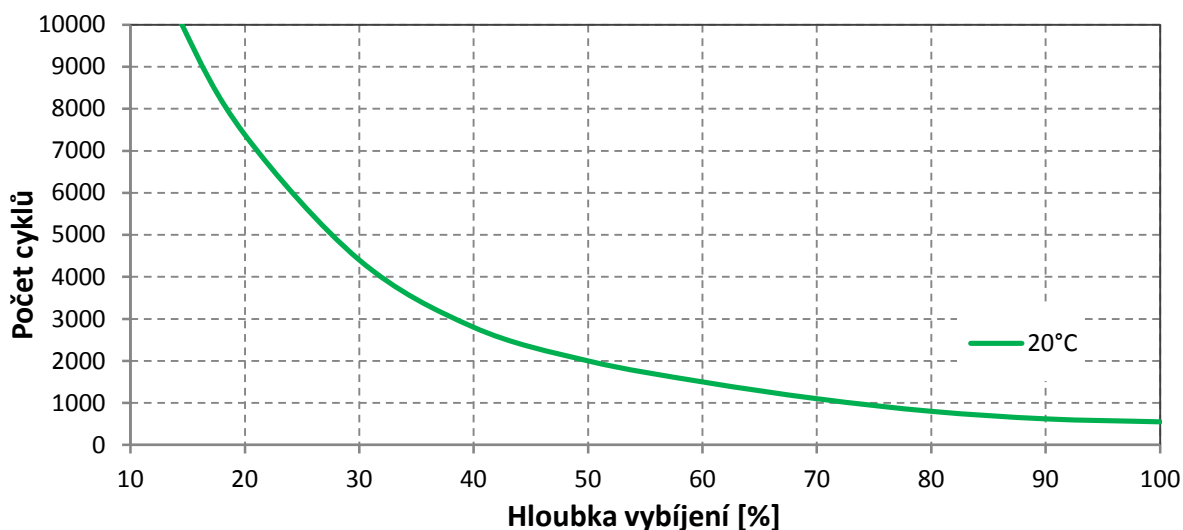
Konečné nabíjecí napětí odpovídá typu článku, je stanoveno výrobcem a musí být dodrženo se značnou přesností. Překročení velikosti konečného nabíjecího napětí článku významně snižuje jeho životnost (obr. 2.4). Naproti tomu při nabíjení na nižší napětí, nedosáhne článek svojí maximální kapacity, ale podstatně se prodlužuje životnost reprezentovaná počtem cyklů. Na obrázku 2.4 je zřejmý výrazný pokles životnosti u LiFePO₄ trakční baterie při nabíjecím napětí vyšším jak 4,20 V na článek.



Obr. 2.4 Závislost životnosti LiFePO₄ baterie na velikosti nabíjecího napětí [15] [22]

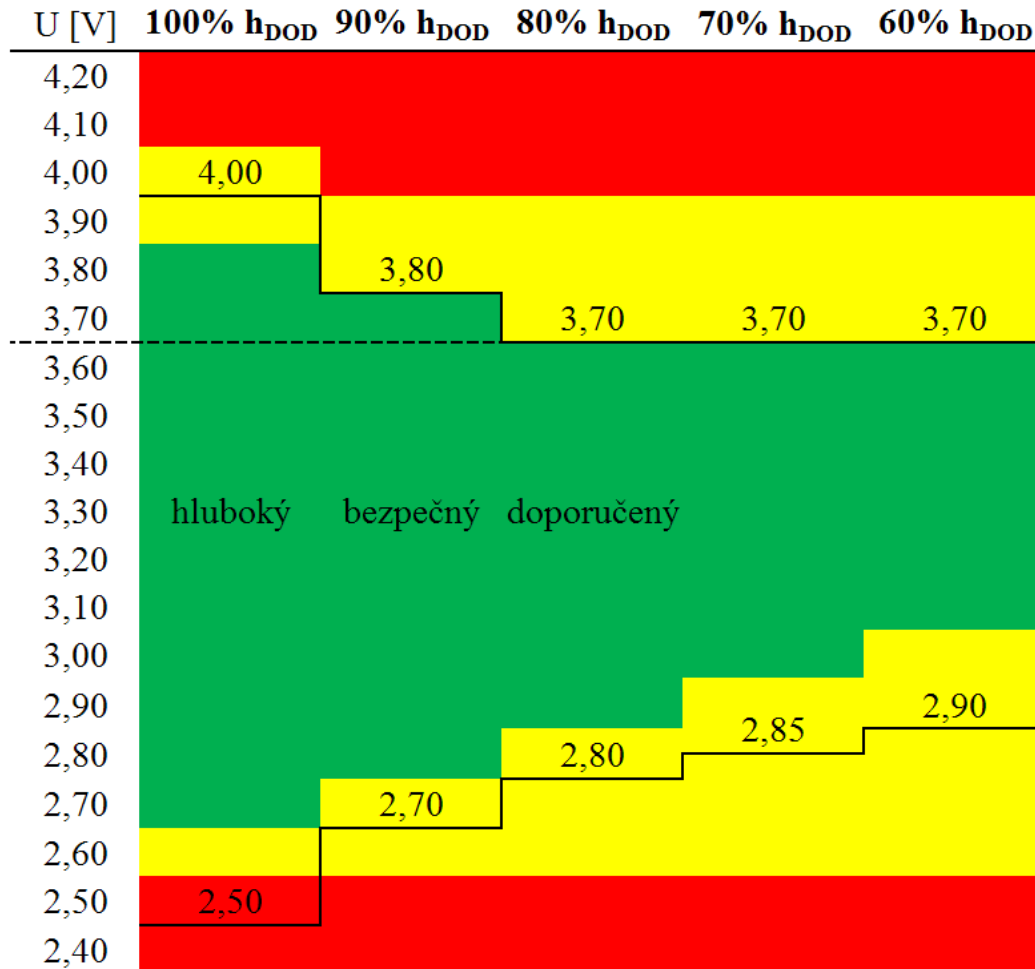
2.4 Vliv hloubky vybíjení

Hloubka vybíjení, též hloubka cyklu, má nezanedbatelný vliv na životnost baterie v celkovém počtu cyklů. Míra vlivu závisí na typu baterie. Modifikací konstrukce článků a materiálů elektrod se výrobci snaží tyto negativní vlivy eliminovat. Z obrázku 2.5 vyplývá výrazný pokles životnosti Ni-Cd baterie se zvyšující se hloubkou vybíjení.



Obr. 2.5 Závislost životnosti Ni-Cd baterie na hloubce vybíjení [10]

Pro zajištění odpovídající životnosti je výrobcem doporučena příslušná hloubka vybíjecího cyklu h_{DOD} v procentech z celkové jmenovité kapacity baterie. Přehled vybíjecích cyklů pro trakční baterie typu LiFeYPO_4 je znázorněn na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Hloubka vybíjecích cyklů LiFeYPO_4 trakční baterie [26]

Energie uložená v bateriích:

$$E = U \cdot C \quad [\text{Wh}] \quad (2.4.1)$$

kde: U ... napětí baterie [V]

C ... kapacita baterie [Ah]

Energie odebraná z baterií při určité hloubce vybíjecího cyklu:

$$E = U \cdot C \frac{h_{DOD}}{100} \quad [\text{Wh}] \quad (2.4.2)$$

kde: h_{DOD} ... hloubka vybíjení [%]

2.5 Vliv technologie

Výrobci se neustálým výzkumem a vývojem technologií baterií snaží vylepšovat jejich klíčové parametry. Existují různé modifikace konstrukce a materiálů za účelem zlepšení prioritních parametrů na úkor druhotných dle konkrétního využití baterie. Např. velikost vnitřního odporu článku, na kterém jsou závislé další parametry (účinnost, maximální hodnota vybíjecího a nabíjecího proudu). Na použité technologii je velmi závislá také životnost jak v počtu cyklů, tak i v rocích.

2.6 Vliv skladování

Baterie typu Li-ion a Li-Pol se nedoporučuje skladovat zcela vybité, pro maximální životnost je optimální skladování při úrovni nabití na 40 % jmenovité kapacity. Hladinu nabití je potřeba kontrolovat podle doporučení výrobce, pokud je potřeba provést dobití.

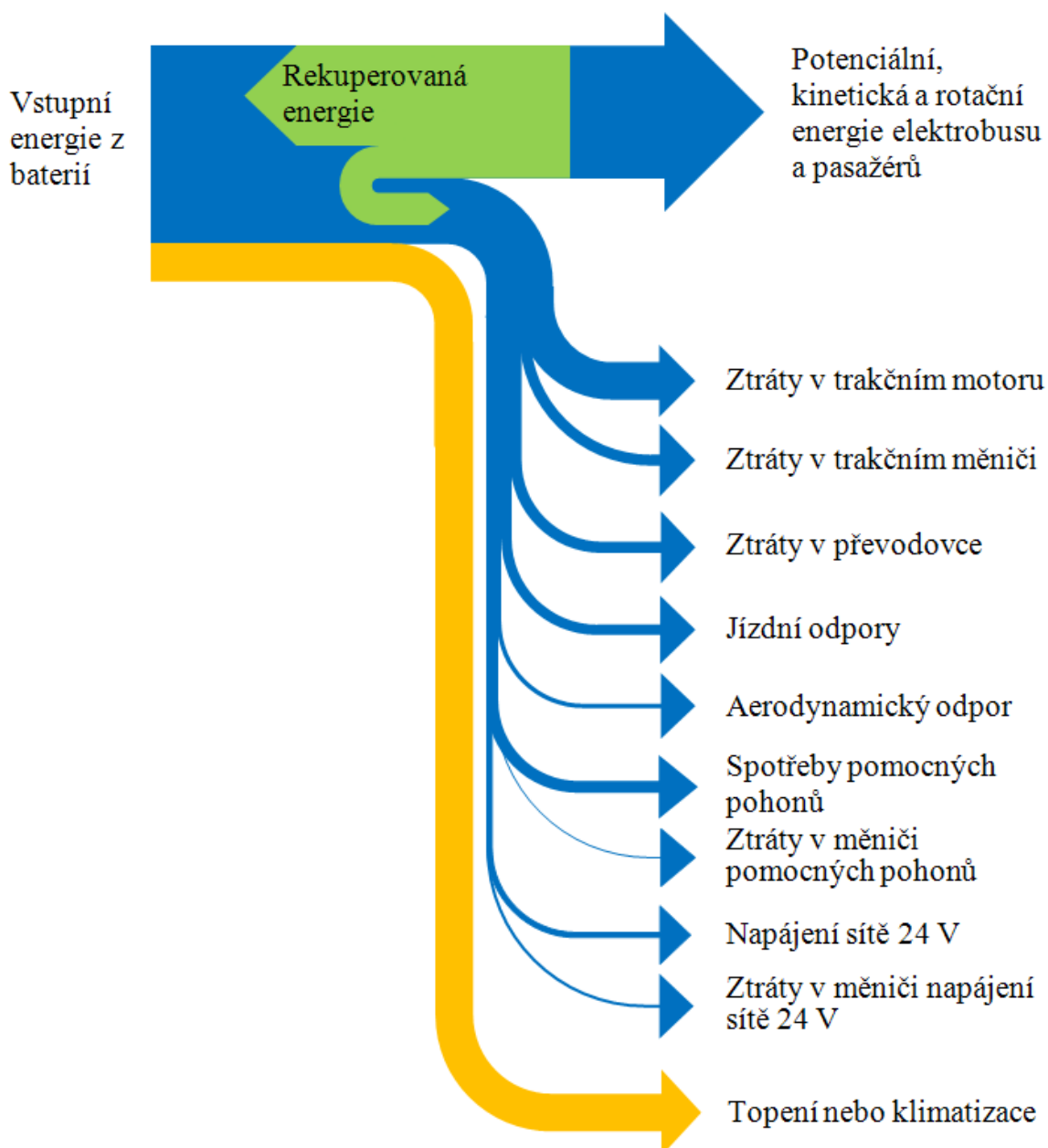
Na životnost baterií má vliv také skladovací teplota. Musí se dodržet výrobcem předepsaný rozsah skladovacích teplot, přičemž nižší hodnoty teploty z předepsaného rozsahu mají pozitivní vliv na životnost, z důvodu zpomalení chemických reakcí.

Je důležité chránit baterie před mechanickým poškozením. Pouzdra se mohou poměrně snadno poškodit pádem na zem nebo jiným silným nárazem. Pokud došlo k poškození baterie, nesmí být dále používána.

