

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Systém akumulace energie pro vozidla lehké trakce**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zuzana KÝROVÁ**  
Osobní číslo: **E10B0466P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Systém akumulace energie pro vozidla lehké trakce**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Proveďte analýzu systémů akumulace energie - topologie systémů pro ukládání brzdné energie, média pro ukládání energie atd.
2. Proveďte rozbor energetických stavů vozidel se systémy akumulace energie. Zvláště se zaměřením na využití rekuperované energie na vozidle.
3. Navrhněte uspořádání systému akumulace energie se zaměřením na vozidlo lehké trakce a využití Li-ion baterií.
4. Zhodnoťte přínosy nasazení systémů akumulace energie.




Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

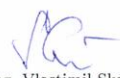
**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na způsoby akumulace kinetické energie vozidla při brzdění a efektivnost této akumulace u lehkých kolejových vozidel. Jako zásobník energie jsou uvažovány přednostně Li-ion baterie.

## **Klíčová slova**

Lehké kolejové vozidlo, kinetická energie vozidla, rekuperace, Li-ion baterie, pulzní měnič.

## **Abstract**

Presented bachelor thesis deals with systems of accumulation of the kinetic energy of the braked vehicle and the efectivity of this energy accumulation applicated in light rail vehicles. Mainly Li-ion batteries are considered for energy accumulation.

## **Key words**

Light rail vehicle, vehicle kinetic energy, recuperation, Li-ion battery, chopper.

## **Prohlášení**

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

.....  
podpis

V Plzni dne 6.6.2014

Zuzana Kýrová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Drábkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2 SYSTÉM AKUMULACE ENERGIE</b> .....	<b>11</b>
2.1 TOPOLOGIE SYSTÉMŮ .....	11
2.1.1 Zásobník energie na vozidle .....	11
2.1.2 Zásobník energie v měničce .....	11
2.2 MÉDIA PRO AKUMULACI ENERGIE .....	12
2.2.1 Superkondenzátory (velké P menší E) .....	12
2.2.2 Baterie (velké E, menší P) .....	13
2.2.3 Setrvačníky (velké P, menší E) .....	14
2.2.4 Supravodivé zásobníky energie (velké P, menší E) .....	14
<b>3 LI-ION BATERIE</b> .....	<b>15</b>
3.1 STRUKTURA LI-ION BATERÍ .....	15
3.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI LI-ION BATERÍ Z HLEDISKA JEJICH POUŽITÍ .....	17
3.3 POMOCNÁ ZAŘÍZENÍ LI-ION BATERÍ .....	20
<b>4 ENERGETICKÉ STAVY VOZIDEL</b> .....	<b>21</b>
4.1 ROZJEZD .....	22
4.2 JÍZDA KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ .....	23
4.3 JÍZDA VÝBĚHEM .....	23
4.4 BRZDĚNÍ .....	23
<b>5 NÁVRH SYSTÉMU PRO VOZIDLO LEHKÉ TRAKCE S VYUŽITÍM LI-ION BATERÍ</b> .....	<b>25</b>
5.1 VÝKON POHONU A ENERGIE VOZIDLA LEHKÉ TRAKCE .....	25
5.2 ROZBOR JÍZDY A ENERGETICKÝCH STAVŮ VOZIDLA .....	27
5.3 NÁVRH FUNKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ .....	30
<b>6 ZHODNOCENÍ PŘÍNOSŮ AKUMULACE ENERGIE</b> .....	<b>33</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>37</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>38</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$a$ .....	Zrychlení/zpomalení [ $m/s^2$ ]
$BMS$ .....	Řídicí systém baterie
$BTMS$ .....	Systém udržování teploty baterie (Battery Temperature Management System)
$DOD$ .....	Hloubka vybití baterie [%]
$E$ .....	Energie [ $Ws$ ]
$E_r$ .....	Rekuperovaná energie [ $Ws$ ]
$F$ .....	Tažná síla [ $N$ ]
$F'$ .....	Potřebná tažná síla [ $N$ ]
$LRV$ .....	Lehké kolejové vozidlo (Light Rail Vehicle)
$m$ .....	Hmotnost vozidla [ $kg, t$ ]
$P$ .....	Výkon [ $W$ ]
$PMDP$ .....	Plzeňské městské dopravní podniky
$Q$ .....	Jízdní odpor [ $N$ ]
$SOC$ .....	Stav nabití baterie [%]
$v$ .....	Rychlost vozidla [ $m/s; km/h$ ]

## Úvod

Provoz vozidel městské hromadné dopravy (MHD) a příměstské dopravy se vyznačuje četnými rozjezdy a brzděním. Při rozjezdech je potřebná relativně velká energie po relativně krátkou dobu, při brzdění pak je třeba vozidlu v relativně krátkém čase poměrně velkou energii odebrat. Pokud není při brzdění energie vozidla rekuperována, dochází tak k poměrně velkým ztrátám energie. Dalším výrazným negativem je, že se jedná o časově relativně krátké přesuny poměrně velkých energií, což působí negativně jednak na napájecí systém tratě, ale i na primární napájecí síť.