3 Dimenzování trakčních baterií

3.1 Celková energetika bateriového vozidla

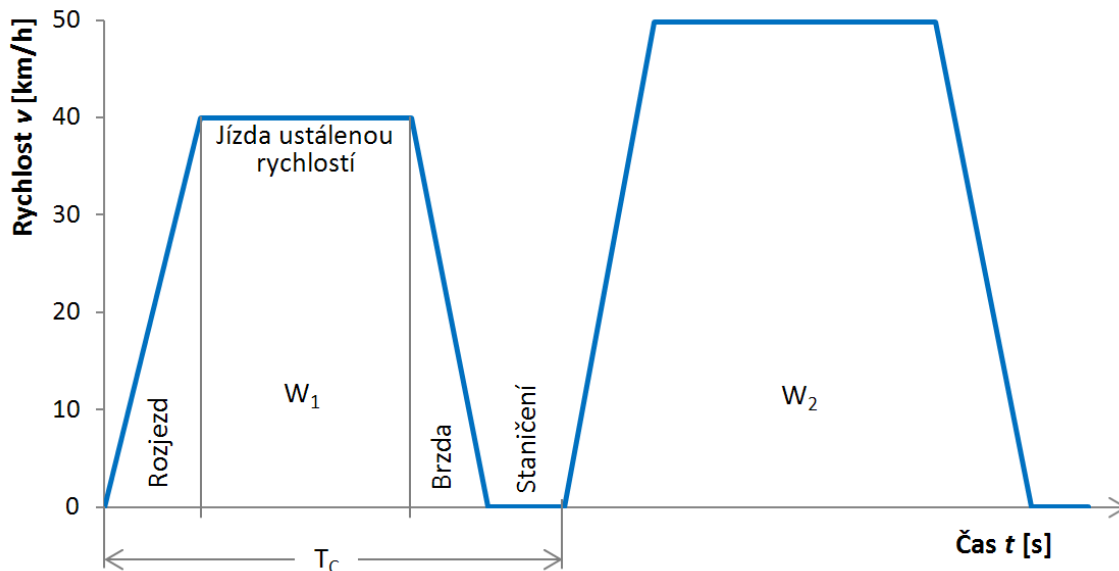
Pro dimenzování trakčních baterií je nutné v první řadě správně objasnit spotřeby a ztráty v reálném provozu vozidla. K tomu je potřeba provést trakční a energetické výpočty zohledňující parametry vozidla, trati a konkrétního provozního režimu vozidla. Podstatnou položkou v energetice vozidla jsou trvalé odběry energie. Komplexní přehled o tocích energie v elektrobusu nám poskytuje *obr. 3.1*.



Obr. 3.1 Toky energií v elektrobusu

3.1.1 Jízdní cykly

Definování jízdních cyklů během celého dne provozu vozidla je nezbytné pro dimenzování baterií. Příklady takových cyklů jsou znázorněny na *obr. 3.2*.



Obr. 3.2 Příklad jízdních cyklů vozidla

Fáze jízdy:

1. **Rozjezd:** z výchozího klidového stavu se vozidlo uvádí do pohybu.
2. **Jízda ustálenou rychlostí:** trakční motor nedodává tažnou sílu pro zrychlení vozidla, vozidlo se pohybuje ustálenou rychlostí.
3. **Brzdění:** z pohybu je vozidlo cíleně zpomalováno až do zastavení. Část pohybové energie se prostřednictvím trakčního motoru přemění na elektrickou a ukládá se do akumulátorů, případně jsou částí elektrické brzdné energie hrazeny spotřeby a ztráty dle *obr. 3.1*.
4. **Staničení:** pobyt vozidla v zastávce. Trakční motor nedodává tažnou sílu, vozidlo stojí. V trakčních obvodech nedochází k žádným tokům energie.

3.1.2 Stálé spotřeby

Do této kategorie jsou zařazena zařízení a spotřebiče, které se přímo nepodílí na dodávání trakční práce, ale přesto jsou nezbytné k provozu vozidla pro zajištění základních a doplňkových funkcí (*obr. 3.1*). Kvantifikace jejich příkonů je provedena jako střední hodnota při standardním provozu elektrobuse.

3.1.2.1 Pomocné pohony

Měnič (napět'ový střídač) pomocných pohonů a příslušné elektromotory pomocných pohonů, např. kompresor stlačeného vzduchu, posilovač řízení, chladicí ventilátory, případně oběhové čerpadlo chladicí kapaliny. Pro další výpočty budeme uvažovat průměrnou spotřebu, včetně všech ztrát v této větvi $P_{PP} = 5 \text{ kW}$.

3.1.2.2 Palubní síť 24 V

Měnič baterie zajišťuje dobíjení vozidlové baterie 24 V k pokrývání veškeré spotřeby v palubní síti vozidla. Z důvodu maximální úspory elektrické energie je vhodné vnitřní i vnější osvětlení řešit technologií LED. V dalších výpočtech budeme kalkulovat se spotřebou včetně všech ztrát v této větvi $P_{24V} = 1 \text{ kW}$.

3.1.2.3 Spotřeby v zařízeních podpory komfortu jízdy

Topení – dimenzování závisí na klimatických podmínkách, kde bude bus provozován. Z hlediska spotřeby elektrické energie se jedná o náročný spotřebič. Pro dvanáctimetrový bus v našich klimatických podmínkách představuje spotřeba až 30 kW. Pro pokrytí této spotřeby z trakčních baterií se musí navýšit jejich kapacita, čímž dojde ke snížení obsaditelnosti vozu. Při nezměněné kapacitě baterií by došlo k podstatnému snížení dojezdové vzdálenosti.

Pokud nechceme jako zdroj energie použít baterie, je nutno potřebu vytápění vozidla řešit jiným vhodným způsobem, např. pomocí nezávislého naftového topení. Při použití vodního chlazení trakčního motoru, měničů, případně baterií se nabízí využití tohoto odpadního tepla pro vytápění.

Klimatizace – také zde dimenzování závisí na klimatických podmínkách, kde bude bus provozován. Pokud bude vozidlo vybaveno pouze klimatizací stanoviště řidiče s příkonem do 2,5 kW, lze uvažovat o jejím napájení z trakčních baterií. Vlastní připojení by bylo realizováno prostřednictvím měniče pomocných pohonů, případně vlastním měničem klimatizace. Spínání by probíhalo v závislosti na regulační odchylce teploty prostoru s vyloučením souběhu motorů kompresoru stlačeného vzduchu a klimatizace, s prioritou běhu motoru kompresoru stlačeného vzduchu.

Klimatizace v salónu pro cestující představuje v našich klimatických podmínkách spotřebu 25 kW. Stejně jako u topení by musela být navýšena kapacita trakčních baterií. Tím by se snížila obsaditelnost vozu nebo při nezměněné kapacitě baterií by byla omezena dojezdová vzdálenost.

Pokud pro motor kompresoru klimatizace nepoužijeme jako zdroj energie trakční baterie, je potřeba zvolit jiný nezávislý pohon např. pomocí spalovacího motoru. Ten je uváděn v činnosti na základě regulační odchylky teploty v prostoru pro cestující.

Pro celkový příkon stálých spotřeb P_{SS} tak můžeme psát:

$$P_{SS} = P_{PP} + P_{24V} + P_{TOP} + P_{KLIM} \quad [W] \quad (3.1.1)$$

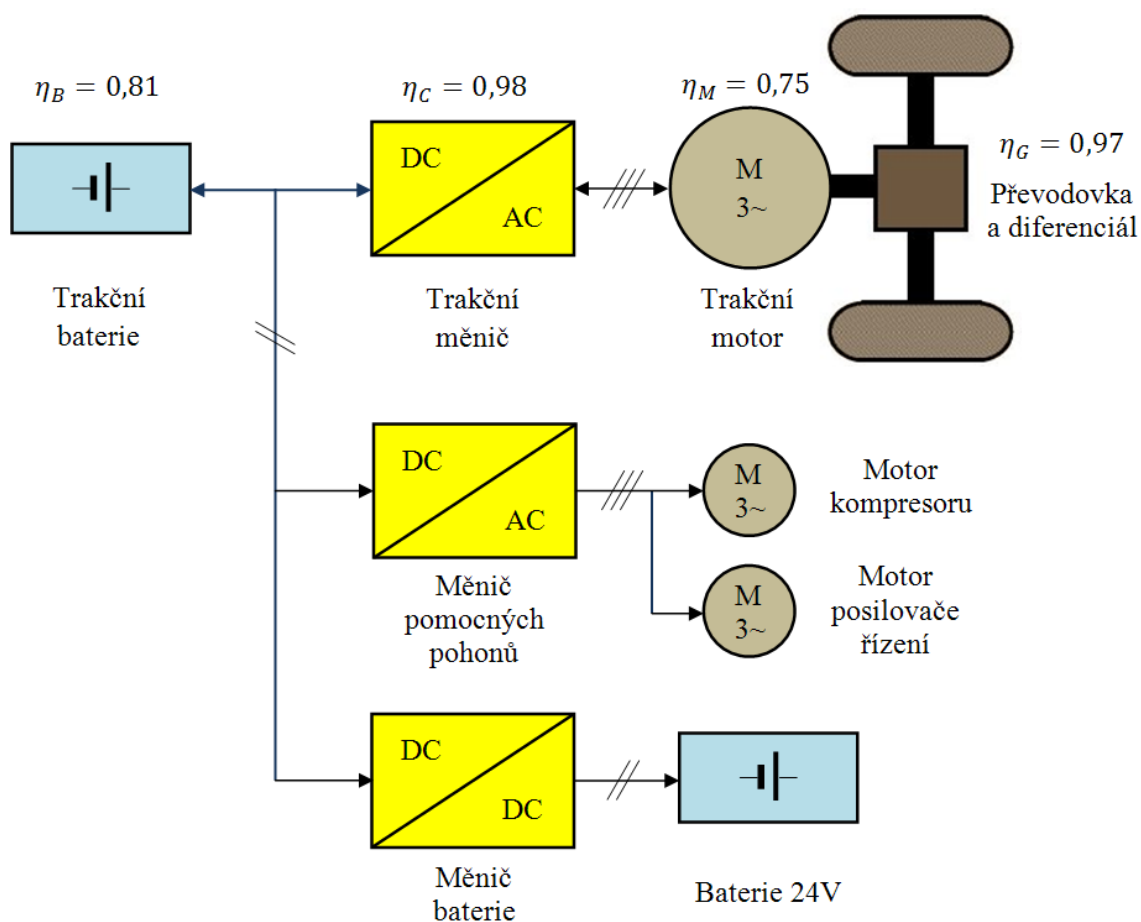
Potom energie nutná pro krytí těchto spotřeb je:

$$E_{SS} = P_{SS} \cdot T \quad [Wh] \quad (3.1.2)$$

kde: T ... celková doba denního provozu [h]

3.1.3 Ztráty

V této kapitole jsou analyzovány energie, které při provozu vozidla již nelze zpětně přeměnit do využitelné formy energie.



Obr. 3.3 Blokové schéma obvodového řešení elektrobusu

3.1.3.1 Ztráty v trakční části

Jedná se o tepelné ztráty energie v trakčních bateriích, v trakčním měniči, v trakčním motoru a v převodovce s diferenciálem. Situace je graficky znázorněna na (obr. 3.3), kde jsou zobrazeny i pomocné pohony a palubní síť 24 V DC. Uvedené účinnosti nejsou konstanty, ale jsou funkcí přenášeného výkonu, teploty a specifických fyzikálních veličin u každé části ze znázorněného trakčního řetězce.

Účinnost trakčních baterií η_B je závislá na teplotě článků baterie, hloubce vybíjení, použité technologii a fázi životnosti baterie. Hodnoty účinnosti se pohybují v intervalu od 70 % do 95 %.

Účinnost trakčního motoru η_M je stanovena jako průměrná hodnota pro nejhorší možný případ. Zohledňuje vlastnosti asynchronního motoru, kdy je problematické stanovit přesnou hodnotu účinnosti, jelikož se mění v závislosti na režimu jízdy, na aktuální teplotě motoru, jeho otáčkách a hnacím momentu. Účinnost trakčního motoru je také ovlivněna způsobem a kvalitou regulace. Zde uváděná účinnost 75 % [2] byla získána výpočty na základě matematického modelu motoru a dat získaných z reálného provozu.

Vedoucím práce bylo doporučeno pro další výpočty použít u všech částí v trakčním řetězci uvedené průměrné hodnoty účinností, které vycházejí z naměřených hodnot i výsledků simulací. Jsou to přitom takové hodnoty, které při dimenzování trakčních baterií jsou na straně projekční rezervy.

Celková účinnost trakčního řetězce je dána součinem dílčích účinností (obr. 3.3).

$$\eta_{TR} = \eta_B \cdot \eta_C \cdot \eta_M \cdot \eta_G [-] \quad (3.1.3)$$

Je potřeba zdůraznit, že ztráty v trakční části jsou generovány jak v motorickém, tak i generátorickém režimu jízdy.

3.1.3.1.1 Hmotnost vozidla

Celková hmotnost vozidla m_V je dána součtem pohotovostní hmotnosti vozidla m_{poh} a hmotnosti přepravovaných osob m_{osob} .

$$m_V = m_{poh} + m_{osob} \text{ [kg]} \quad (3.1.4)$$

Dále je potřeba uvažovat momenty setrvačnosti J všech rotujících částí, jedná se zejména o rotor trakčního motoru, rotující hřídele, ozubená kola převodovky a vlastní kola vozidla.

Celková rotační energie je algebraickým součtem rotačních energií všech dílčích rotujících částí.

$$E_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n J_i \cdot \omega_i^2 \quad [\text{J}] \quad (3.1.5)$$

Z rovnice (3.1.5) je zřejmé, že pro výpočet této energie musíme znát setrvačné momenty každé rotující části, což není vždy možné. Pokud setrvačné momenty nejsou známy, provedeme zjednodušení a budeme uvažovat zvýšení pohotovostní hmotnosti vozidla koeficientem k_j , který zahrnuje vliv rotujících setrvačných hmot. Hodnota koeficientu zvýšení hmotnosti byla stanovena na základě výsledků měření a porovnání dat z reálného provozu $k_j = 1,10$ [2].

Celková ekvivalentní hmotnost vozidla je dána vztahem:

$$m_E = k_j \cdot m_{poh} + m_{osob} \quad [\text{kg}] \quad (3.1.6)$$

3.1.3.2 Výpočet ztrát v trakční části

Ztráty v trakční části v jednom jízdním cyklu jsou dány vztahem:

$$\begin{aligned} \Delta E_{TRcykl} &= |W_{TR}| \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} \int_0^{T_C} |P_{TR}| dt = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} \int_0^{T_C} |F_{TR}| \cdot v dt = \\ &= \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \int_0^{T_C} |a| \cdot v dt = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \int_0^{T_C} \left| \frac{dv}{dt} \right| \cdot v dt \quad [\text{Ws}] \quad (3.1.7) \end{aligned}$$

Trakční energie v jednom jízdním cyklu W_{TR} nabývá v jednotlivých částech cyklu kladných, nezáporných i záporných hodnot. Absolutní hodnota u W_{TR} ve výrazu (3.1.7) je z důvodu, že ztráty jsou generovány vždy, jak při motorickém, tak i generátorickém chodu.

Jak zrychlení a , tak i rychlost v jsou funkcemi času a jsou dány definicí jízdních cyklů.

Pozn.: V případě, že $v = k \cdot t$, je $a = k$, potom rovnice (3.1.7) nabývá tvar:

$$\Delta E_{TRcykl} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \int_0^{T_C} |k| \cdot kt dt = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \cdot k^2 \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{T_C} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \cdot k^2 \cdot \frac{T_C^2}{2} \quad [\text{Ws}] \quad (3.1.8)$$

Pokud je jízdní cyklus křivka, která je vyjádřena několika funkcemi (rozjezd, výběh, brzda) je nutné integrovat rovnici (3.1.7) po částech, T_C je pak doba příslušné části cyklu.

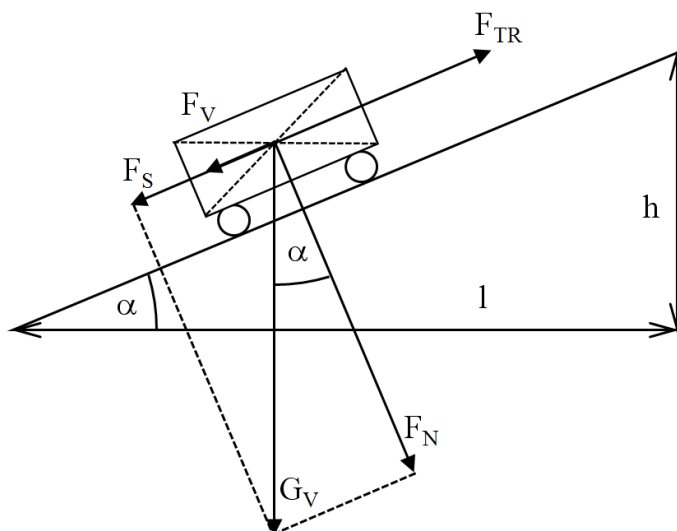
3.1.3.3 Ztráty dané jízdními odpory

Celkový jízdní odpor F_O je součtem vozidlového odporu F_V a odporu stoupání F_S .

$$F_O = F_V + F_S \quad [\text{N}] \quad (3.1.9)$$

3.1.3.3.1 Odpor stoupání

Odpor ze stoupání má nezanedbatelný podíl na celkovém jízdním odporu. Při jízdě do stoupání nabývá kladných hodnot, při jízdě z klesání nabývá záporných hodnot.



Obr. 3.4 Odpor stoupání

$$F_S = \sin \alpha \cdot G_V = \sin \left(\arctg \frac{h}{l} \right) \cdot G_V \quad [\text{N}] \quad (3.1.10)$$

Pro malé úhly lze dosazovat hodnoty sklonu přímo v procentech, pak platí vztah:

$$F_S = s_{\%} \cdot G_V \quad [\text{N}] \quad (3.1.11)$$

kde: $s_{\%}$... sklon [%] (kladná hodnota stoupání, záporná klesání)

G_V ... tíha vozidla [N]

V naprosté většině případů lze předpokládat následující:

- Vozidlo po skončení denních jízd dojede do stejného místa, odkud vyjelo
- Kapacita baterií umožní překonávání běžných výškových rozdílů
- Při jízdě z kopce je rekuperačním brzděním potenciální energie (mínus ztráty) ukládána zpět do trakčních baterií
- Ve většině konkrétních případů je velmi obtížné získat výškový profil tratě

Z výše uvedených důvodů bylo vedoucím práce doporučeno neuvažovat při výpočtech pro dimenzování trakčních baterií jízdní profil tratě, ale pouze zadání a definici jízdních cyklů, jak je popsáno v kapitole 3.1.1.

3.1.3.3.2 Vozidlový odpor

Zahrnuje všechny odporové síly vozidla, které působí proti jeho pohybu. Jedná se o valivý odpor v ložiscích, valivý odpor pneumatik a aerodynamický odpor vzduchu.

Vyjádření vozidlového odporu jako algebraického součtu těchto dílčích odporů by bylo velmi náročné. Některé součinitele ovlivňující vozidlový odpor, jsou matematicky obtížně popsatelné, takže by je bylo nutné prakticky ověřovat. Z těchto důvodů se pro výpočet vozidlového odporu F_V používá následující vztah [2]:

$$F_V = (a + b \cdot v + c \cdot v^2) G_V \quad [\text{N}] \quad (3.1.12)$$

Jedná se o polynom druhého stupně vytvořený na základě výzkumu a měření konstruktérů vozidel. Jeho koeficienty a , b , c jsou konstanty odpovídající danému typu vozidla a obdržíme je od výrobce karoserie vozidla.

3.1.3.4 Výpočet ztrát daných jízdními odpory

Ztráty jízdními odpory v jednom jízdním cyklu jsou dány vztahem:

$$\begin{aligned} \Delta W_{Jocykl} &= \int_0^{T_C} F_V \cdot v \, dt = G_V \int_0^{T_C} (a + bv + cv^2)v \, dt = \\ &= G_V \int_0^{T_C} (av + bv^2 + cv^3) \, dt = \\ &= m_V \cdot g \int_0^{T_C} (av + bv^2 + cv^3) \, dt \quad [J] \end{aligned} \quad (3.1.13)$$

Pozn.: Protože v jízdních cyklech (obr. 3.2) je obecně rychlost v funkcí času, potom pro $v = f(t)$ lze psát:

$$\Delta W_{Jocykl} = G_V \int_0^{T_C} (af(t) + bf^2(t) + cf^3(t)) \, dt \quad [J] \quad (3.1.14)$$

V případě, že $v = k.t$, rovnice (3.1.14) nabývá tvar:

$$\begin{aligned} \Delta W_{JOcycl} &= G_V \int_0^{T_C} (akt + b(kt)^2 + c(kt)^3) dt = G_V \left[ak \frac{t^2}{2} + bk^2 \frac{t^3}{3} + ck^3 \frac{t^4}{4} \right]_0^{T_C} = \\ &= G_V \cdot k \cdot T_C^2 \left(a \frac{1}{2} + bk \frac{T_C}{3} + ck^2 \frac{T_C^2}{4} \right) \quad [J] \end{aligned} \quad (3.1.15)$$

Pokud je jízdní cyklus křivka, která je vyjádřena několika funkcemi (rozjezd, jízda ustálenou rychlostí, brzda), je nutné integrovat rovnici (3.1.13) po částech.

Mechanické ztráty jízdními odpory ΔW_{JOcycl} jsou zvýšeny o ztráty v trakčním řetězci, které jsou popsány v kapitole (3.1.3.1). Trakční řetězec zobrazuje obr. 3.3 (baterie, měnič, trakční motor, převodovka). Po započtení ztrát v trakčním řetězci jsou výsledné ztráty jízdními odpory, které se pokrývají energií z baterií:

$$\Delta E_{JOcycl} = \frac{\Delta W_{JOcycl}}{\eta_{TR}} \quad [Ws] \quad (3.1.16)$$

3.2 Výchozí předpoklady a podmínky pro dimenzování trakčních baterií

3.2.1 Korekce pro zajištění životnosti

V kapitole 2 jsou popsány skutečnosti ovlivňující životnost a kapacitu baterií. Jde o skutečnosti významného charakteru, které mají podstatný vliv na dimenzování trakčních baterií.

Pro zachování životnosti je u většiny baterií nutné nevybíjet je zcela. Jak je popsáno v kapitole 2.4, je zavedena tzv. hloubka vybití h_{DOD} , která definuje optimální hloubku vybití v procentech vzhledem k celkové kapacitě baterie. To znamená, že při dimenzování baterií musíme z tohoto důvodu násobit jejich kapacitu koeficientem k_{DOD} .

$$k_{DOD} = \frac{100}{h_{DOD}} \quad [-] \quad (3.2.1)$$

Během dlouhodobého provozu dochází k poklesu kapacity baterií (viz kapitola 2). Rovněž i tento pokles kapacity musíme zohlednit při dimenzování baterií. Je proto nutné výslednou kapacitu baterií násobit koeficientem, který označíme k_{PKP} ,

$$k_{PKP} \in \langle 1,1; 1,2 \rangle$$

neboť během životnosti poklesne kapacita baterií o 10–20 %.

3.2.2 Projekční rezerva

Při projektování, zejména pokud nejsou dostatečné dlouhodobé zkušenosti, je nanejvýše vhodné uvažovat výkonovou nebo kapacitní rezervu „pro všechny případy“. Zavedeme koeficient, který označíme k_{REP}

$$k_{REP} \in \langle 1,0; 1,2 \rangle$$

3.2.3 Omezení maximální hmotností baterií

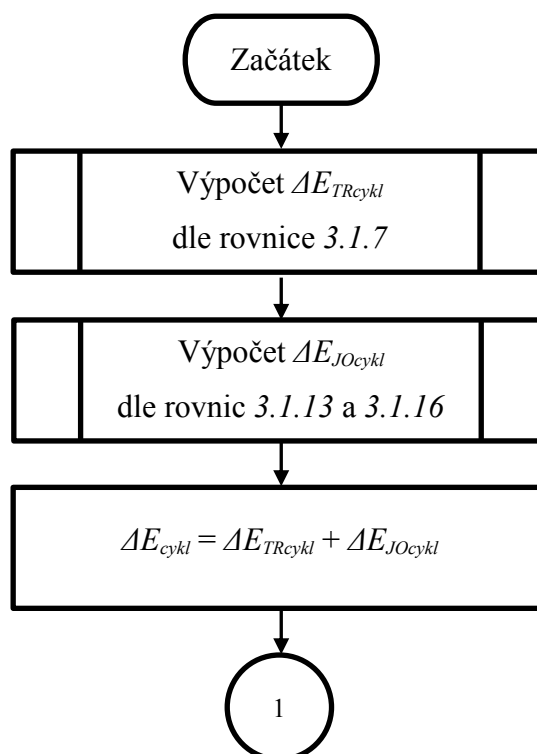
Pro zachování minimální obsaditelnosti vozu je maximální hmotnost baterií m_{MAX} limitována. Klíčovým parametrem je měrná hustota energie baterie e_m , která vyjadřuje množství elektrické energie uložené v jednom kilogramu hmotnosti baterií.

3.3 Dimenzování trakčních baterií bez dobíjení během denního jízdního cyklu. Algoritmy pro dimenzování.

U těchto vozů se předpokládá dobíjení trakčních baterií z elektrizační soustavy v době platnosti nízkého tarifu, tzv. „nočním proudem“.

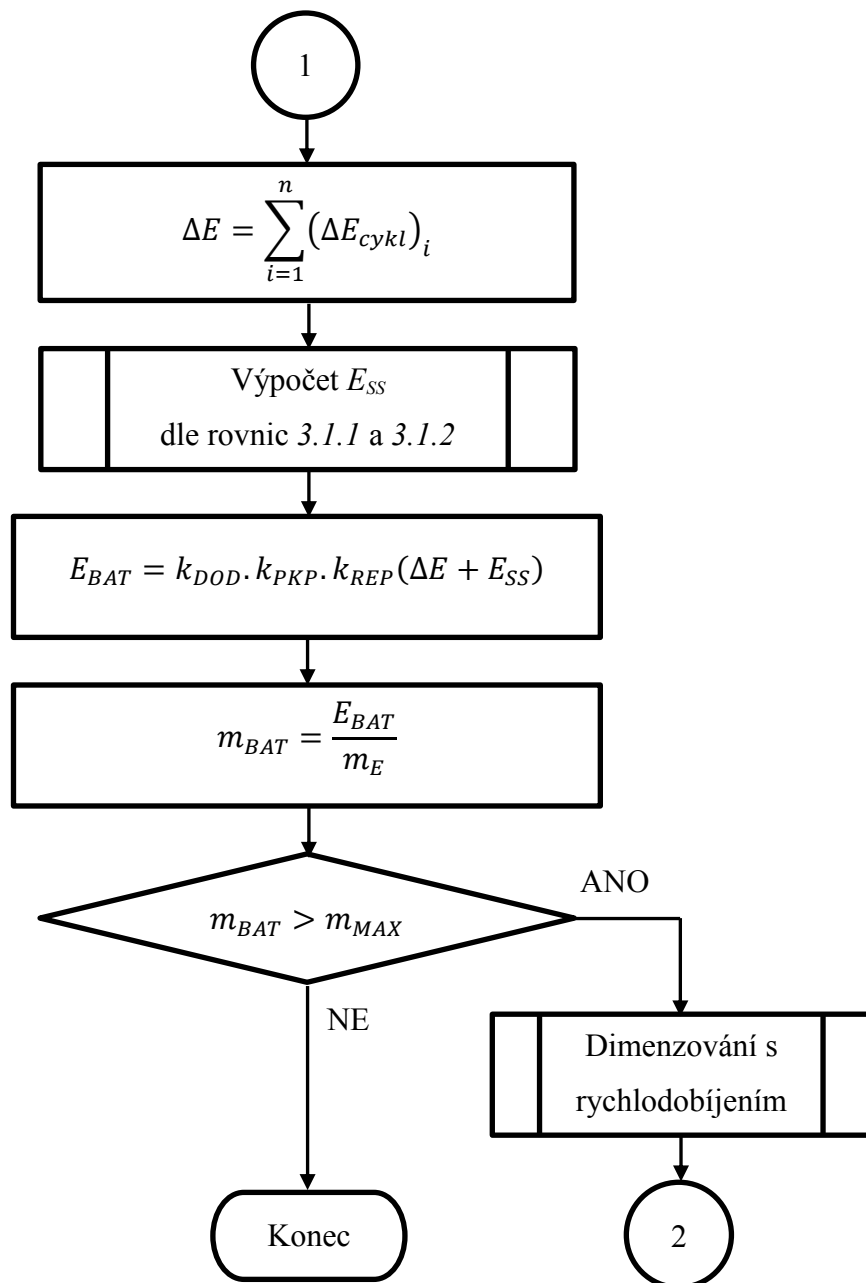
Provoz vozidla během dne se skládá z jednotlivých cyklů. Je pochopitelné, že základem pro výpočet celkové kapacity baterií budou algoritmy pro výpočet ztrát v trakční části (*kapitola 3.1.3.2*) a ztrát jízdními odpory (*kapitola 3.1.3.3*).

Základní algoritmus výpočtu pro jeden cyklus:



Je zřejmé, že musíme vypočítat ztráty ve všech cyklech během jízdního dne. Dále musíme připočítat stálé spotřeby během celého jízdního dne (*viz kapitola 3.1.2*) a na závěr také musíme zohlednit podmínky a předpoklady pro dimenzování trakčních baterií tak, jak jsou popsány v kapitole 3.2.

Algoritmy dalšího postupu výpočtu lze poté znázornit následovně:



kde: n ... počet všech jízdních cyklů během jízdního dne

m_{BAT} ... výsledná hmotnost baterií [kg]

m_E ... hustota energie vybraných baterií [Wh.kg⁻¹]

3.4 Dimenzování trakčních baterií s rychlodobíjením na konečných zastávkách. Algoritmy pro dimenzování.

Nyní jde o situaci, kdy při respektování maximální hmotnosti baterií není zajištěna jejich požadovaná kapacita. V důsledku toho vzniká omezení dojezdu a tuto situaci je nezbytné řešit rychlodobíjením.

Je nutné konstatovat, že rychlonabíjení je velmi komplikované a to především z toho důvodu, že vysoká teplota výrazně snižuje životnost akumulátorů (*viz kapitola 2*). Protože rychlonabíjení musí být realizováno velkými nabíjecími proudy a ztráty se zvětšují s kvadrátem nabíjecího proudu, je nutné dimenzovat trakční baterie s ohledem na životnost a na maximální možné nabíjecí proudy.

Výrobci baterií většinou uvádějí počet nabíjecích cyklů n_{TMEZ} v závislosti na mezní teplotě (45°C). Můžeme tak vyjádřit celkovou výměnu energie za dobu životnosti E_{BCZ} , jestliže předpokládáme konkrétní sestavu trakčních baterií s energií E_{BAT} :

$$E_{BCZ} = n_{TMEZ} \cdot E_{BAT} \text{ [Wh]} \quad (3.4.1)$$

U této baterie se stanoví požadovaná životnost v počtu roků t_{RZIV} . Spotřeba energie mezi jednotlivými dobíjenými E_{SUM1} (za dobu jízdy mezi konečnými) a počet nabíjení během jízdního dne n_{NAB} , potom celková výměna nabíjecí nebo vybíjecí energie je dána vztahem:

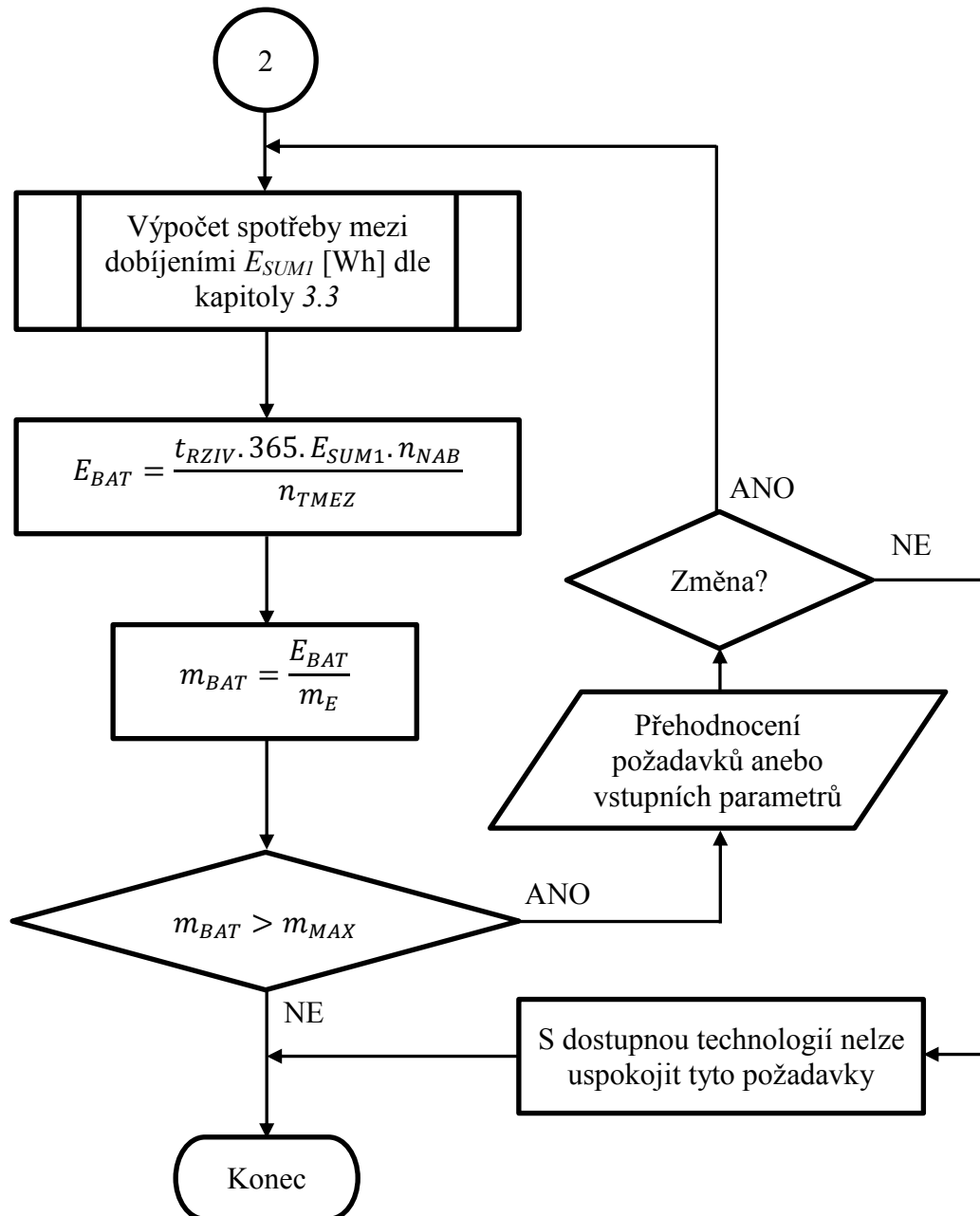
$$E_{BCZ} = t_{RZIV} \cdot 365 \cdot E_{SUM1} \cdot n_{NAB} \text{ [Wh]} \quad (3.4.2)$$

Z výše uvedeného vyplývá i přibližné dimenzování baterií, neboť vycházíme z přibližné skutečnosti, že životnost trakčních baterií odpovídá celkové nabíjecí a vybíjecí energii. Dosazením vztahu (3.4.1) do rovnice (3.4.2) získáme vztah pro dimenzování energie trakčních baterií s ohledem na životnost:

$$E_{BAT} = \frac{t_{RZIV} \cdot 365 \cdot E_{SUM1} \cdot n_{NAB}}{n_{TMEZ}} \text{ [Wh]} \quad (3.4.3)$$

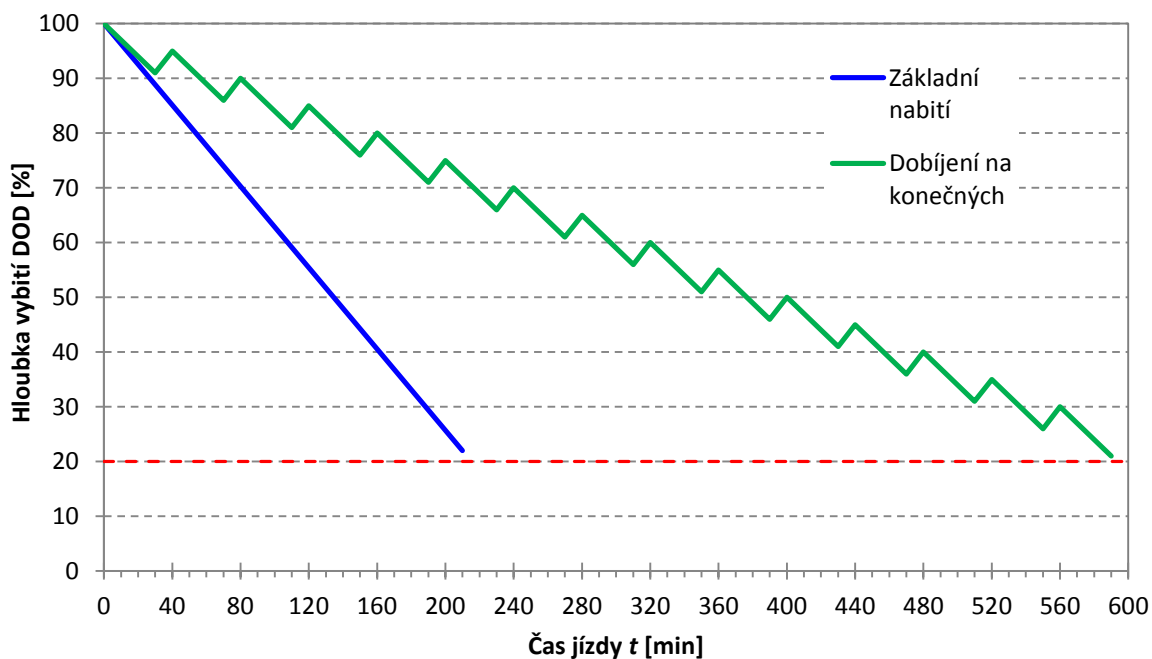
U těchto vozů s rychlodobíjením na konečných zastávkách bude prováděno základní dobíjení trakčních baterií přes noc ve vozovně a doplňkové rychlonabíjení na jedné nebo obou konečných zastávkách. Z důvodu možných opoždění vozů a také vzhledem k zajištění maximální životnosti baterií, jejich minimální ceny a hmotnosti bude vhodnější, i přes zvýšené počáteční investiční náklady, vybudovat rychlonabíjecí stanice na obou konečných zastávkách.

Algoritmus pro výpočet potřebné celkové energie trakčních baterií při dobíjení na konečných zastávkách E_{BAT} tedy bude:



3.4.1 Strategie dobíjení pro zvýšení životnosti trakčních baterií

Rozhodující pro dimenzování trakčních baterií při rychlonabíjení je požadavek na jejich životnost. Tu můžeme prodloužit, pokud nebudeme nabíjet maximálními možnými nabíjecími proudy a použijeme strategii, kterou znázorňuje *obr. 3.5*.



Obr. 3.5 Strategie dobíjení

4 Příklad výpočtu dimenzování trakčních baterií pro reálný denní cyklus

Pro názornost provedeme výpočet dimenzování trakčních baterií. Vstupní veličiny, konstanty a parametry jsou zadány v *tabulce 4.1*.

4.1 Vstupní parametry

Tabulka 4.1 Vstupní veličiny, konstanty a parametry

Rychlost $v_k(t)$ [km.h ⁻¹]	SORT 2
Průběh převýšení trati $h(t)$ [m]	neuvažuje se
Pohotovostní hmotnost m_{poh} [kg]	11 500
Hmotnost pasažérů m_{osob} [kg]	5 000
Konstanta k_J [-]	1,1
Konstanta karoserie a [-]	8
Konstanta karoserie b [-]	0,207
Konstanta karoserie c [-]	0,0031
Účinnost převodovky η_G [-]	0,97
Účinnost trakčního motoru η_M [-]	0,75
Účinnost měniče η_C [-]	0,98
Účinnost baterií (cyklu) η_B [-]	0,81
Hloubka cyklu h_{DOD} [%]	80
Rezerva na pokles kapacity k_{PKP} [-]	1,20
Rezerva projektanta k_{REP}	1,05
Příkon pomocných pohonů P_{PP} [W]	5 000
Spotřeba palubní sítě 24 V P_{24V} [W]	1 000
Příkon topení P_{TOP} [W]	nezávislé naftové
Příkon klimatizace P_{KLIM} [W]	bez klimatizace
Maximální hmotnost baterií m_{MAX} [kg]	2 000
Hustota energie e_m [Wh/kg]	100
Počet nabíjecích cyklů při mez teplotě n_{TMEZ}	8 000

4.1.1 Výpočet veličin a konstant potřebných pro další výpočty

- a) Celková hmotnost vozidla m_V [kg]

$$m_V = m_{poh} + m_{osob} = 11500 + 5000 = 16500 \text{ kg}$$

- b) Ekvivalentní hmotnost vozidla m_E [kg]

$$m_E = m_{poh} \cdot k_J + m_{osob} = 11500 \cdot 1,1 + 5000 = 17650 \text{ kg}$$

- c) Tíha vozidla G_V [N]

$$G_V = m_V \cdot g = m_V \cdot 9,81 = 16500 \cdot 9,81 = 161865 \text{ N}$$

- d) Tíha vozidla G_{Vk} [kN]

$$G_{Vk} = \frac{G_V}{1000} = \frac{161865}{1000} = 161,865 \text{ kN}$$

- e) Účinnost trakčního pohonu η_{TR} [-]

$$\eta_{TR} = \eta_B \cdot \eta_C \cdot \eta_M \cdot \eta_G = 0,81 \cdot 0,98 \cdot 0,75 \cdot 0,97 = 0,58$$

- f) Koeficient hloubky vybití k_{DOD} [-]

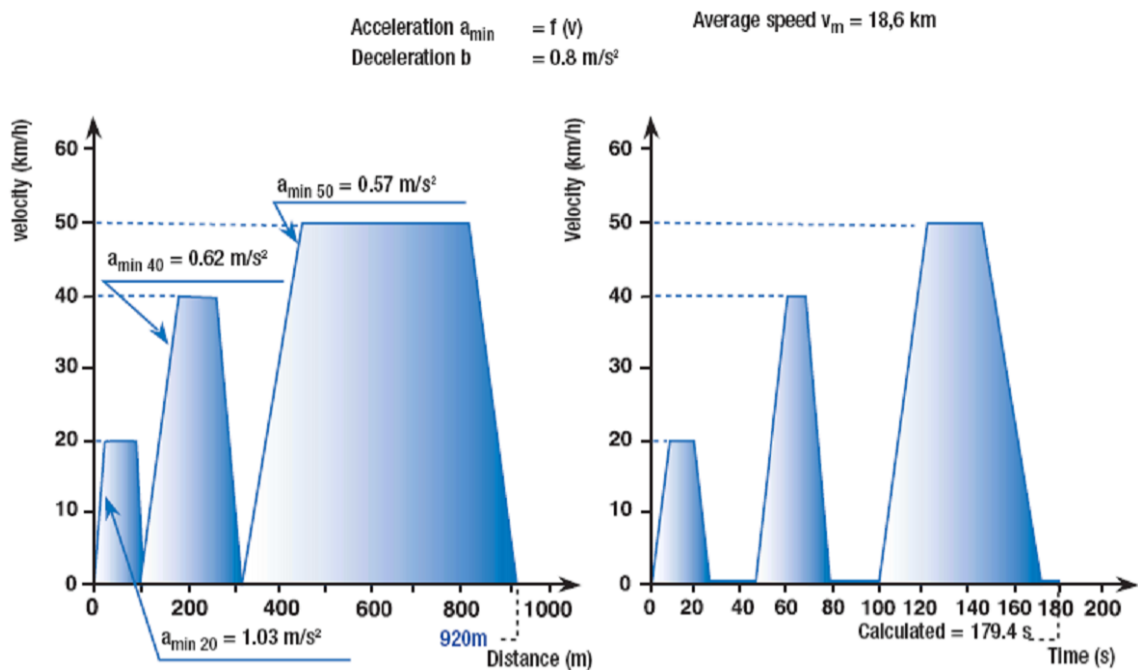
$$k_{DOD} = \frac{100}{h_{DOD}} = \frac{100}{80} = 1,25$$

4.1.2 Výpočet energie v jízdním cyklu SORT 2

K umožnění objektivního porovnání parametrů silničních vozidel zavedl Mezinárodní svaz veřejné dopravy (UITP) tři základní druhy provozů. SORT1 pro těžký městský provoz, SORT 2 pro lehký městský provoz a SORT 3 pro příměstský provoz.

Na *obr. 4.1* je grafické znázornění cyklu SORT 2 s vyznačenými základními parametry. Jízdní cyklus SORT 2 se skládá ze tří na sebe navazujících základních cyklů s cílovými rychlostmi 20 km.h⁻¹, 40 km.h⁻¹ a 50 km.h⁻¹. Délky jednotlivých úseků jsou 100 m, 220 m a 600 m. Doby jízdy konstantní rychlostí jsou 12 s, 4 s a 23 s. [2]

Pro další výpočty bude výhodné spočítat nejprve celkové ztráty energie v úplném jízdním cyklu dle definice SORT 2.



Obr. 4.1 Jízdní cyklus SORT 2 (převzato z [2])

1. Ztráty v trakční části $\Delta E_{TR_{cykl}}$, pro výpočet použijeme upravený vzorec (3.1.8) a integrujeme každou část křivky zvlášť pro každý základní cykl.

1.1 První základní cykl

1.1 a) Rozjezd z klidu na cílovou rychlost 20 km.h^{-1} se zrychlením $1,03 \text{ m.s}^{-2}$

$$a = k = 1,03 \text{ m.s}^{-2}, \text{ dosažená rychlost } v_k = 20 \text{ km.h}^{-1}$$

$$v = \frac{v_k}{3,6} = \frac{20}{3,6} = 5,56 \text{ m.s}^{-1}$$

$$T_C = t_{1a} = \frac{|0 - v|}{a} = \frac{5,56}{1,03} = 5,40 \text{ s}$$

$$\Delta E_{TR1a} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \cdot k^2 \cdot \frac{T_C^2}{2} = \frac{1 - 0,58}{0,58} \cdot 17650 \cdot 1,03^2 \cdot \frac{5,4^2}{2} = 197696 \text{ Ws}$$

1.1 b) Jízda ustálenou rychlostí 20 km.h^{-1} . Ztráty tohoto druhu nevznikají.

1.1 c) Brzdění z rychlosti 20 km.h^{-1} do zastavení, se zpomalením $0,8 \text{ m.s}^{-2}$

$$T_C = t_{1c} = \frac{v - 0}{a} = \frac{5,56}{0,8} = 6,95 \text{ s}$$

$$\Delta E_{TR1c} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \cdot k^2 \cdot \frac{T_C^2}{2} = \frac{1 - 0,58}{0,58} \cdot 17650 \cdot 0,8^2 \cdot \frac{6,95^2}{2} = 196986 \text{ Ws}$$

1.2 Druhý základní cykl

1.2 a) Rozjezd z klidu na cílovou rychlost 40 km.h⁻¹ se zrychlením 0,62 m.s⁻²

$$a = k = 0,62 \text{ m.s}^{-2}, \text{ dosažená rychlost } v_k = 40 \text{ km.h}^{-1}$$

$$v = \frac{v_k}{3,6} = \frac{40}{3,6} = 11,11 \text{ m.s}^{-1}$$

$$T_C = t_{2a} = \frac{|0 - v|}{a} = \frac{11,11}{0,62} = 17,92 \text{ s}$$

$$\Delta E_{TR2a} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \cdot k^2 \cdot \frac{T_C^2}{2} = \frac{1 - 0,58}{0,58} \cdot 17650 \cdot 0,62^2 \cdot \frac{8,96^2}{2} = 788953 \text{ Ws}$$

1.2 b) Jízda ustálenou rychlostí 40 km.h⁻¹. Ztráty tohoto druhu nevznikají.1.2 c) Brzdění z rychlosti 40 km.h⁻¹ do zastavení, se zpomalením 0,8 m.s⁻²

$$T_C = t_{2c} = \frac{v - 0}{a} = \frac{11,11}{0,8} = 13,89 \text{ s}$$

$$\Delta E_{TR2c} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \cdot k^2 \cdot \frac{T_C^2}{2} = \frac{1 - 0,58}{0,58} \cdot 17650 \cdot 0,8^2 \cdot \frac{13,89^2}{2} = 788795 \text{ Ws}$$

1.3 Třetí základní cykl

1.3 a) Rozjezd z klidu na cílovou rychlost 50 km.h⁻¹ se zrychlením 0,57 m.s⁻²

$$a = k = 0,57 \text{ m.s}^{-2}, \text{ dosažená rychlost } v_k = 50 \text{ km.h}^{-1}$$

$$v = \frac{v_k}{3,6} = \frac{50}{3,6} = 13,89 \text{ m.s}^{-1}$$

$$T_C = t_{3a} = \frac{|0 - v|}{a} = \frac{13,89}{0,57} = 24,37 \text{ s}$$

$$\Delta E_{TR3a} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \cdot k^2 \cdot \frac{T_C^2}{2} = \frac{1 - 0,58}{0,58} \cdot 17650 \cdot 0,57^2 \cdot \frac{24,37^2}{2} = 1232739 \text{ Ws}$$

1.3 b) Jízda ustálenou rychlostí 50 km.h⁻¹. Ztráty tohoto druhu nevznikají.1.3 c) Brzdění z rychlosti 50 km.h⁻¹ do zastavení, se zpomalením 0,8 m.s⁻²

$$T_C = t_{3c} = \frac{v - 0}{a} = \frac{13,89}{0,8} = 17,36 \text{ s}$$

$$\Delta E_{TR3c} = \frac{1 - \eta_{TR}}{\eta_{TR}} m_E \cdot k^2 \cdot \frac{T_C^2}{2} = \frac{1 - 0,58}{0,58} \cdot 17650 \cdot 0,8^2 \cdot \frac{17,36^2}{2} = 1232935 \text{ Ws}$$

Celkové ztráty v trakční části ΔE_{TRcykl} za jeden cykl SORT 2:

$$\begin{aligned} \Delta E_{TRcykl} &= \Delta E_{TR1a} + \Delta E_{TR1c} + \Delta E_{TR2a} + \Delta E_{TR2c} + \Delta E_{TR3a} + \Delta E_{TR3c} = \\ &= 197696 + 196986 + 788953 + 788795 + 1232739 + 1232935 = \\ &= \mathbf{4438104 \text{ Ws}} \end{aligned}$$

2. Ztráty jízdními odpory ΔE_{JOcykl} , pro výpočty použijeme upravenou rovnici (3.1.15) a rovnici (3.1.16), integrujeme každou část křivky zvlášť pro každý základní cykl.

2.1 První základní cykl

2.1 a) Rozjezd z klidu na cílovou rychlost 20 km.h⁻¹ se zrychlením 1,03 m.s⁻²

$$a = k = 1,03 \text{ m.s}^{-2}, \text{ dosažená rychlost } v_k = 20 \text{ km.h}^{-1}$$

$$v = \frac{v_k}{3,6} = \frac{20}{3,6} = 5,56 \text{ m.s}^{-1}$$

$$T_C = t_{1a} = \frac{|0 - v|}{a} = \frac{5,56}{1,03} = 5,40 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{JO1a} &= G_{vk} \cdot k \cdot T_C^2 \left(a \frac{1}{2} + 3,6bk \frac{T_C}{3} + c(3,6k)^2 \frac{T_C^2}{4} \right) = \\ &= 161,87 \cdot 1,03 \cdot 5,4^2 \left(8 \frac{1}{2} + 3,6 \cdot 0,207 \cdot 1,03 \frac{5,4}{3} + 0,0031 \cdot (3,6 \cdot 1,03)^2 \frac{5,4^2}{4} \right) = \\ &= 27674 \text{ J} \end{aligned}$$

2.1 b) Jízda ustálenou rychlostí 20 km.h⁻¹ po dobu 12 s.

$$\begin{aligned} \Delta W_{JO1b} &= \frac{G_{vk}}{3,6} \cdot T_C (a \cdot v_k + b v_k^2 + c v_k^3) = \\ &= \frac{161,87}{3,6} \cdot 12 (8 \cdot 20 + 0,207 \cdot 20^2 + 0,0031 \cdot 20^3) = 144388 \text{ J} \end{aligned}$$

2.1 c) Brzdění z rychlosti 20 km.h⁻¹ do zastavení, se zpomalením 0,8 m.s⁻²

$$T_C = t_{1c} = \frac{v - 0}{a} = \frac{5,56}{0,8} = 6,95 \text{ s}$$

$$\begin{aligned}\Delta W_{J01c} &= G_{V_k} \cdot k \cdot T_c^2 \left(a \frac{1}{2} + 3,6bk \frac{T_c}{3} + c(3,6k)^2 \frac{T_c^2}{4} \right) = \\ &= 161,87 \cdot 0,8 \cdot 6,95^2 \left(8 \frac{1}{2} + 3,6 \cdot 0,207 \cdot 0,8 \frac{6,95}{3} + 0,0031 \cdot (3,6 \cdot 0,8)^2 \frac{6,95^2}{4} \right) = \\ &= 35599 \text{ J}\end{aligned}$$

2.2 Druhý základní cykl

2.2 a) Rozjezd z klidu na cílovou rychlost 40 km.h⁻¹ se zrychlením 0,62 m.s⁻²

$$a = k = 0,62 \text{ m.s}^{-2}, \text{ dosažená rychlost } v_k = 40 \text{ km.h}^{-1}$$

$$v = \frac{v_k}{3,6} = \frac{40}{3,6} = 11,11 \text{ m.s}^{-1}$$

$$T_c = t_{2a} = \frac{|0 - v|}{a} = \frac{11,11}{0,62} = 17,92 \text{ s}$$

$$\begin{aligned}\Delta W_{J02a} &= G_{V_k} \cdot k \cdot T_c^2 \left(a \frac{1}{2} + 3,6bk \frac{T_c}{3} + c(3,6k)^2 \frac{T_c^2}{4} \right) = \\ &= 161,87 \cdot 0,62 \cdot 17,92^2 \left(8 \frac{1}{2} + 3,6 \cdot 0,207 \cdot 0,62 \frac{17,92}{3} + \right. \\ &\quad \left. + 0,0031 \cdot (3,6 \cdot 0,62)^2 \frac{17,92^2}{4} \right) = 257806 \text{ J}\end{aligned}$$

2.2 b) Jízda ustálenou rychlostí 40 km.h⁻¹ po dobu 4 s.

$$\begin{aligned}\Delta W_{J02b} &= \frac{G_{V_k}}{3,6} \cdot T_c (a \cdot v_k + b v_k^2 + c v_k^3) = \\ &= \frac{161,87}{3,6} \cdot 4(8 \cdot 40 + 0,207 \cdot 40^2 + 0,0031 \cdot 40^3) = 152805 \text{ J}\end{aligned}$$

2.2 c) Brzdění z rychlosti 40 km.h⁻¹ do zastavení, se zpomalením 0,8 m.s⁻²

$$T_c = t_{2c} = \frac{v - 0}{a} = \frac{11,11}{0,8} = 13,89 \text{ s}$$

$$\begin{aligned}\Delta W_{J02c} &= G_{V_k} \cdot k \cdot T_c^2 \left(a \frac{1}{2} + 3,6bk \frac{T_c}{3} + c(3,6k)^2 \frac{T_c^2}{4} \right) = \\ &= 161,87 \cdot 0,8 \cdot 13,89^2 \left(8 \frac{1}{2} + 3,6 \cdot 0,207 \cdot 0,8 \frac{13,89}{3} + \right. \\ &\quad \left. + 0,0031 \cdot (3,6 \cdot 0,8)^2 \frac{13,89^2}{4} \right) = 199876 \text{ J}\end{aligned}$$

2.3 Třetí základní cykl

2.3 a) Rozjezd z klidu na cílovou rychlost 50 km.h⁻¹ se zrychlením 0,57 m.s⁻²

$$a = k = 0,57 \text{ m.s}^{-2}, \text{ dosažená rychlost } v_k = 50 \text{ km.h}^{-1}$$

$$v = \frac{v_k}{3,6} = \frac{50}{3,6} = 13,89 \text{ m.s}^{-1}$$

$$T_c = t_{3a} = \frac{|0 - v|}{a} = \frac{13,89}{0,57} = 24,37 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{J03a} &= G_{V_k} \cdot k \cdot T_c^2 \left(a \frac{1}{2} + 3,6bk \frac{T_c}{3} + c(3,6k)^2 \frac{T_c^2}{4} \right) = \\ &= 161,87 \cdot 0,57 \cdot 24,37^2 \left(8 \frac{1}{2} + 3,6 \cdot 0,207 \cdot 0,57 \frac{24,37}{3} + \right. \\ &\quad \left. + 0,0031 \cdot (3,6 \cdot 0,57)^2 \frac{24,37^2}{4} \right) = 514443 \text{ J} \end{aligned}$$

2.3 b) Jízda ustálenou rychlostí 50 km.h⁻¹ po dobu 23 s.

$$\begin{aligned} \Delta W_{J03b} &= \frac{G_{V_k}}{3,6} \cdot T_c (a \cdot v_k + bv_k^2 + cv_k^3) = \\ &= \frac{161,87}{3,6} \cdot 23 (8 \cdot 50 + 0,207 \cdot 50^2 + 0,0031 \cdot 50^3) = 1349591 \text{ J} \end{aligned}$$

2.3 c) Brzdění z rychlosti 50 km.h⁻¹ do zastavení, se zpomalením 0,8 m.s⁻²

$$T_c = t_{3c} = \frac{v - 0}{a} = \frac{13,89}{0,8} = 17,36 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{J03c} &= G_{V_k} \cdot k \cdot T_c^2 \left(a \frac{1}{2} + 3,6bk \frac{T_c}{3} + c(3,6k)^2 \frac{T_c^2}{4} \right) = \\ &= 161,87 \cdot 0,8 \cdot 17,36^2 \left(8 \frac{1}{2} + 3,6 \cdot 0,207 \cdot 0,8 \frac{17,36}{3} + \right. \\ &\quad \left. + 0,0031 \cdot (3,6 \cdot 0,8)^2 \frac{17,36^2}{4} \right) = 366328 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{J0cykl} &= \Delta W_{J01a} + \Delta W_{J01b} + \Delta W_{J01c} + \Delta W_{J02a} + \Delta W_{J02b} + \Delta W_{J02c} + \\ &\quad + \Delta W_{J03a} + \Delta W_{J03b} + \Delta W_{J03c} = \\ &= 27674 + 144388 + 35599 + 257806 + 152805 + 199876 + \\ &\quad + 514443 + 1349591 + 366328 = \mathbf{3048510 \text{ J}} \end{aligned}$$

Celkové ztráty jízdními odpory ΔE_{JOcycl} za jeden cykl dle SORT 2:

$$\Delta E_{JOcycl} = \frac{\Delta W_{JOcycl}}{\eta_{TR}} = \frac{3048510}{0,58} = 5256051 \text{ Ws}$$

Celkové ztráty ΔE_{cycl} za jeden cykl SORT 2:

$$\Delta E_{cycl} = \Delta E_{TRcycl} + \Delta E_{JOcycl} = 4438104 + 5256051 = 9694155 \text{ Ws}$$

4.1.3 Dimenzování trakčních baterií bez dobíjení během jízdního dne

Jednotlivá jízda z výchozí konečné A do cílové konečné B představuje 6 cyklů SORT 2, stejně tak opačný směr z konečné B do A. Na každé konečné je 15 minut přestávka, kdy jsou všechny spotřebiče elektrobuse vypnuty. Těchto jízd bude vykonáno celkem 7. To představuje 42 cyklů SORT 2, což odpovídá 2,1 h jízdy.

Budeme vycházet energie na pokrytí celkových ztrát za jeden cykl ΔE_{cycl} a vypočítáme ztráty ve všech 42 cyklech vykonaných za celý jízdní den:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n (\Delta E_{cycl})_i = 9694155 \cdot 42 = 407154510 \text{ Ws}$$

Následuje výpočet spotřebované energie stálými spotřebiči za celý den provozu $T = 2,4$ h dle rovnic (3.1.1) a (3.1.2):

$$P_{SS} = P_{PP} + P_{24V} + P_{TOP} + P_{KLIM} = 5000 + 1000 + 0 + 0 = 6000 \text{ W}$$

$$E_{SS} = P_{SS} \cdot T = 6000 \cdot 2,1 = 12600 \text{ Wh}$$

Celková potřebná energie trakční baterie:

$$\begin{aligned} E_{BAT} &= k_{DOD} \cdot k_{PKP} \cdot k_{REP} \left(\frac{\Delta E}{3600} + E_{SS} \right) = \\ &= 1,25 \cdot 1,20 \cdot 1,05 \left(\frac{407154510}{3600} + 12600 \right) = 197975 \text{ Wh} \end{aligned}$$

Ještě provedeme kontrolu, zda vypočtená baterie vyhovuje svojí hmotností. Maximální hmotnost baterií $m_{MAX} = 2000$ kg:

$$m_{BAT} = \frac{E_{BAT}}{m_E} = \frac{197975}{100} = 1980 \text{ kg}$$

Hmotnost baterie vyhovuje, algoritmus dimenzování je u konce.

4.1.4 Dimenzování trakčních baterií s dobíjením na konečných zastávkách

V tomto případě každá jednotlivá jízda, z výchozí konečné A do cílové konečné B, představuje 10 cyklů SORT 2 (30 minut jízdy). Totéž je i v opačném směru z konečné B do A. Těchto jednotlivých jízd bude vykonáno celkem 12, to je 120 cyklů SORT 2, to odpovídá 6 h jízdy. Na každé konečné je 15 minut přestávka, kdy jsou všechny spotřebiče elektrobuse vypnuty. To znamená, že po 10 vykonaných cyklech SORT 2 bude možno po dobu cca 13 minut dobít baterie.

Budeme vycházet z energie na pokrytí celkových ztrát za jeden cyklus SORT 2 ΔE_{cykl} a vypočítáme ztráty v 10 cyklech, to odpovídá ztrátám energie za dobu mezi dobíjením:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n (\Delta E_{\text{cykl}})_i = 9694155 \cdot 10 = 96941550 \text{ Ws}$$

Dále vypočteme dle vztahů (3.1.1) a (3.1.2) spotřebovanou energii stálými spotřebiči za dobu mezi dobíjením, $T = 0,5 \text{ h}$:

$$P_{SS} = P_{PP} + P_{24V} + P_{TOP} + P_{KLIM} = 5000 + 1000 + 0 + 0 = 6000 \text{ W}$$

$$E_{SS} = P_{SS} \cdot T = 6000 \cdot 0,5 = 3000 \text{ Wh}$$

Celková potřebná energie trakční baterie za dobu mezi dobíjením E_{SUM1} (dle kapitoly 3.3):

$$\begin{aligned} E_{SUM1} &= k_{DOD} \cdot k_{PKP} \cdot k_{REP} \left(\frac{\Delta E}{3600} + E_{SS} \right) = 1,25 \cdot 1,2 \cdot 1,05 \left(\frac{96941550}{3600} + 3000 \right) = \\ &= 47137 \text{ Wh} \end{aligned}$$

Dále dosadíme do vztahu (3.4.3) pro dimenzování energie trakční baterie s ohledem na její životnost, kde dobu životnosti t_{RZIV} stanovíme 5 let, počet nabíjecích cyklů při mezní teplotě n_{TMEZ} je dle údaje výrobce baterie 8000 cyklů. Počet nabíjení n_{NAB} odpovídá počtu vykonaných jízd za den, tedy 12 nabíjení.

$$E_{BAT} = \frac{t_{RZIV} \cdot 365 \cdot E_{SUM1} \cdot n_{NAB}}{n_{TMEZ}} = \frac{5 \cdot 365 \cdot 47137 \cdot 12}{8000} = 129037 \text{ Wh}$$

Ještě zbývá provést kontrolu, zda vypočtená baterie vyhovuje svojí hmotností. Maximální hmotnost baterií $m_{MAX} = 2000 \text{ kg}$:

$$m_{BAT} = \frac{E_{BAT}}{m_E} = \frac{129037}{100} = 1290 \text{ kg}$$

Hmotnost baterie s rezervou vyhovuje, algoritmus dimenzování je u konce.

4.2 Program pro výpočet dimenzování trakčních baterií

V kapitole 4.1 je příklad výpočtu dimenzování trakčních baterií. Je zřejmé, že výpočty jsou poměrně pracné. Z tohoto důvodu jsem vytvořil ve výpočetním prostředí tabulkového procesoru MS Excel aplikaci, která nám tento výpočet podstatným způsobem usnadní, navíc obsahuje celou řadu dalších užitečných funkcí.

4.2.1 Systémové požadavky

- Operační systém Microsoft Windows (XP, Vista, Windows 7) s nainstalovanou aplikací Microsoft Excel 2010 (součástí programového balíku MS Office 2010)
- Rozlišení monitoru min.800 x 600 dpi (doporučené 1280 x 1024 dpi)
- Pro tisk grafů je doporučena inkoustová nebo laserová tiskárna formátu A4

4.2.2 Stručný popis programu

Základní úlohou programu je dimenzování trakčních baterií pro pohon elektrobuse na základě zadaných hodnot a parametrů. To představuje jednak výpočet potřebné energie trakční baterie pro zvolený nebo zadaný jízdní cyklus a také pro požadovanou dobu provozu (celý jízdní den). Délka jednoho zadávaného cyklu je omezena na 3600 s. Program kontroluje, zda hmotnost vypočtené trakční baterie nepřesahuje zadanou maximální hodnotu. Pokud ano, provede dimenzování trakční baterie s rychlonabíjením na konečných zastávkách a vypočte potřebnou kapacitu baterie pro zvolené napětí a nabíjecí proud.

Další užitečné výpočtové funkce:

- Ujetá vzdálenost za celý jízdní den
- Ujetá vzdálenost mezi konečnými zastávkami
- Maximální výkon odebraný z baterie
- Hodnota špičkového proudu baterie
- Hodnota nabíjecího proudu jako násobek kapacity baterie
- Graf průběhu rychlosti zadaného cyklu $v_k = f(t)$ (obr. 4.3)
- Graf průběhu stoupání zadaného cyklu $h = f(t)$ (obr. 4.4)
- Graf průběhu výkonů v zadaném cyklu

V dolní části obrazovky (obr. 4.2) lze kliknutím na ouško příslušného listu přepnout na zobrazení grafu průběhu rychlosti (modré ouško), grafu stoupání (oranžové ouško) a grafu výkonů (zelené ouško). List „Výpočty“ obsahuje většinu hlavních početních operací,

v žádném případě by do něho nemělo být zasahováno. Na listu „Strategie dobíjení“ jsou provedeny výpočty v případě dimenzování s dobíjením na konečných zastávkách. List „Data“ obsahuje předdefinované jízdní cykly, které jsou přenášeny na hlavní list „Vstupní a výstupní hodnoty“, kterému se budeme blíže věnovat v následující kapitole.

4.2.3 Zadávání dat

Pro obsluhu programu je vyžadována pouze základní znalost práce s aplikací Microsoft Excel 2010. Data se zadávají pouze do žlutě označených buněk (obr. 4.2). Ostatní buňky jsou uzamčeny proti provedení změny, při pokusu zapsat data do nesprávné buňky nemůže dojít k porušení správné funkce programu. Po vybrání konkrétní buňky se zobrazí nápovědný text s bližším popisem, co zadávaná hodnota reprezentuje, uvedena je také defaultní hodnota, případně interval vhodných hodnot. Z těchto důvodů je práce s programem do značné míry intuitivní.

Základem práce s programem je list „Vstupní a výstupní hodnoty“, zde se do žlutě označených buněk zadávají vstupní data (obr. 4.2). Nejprve si popíšeme dva řádky se světlemodrým pozadím. Do řádku s popisem Čas t se do jednotlivých buněk zapisují hodnoty času v sekundách, při kterých dochází ke změně rychlosti. K tomuto času se odpovídající rychlost v kilometrech za hodinu zapíše do buňky stejného sloupce, ale

Číslo záznamu jednoho cyklu		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Čas t [s]	180	0	5	17	24	43	61	65	79	98	122	145	162	180													
Rychlost v_k [km/h]	50	0	20	20	0	0	40	40	0	0	50	50	0	0													
Čas t_h [s]	0																										
Nadmořská výška h [m]	0																										

Pohotovostní hmotnost m_{pok} [kg]	11 500
Hmotnost pasažérů m_{pas} [kg]	5 000
Konstanta k_f [-]	1,10
Konstanta karoserie a [-]	8,00
Konstanta karoserie b [-]	0,207
Konstanta karoserie c [-]	0,0031
Účinnost převodovky η_c [%]	97,0
Účinnost trakčního motoru η_M [%]	75,0
Účinnost měniče η_c [%]	98,0
Účinnost baterií (cykly) η_B [%]	81,0
Hloubka cyklu h_{DOD} [%]	80,0
Koeficient poklesu kapacity k_{PKP} [-]	1,20
Projekční korekce k_{REP} [-]	1,15
Stálé spotřeby P_{SS} [kW]	6
Napětí U_B [V]	460
Maximální hmotnost baterií m_{MAX} [kg]	2 000
Hustota energie e_m [Wh/kg]	100
Požadovaná doba provozu [hod]	6
Doba jízdy mezi konečnými [min]	30
Doba pobytu na konečné [min]	15
Počet cyklů n_{TMEZ}	8000
Požadovaná životnost t_{RZIV} [rok]	5
Nabíjecí proud [A]	370

Výstupní data		
Energie čerpaná z baterií	10703	kWs
Energie získaná rekuperací	1456	kWs
Ztráty a trvalé odběry	9247	kWs
V maximu potenciální a kinetické energie	9829	kWs
Rekuperovaná energie přes 100 % C_N	0	Ws
Pro jeden cyklus:		
Ztráty v trakčním řetězci ΔE_{TRZET}	4484	kWs
Ztráty jízdními odpory ΔE_{JIZY}	5256	kWs
Požadovaná energie baterií	4713	Wh
Požadovaná kapacita baterií	10,2	Ah
Kapacita baterií pro požadovanou dobu provozu:		
Požadovaná energie baterií E_{BAT}	565560	Wh
Požadovaná kapacita baterií	1230	Ah
Maximální kapacita z omezení hmotnosti	435	Ah

Nelze docílit kapacity baterie z důvodu omezení její maximální hmotnosti!
Baterie musí být dobíjeny na obou konečných.

Ujetá vzdálenost za dobu provozu	111	km
Ujetá vzdálenost mezi konečnými	9,3	km
Maximální celkový výkon baterií	348	kW
Špičkový proud během jízdy	757	A
Nabíjecí proud je x-násobkem kapacity	0,89	xC

Strategie dobíjení	
Dobíjení na konečné	AB
Počet dobíjení	11
Dobitá kapacita [Ah]	814
Kapacita baterií [Ah]	416

Panel rychlého vložení	
E. M. C.	Vloží data Elementární městský cyklus ČSN EN 1986-1
SORT 1	
SORT 2	
SORT 3	
Výpočet	

Obr. 4.2 Snímek hlavní obrazovky programu pro dimenzování trakčních baterií

o řádek níže, označeného *Rychlost* v_k . Pro usnadnění zadávání dat průběhu rychlosti jsou v programu předdefinovány čtyři základní cykly. Jsou to elementární městský cyklus dle ČSN EN 1986-1 a cykly SORT 1, 2 a 3 (viz kapitola 4.1.2). Tyto cykly se jednoduše vloží stisknutím příslušného tlačítka na *Panelu rychlého vložení*. Po přesunutí kurzoru myši nad tlačítko se zobrazí nápovědný text s popisem akce, která se vykoná po jeho stisknutí. Stejným způsobem jako data pro rychlost se do odpovídajících buněk zadají data výškového profilu trati, pokud jsou k dispozici.

Dále je potřeba vyplnit údaje o vozidle, hodnoty účinností trakčního řetězce a další důležité parametry. Tyto hodnoty se zapisují do žlutě označeného sloupce buněk, přičemž v příslušné buňce nalevo je vždy základní popis vkládané hodnoty (obr. 4.2). Jak již bylo řečeno v úvodu, po vybrání konkrétní buňky se zobrazí nápovědný text, proto není potřebné zde detailně popisovat způsob zadávání dat do konkrétních buněk.

4.2.4 Výstup programu

Všechna podstatná výstupní data jsou k dispozici opět na hlavním listu „*Vstupní a výstupní hodnoty*“. V modrém okně (obr. 4.2) označeném *Výstupní data* najdeme hodnoty pro utvoření představy o tocích energie během zadaného jízdního cyklu. V těchto hodnotách jsou započteny kompletní ztráty a stálé spotřeby.

V podokně, jehož záhlaví je nadepsáno „*Pro jeden cykl:*“ jsou uvedeny ztráty v trakčním řetězci a ztráty jízdními odpory, které byly počítány numericky v kapitole 4.1.2. Porovnáním těchto hodnot byla ověřena funkčnost programu.

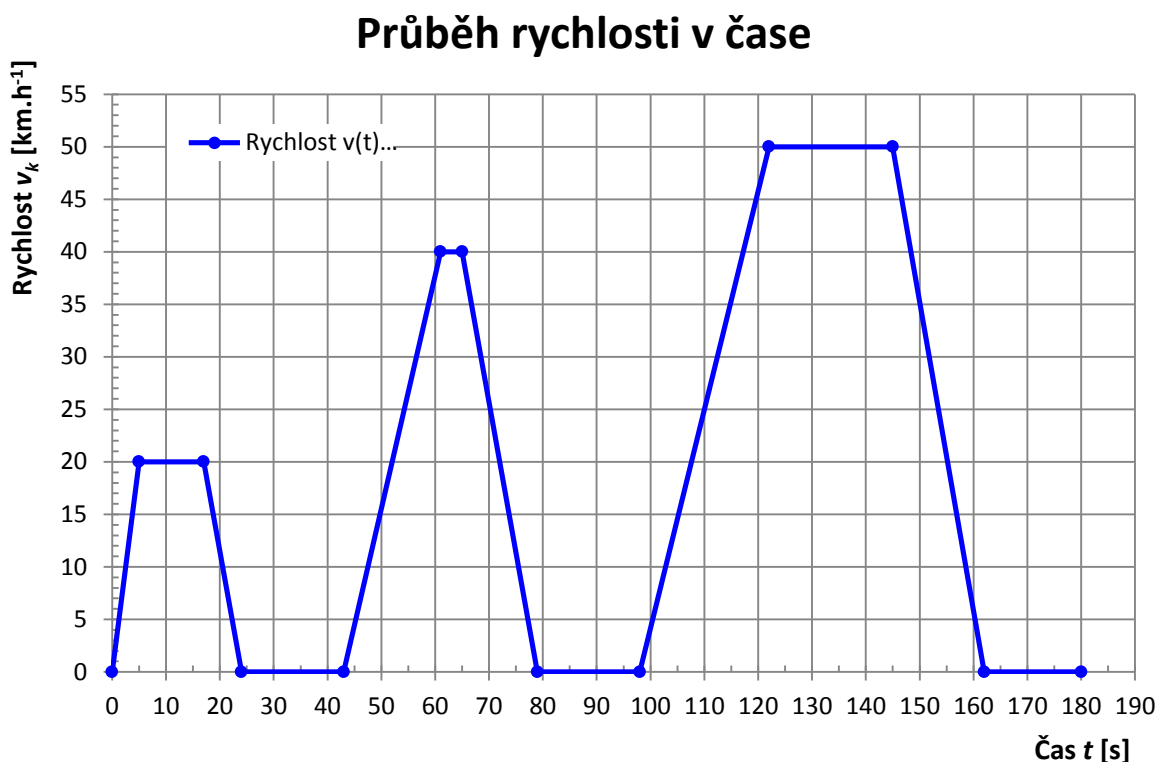
ΔE_{JOcycl} numericky 5 256 kW_s – program 5 256 kW_s hodnoty jsou naprosto shodné

ΔE_{TRcycl} numericky 4 438 kW_s – program 4 484 kW_s hodnoty se liší o 1 % což lze zanedbat.

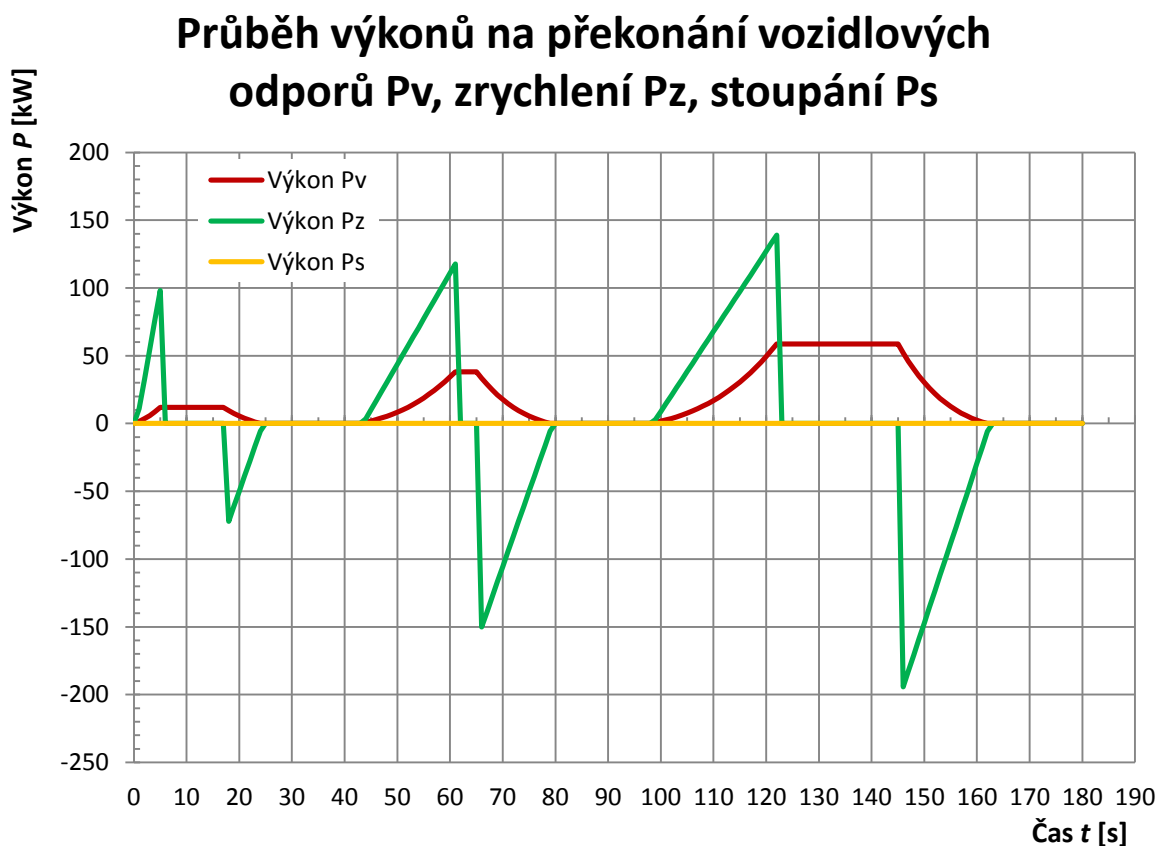
Ve třetím podokně, jehož záhlaví je pojmenováno „*Kapacita baterií pro požadovanou dobu provozu*“ nalezneme výsledné hodnoty požadované energie baterie a její požadovanou kapacitu. V případě, že je překročena maximální hmotnost baterie, je hodnota požadované kapacity zobrazena nekontrastním písmem. Tato situace je zachycena na obr. 4.2. Současně se zobrazí okno „*Strategie dobíjení*“, kde je navržena vhodná strategie dobíjení a vypočtena příslušná potřebná kapacita baterie.

Na obrázku 4.3 a 4.4 jsou zobrazeny grafy průběhu rychlosti a výkonů vygenerované programem na základě zadaných a vypočtených dat.

Další doplňkové funkce jsou zřejmé z popisků a není potřeba se jim blíže věnovat.



Obr. 4.4 Snímek grafu průběhu rychlosti



Obr. 4.3 Snímek grafu průběhu výkonů

5 Výběr neoptimálnější varianty trakční baterie

5.1 Kritéria výběru trakční baterie

Nejvýznamnější kritéria při výběru trakční baterie jsou malá měrná hmotnost a malý měrný objem na jednotku akumulované energie při vysoké účinnosti cyklu. Musí se respektovat požadavky na celkovou hmotnost a prostorovou náročnost vozidla. To znamená, že nesmí dojít k výraznému navýšení hmotnosti vozidla a v důsledku toho k omezení jeho obsaditelnosti. Baterie musí mít vysokou životnost zejména v počtu vybíjecích a nabíjecích cyklů. Předpokládá se i velká proudová zatížitelnost, z důvodu toků velkého množství energie v relativně krátkém čase při zpomalování vozidla a následném rozjíždění.

5.2 Výběr trakční baterie

Porovnáním vlastností a parametrů trakčních baterií popsaných v kapitole 1 a shrnutých v přehledové tabulce 5.1 je zřejmé, že neoptimálnější pro použití v hybridních nebo elektrických vozidlech jsou baterie technologie Li-ion. Nelze však jednoznačně určit, která lithiová baterie je horší či lepší. O vhodnosti použití odpovídajícího typu baterie pro daný projekt rozhodují konkrétní požadavky na ní kladené. Porovnávat mezi jednotlivými výrobci lze jen některé parametry, jako je hustota energie vztažená na hmotnost či objem. Životnost v počtu cyklů je výrobcem měřena při definovaných vybíjecích a nabíjecích cyklech při teplotě přibližně 23°C. Ve skutečném provozu se životnost může lišit.

Tabulka 5.1 Porovnání základních parametrů jednotlivých typů baterií

	Olověná baterie	NiCd	NiMH	Li - ion LiCoO ₂	Li - ion LiFePO ₄
Hustota energie [Wh/kg]	30-50	45-80	60-110	110-200	100-180
Životnost v počtu cyklů	200-300	1500	300-500	500-1000	3000+
Nabíjecí doba [hod.]	2-5	1	2-3	1-3	0,5-2
Samovybití [% za měsíc]	5	20	30	3	2
Napětí na článek [V]	2	1,2	1,2	3,6	3,2
Účinnost cyklu [%]	80	75	70	90	95
Poměrná cena k Pb baterii	1x	3-4x	3-4x	4-5x	3-4x
Úroveň bezpečnosti	2	1	1	4	1
Vliv na životní prostředí	3	4	2	2	1

Při vlastním výběru baterie se můžeme rozhodovat podle dvou klíčových parametrů:

- **Životnost** – leaderem v této oblasti je v současné době baterie $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ amerického výrobce AltairNano.

Výrobce udávané parametry [24]: životnost až 16 000 cyklů při 100% DOD, nebo 10–20 let, účinnost cyklu 90 % až 95 %, rychlonabíjení proudem až 10C na 90 % kapacity za 6 minut, pracovní teplota -40°C až $+55^\circ\text{C}$

- **Cena** – pro uspokojení tohoto požadavku je dobrá volba baterie LiFeYPO_4 čínského výrobce Winston Battery (dříve Thundersky).

Výrobce udávané parametry [23]: životnost až 1 000 cyklů při 100% DOD nebo až 5 000 cyklů při 80% DOD, hustota energie 100 Wh/kg, rychlonabíjení proudem max. 5C, pracovní teplota -45°C až $+85^\circ\text{C}$

6 Závěr

V první kapitole byly zavedeny a vysvětleny základní pojmy a názvosloví používané v problematice akumulace energie. Dále byl sestaven přehled akumulátorů energie vhodných pro použití v trakčních vozidlech s popisem jejich základních parametrů a vlastností. Klíčovými parametry pro použití v trakčních vozidlech jsou hustota energie, životnost, proudová zatížitelnost, bezpečnost a cena.

V další kapitole byly objasněny fyzikální veličiny a skutečnosti ovlivňující životnost trakčních baterií. Principiálně jsou to zejména velikost nabíjecího napětí, hloubka vybíjecího cyklu, pracovní teplota a velikost nabíjecího i vybíjecího proudu. S ohledem na životnost baterií musí být tyto parametry dodržovány dle předpisu výrobce. Toho lze dosáhnout sledováním každého článku baterie samostatně s použitím balancérů a systému řízení baterií (Battery Management System). Velikost vybíjecího a nabíjecího proudu lze v krajních případech udržovat v povolených mezích vhodným řízením trakčního a nabíjecího měniče. Kontejner s bateriemi je nutné izolovat od okolního prostředí a při provozu zajistit odpovídající chlazení k udržení stanovené provozní teploty. Odpadní teplo lze využít při nízkých venkovních teplotách k vytápění interiéru vozidla. V případě extrémních mrazů při odstavení vozidla mimo garáž je potřeba zajistit temperování kontejneru s bateriemi, aby nedošlo k poklesu teploty pod minimální povolenou hodnotu. Je zřejmé, že při tomto temperování musí být vozidlo připojeno k nabíjecímu zařízení. Toho lze využít k vytopení interiéru před odjezdem na trať.

Ve třetí kapitole je provedeno dimenzování trakčních baterií pro variantu bez dobíjení během denního jízdního cyklu a variantu s rychlodobíjením na konečných zastávkách. Algoritmy dimenzování jsou vytvořeny pro obě varianty, přičemž u rychlodobíjení je zohledněna i životnost trakčních baterií.

V další části práce je příklad výpočtu pro konkrétní jízdní cyklus SORT 2, definovaný pro lehký městský provoz. Výpočet je proveden nejprve pro dimenzování trakčních baterií bez dobíjení během jízdního dne. Pro 42 cyklů byla vypočítána potřebná energie trakční baterie 197 975 Wh. Při dimenzování trakčních baterií s dobíjením na konečných zastávkách byla pro 120 cyklů vypočítána potřebná energie trakční baterie 129 037 Wh. Na základě algoritmů z kapitoly 3.3 a 3.4 byl sestaven program pro výpočet dimenzování trakčních baterií. V této části je popis jeho funkce včetně porovnání

výsledků dosažených manuálním výpočtem a s pomocí programu. Hodnota nepřesnosti nepřesahuje 1 %.

V páté kapitole je proveden výběr neoptimálnější varianty trakční baterie. Zhodnocením všech aspektů popsanych v kapitole 1 je neoptimálnější volba baterie technologie Li-ion. Výběr konkrétního typu nelze provést obecně, konečné rozhodnutí se odvíjí od konkrétní aplikace a tomu odpovídajících požadavků na technicko-ekonomické parametry.

S čistě bateriovými pohony se v poslední době stále častěji setkáváme zejména v pohonných jednotkách osobních automobilů. Někteří renomovaní výrobci automobilů se snaží nabídnout alternativu v podobě vozidla s tichým a levným provozem, bez produkování škodlivých látek. Přestože jsou tyto pohony zatím nejdominantnější u osobních automobilů, velký potenciál k úspěchu mají právě v městské hromadné dopravě. U autobusového subsystému veřejné dopravy je problém emisí nejpálčivější a otvírají se zde perspektivní dimenze pro zúročení hlavních předností této koncepce pohonu. Je předpoklad, že při řešení budoucnosti hromadné dopravy bude stále více velkých měst ctít heslo „Čistý a ekologický provoz především“. Z těchto důvodů je bateriový městský autobus ideální volba.

Hlavní výhody čistě bateriového pohonu: [2]

- naprosto bezemisní provoz
- jednoduchost pohonného systému
- odpadají problémy se spoluprací více druhů pohonů
- autobus brzdí trakčním motorem a ukládá elektrickou energii zpět do baterií
- prodloužení servisních intervalů, nižší náklady na údržbu
- příznivější charakteristiky tažných sil
- menší hluk jak vně, tak uvnitř autobusu
- image „Zeleného dopravce“

Tyto výhody jsou dostatečně racionální argument pobízející k nákupu bateriových autobusů. Navíc dle informací pracovníků Škody Electric se náklady na provoz pro bateriový bus během životního cyklu velmi blíží nákladům na běžný dieselový autobus.

Použitá literatura

- [1] Jindra, J., Kozumplík, J.: *Akumulátory*, FCC PUBLIC, Praha 2003
- [2] Firemní literatura ŠKODA Electric
- [3] Marek, J., Stehlík, L.: *Hermetické akumulátory v praxi*, IN-EL, Praha 2004
- [4] Kennedy, B., Patterson, D., Camilleri, S.: *Use of lithium-ion batteries in electric vehicles*, Journal of Power Sources, Issue 2005
- [5] Kameš, J.: *Alternativní pohon automobilů*, BEN – technická literatura, 2004
- [6] Flajtingr, J., Kule, L.: *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*, ZČU, Plzeň 2005
- [7] Elstner, V.: *Recuperation energy systems in electric transportation*, ZČU FEL, Plzeň 2007
- [8] ČSN IEC 60050–482. *Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 482: Primární a akumulátorové články a baterie*. Praha: Český normalizační institut, 2005
- [9] Jansa, F.: *Vozidla elektrické trakce*, NADAS Praha, 1987
- [10] Hammerbauer, J.: *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*, ZČU FEL, Plzeň 1998
- [11] Mindl, P.: *Superkapacitory pro hybridní pohon vozidla*, FEL ČVUT, Plzeň 2009
- [12] UITP Focus, *Public transport for sustainable mobility*, 2002
- [13] EV Focus, *Electric and hybrid Vehikle Focus – Europe*, Issue 2007
- [14] <http://www.elektrochemie.zcu.cz> [online]
- [15] <http://batteryuniversity.com> [online]
- [16] <http://www.hybrid.cz> [online]
- [17] <http://www.battex.info> [online]
- [18] <http://www.varta-automotive.de> [online] [cit. 28. 1. 2012]
- [19] <http://www.saftbatteries.com> [online] [cit. 4. 2. 2012]
- [20] <http://www.ev-power.eu/index.php?src=adwords> [online] [cit. 5. 2. 2012]
- [21] <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/products/125v-tran-modules> [online] [cit. 5. 2. 2012]
- [22] <http://www.valence.com/energy-storage> [online] [cit. 11. 2. 2012]
- [23] <http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery> [online] [cit. 4. 2. 2012]
- [24] <http://www.altairnano.com/Innovation> [online] [cit. 11. 2. 2012]
- [25] <http://liionbms.com/php/cells.php> [online]
- [26] <http://gwl-power.tumblr.com/post/4837350405/faq-lifepo4-lifeypo4-cell-cycle-voltage-levels> [online] [cit. 3. 3. 2012]
- [27] <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml> [online]
- [28] <http://www.futureage.eu> [online]
- [29] <http://www.mpoweruk.com> [online]
- [30] <http://www.skoda.cz/cs/produkty/trolejbusy> [online]