Zájmem provozovatelů je jednak snížit celkovou energetickou náročnost systému, jednak omezit v co největší dosažitelné míře špičkové proudy v napájecím systému. V současnosti sledovanou cestou, jak toho dosáhnout, je ukládání energie při brzdění do zásobníků energie a následné využití této energie při rozjezdu.

## 2 Systém akumulace energie

### 2.1 Topologie systémů

K ukládání energie vozidel pro jejich následné využití lze používat následná dvě základní uspořádání systému.

#### 2.1.1 Zásobník energie na vozidle

Výhody uspořádání se zásobníkem energie na vozidle jsou následující:

- bezprostřední ukládání a výběr energie bez ztrát ve vedení
- nezávislost na trolejovém vedení, možnost autonomní jízdy ze zásobníku energie.

Nevýhodami jsou:

- zvýšení hmotnosti vozidla o hmotnost zásobníku energie
- zásobník slouží pouze danému vozidlu.

#### 2.1.2 Zásobník energie v měničce

Výhodami uspořádání se zásobníkem energie v měničce jsou:

- nezvyšuje se hmotnost vozidla
- zásobník slouží více vozidlům
- možnost využití brzdové energie jednoho vozidla vozidlem jiným
- nižší celková cena zásobníků v systému.

Nevýhodami jsou:

- závislost na trolejovém vedení
- energetické ztráty v trolejovém vedení.

#### Porovnání zásobníku na vozidle a v měničce

Zásobník energie na vozidle je třeba dimenzovat na kinetickou energii tohoto vozidla maximálně zatíženého, jedoucího nejvyšší provozní rychlostí. Zásobník energie v měničce musí být dimenzován na kinetickou energii větší, než je kinetická energie jednoho vozidla. Návrh velikosti zásobníku energie v měničce musí vycházet z projektovaných podmínek provozu vozidel na trati, zejména z jejich maximálního počtu na trati, pravděpodobnosti současného/postupného brzdění a rozjezdů vozidel.

Potřebná velikost zásobníku energie na měnícím bude jednoznačně větší než zásobníku na jednom vozidle, ale celkově menší než by byla souhrnná velikost zásobníků na vozidlech. Pro zásobník energie v měnícím neplatí takové omezovací faktory na hmotnost a rozměry jako u zásobníku na vozidle. Výhodou zásobníku v měnícím je i skutečnost, že se jedná o stacionární zařízení, které není namáháno mechanickými rázy a třesy jako zásobník na vozidle.

Kvůli závislosti systému se zásobníkem v měnícím na trolejovém vedení dávají uživatelé přednost systému se zásobníkem na vozidle.

## 2.2 Média pro akumulaci energie

U zásobníků energie jsou důležité dva základní parametry - celková akumulovaná energie (E) a okamžitý výkon (P). Některá média se vyznačují relativně velkou akumulovanou energií, ale přitom mají limitovaný maximální výkon. Jiná média jsou schopna dodat velký okamžitý výkon, přičemž mají relativně malou celkovou akumulovanou energii [1].

### 2.2.1 Superkondenzátory (velké P menší E)

Superkondenzátory jsou kondenzátory s velkým poměrem akumulované energie k jejich rozměru a hmotnosti. Jejich vývoj v posledních cca 10 letech pokročil natolik, že jsou již prakticky použitelné jako zásobníky energie.

- Jmenovité napětí článků je malé.
- Dosažitelná kapacita článku je obrovská, i při větším počtu sériově řazených článků je výsledná kapacita řetězce technicky zajímavá.
- Superkondenzátor lze nabíjet/vybíjet relativně velkými proudy.

Vzhledem k malému napětí článků je pro praktické využití nutno řadit mnoho článků do série. Napětí kondenzátoru v provozu se pohybuje ve velkém rozsahu - od  $0,2 \div 0,5 U_{jmen.}$  do  $U_{max.}$ . Velký rozsah napětí kondenzátoru v provozu vyžaduje doplnění superkondenzátorového zásobníku přizpůsobovacím výkonovým měničem.

Energetická kapacita superkondenzátoru se pohybuje okolo 2 Wh/kg, 1,2 Wh/l (supercaps 125 V, 63 F firmy Maxwell včetně příslušenství; maximální proud 750 A). Pro vozidlo lehké trakce (40 t, 70 km/h) by zásobník energie velikosti 2000 Wh, schopný pojmout bezpečně maximální kinetickou energii vozidla, realizovaný ze superkondenzátorů měl hmotnost cca 1150 kg. K tomu je nutno připočítat hmotnost měniče, takže celková hmotnost systému na vozidle by se pohybovala okolo 1,5 t.

Životnost superkondenzátorů uváděná výrobcem je řádově  $10^6$  cyklů při vybíjení na jen  $\frac{1}{2}U_{jm.}$

Použitelná energie superkondenzátoru se dá vyjádřit vzorcem

$$E = 0,5C(U_{\max}^2 - U_{\min}^2). \quad (2.1)$$

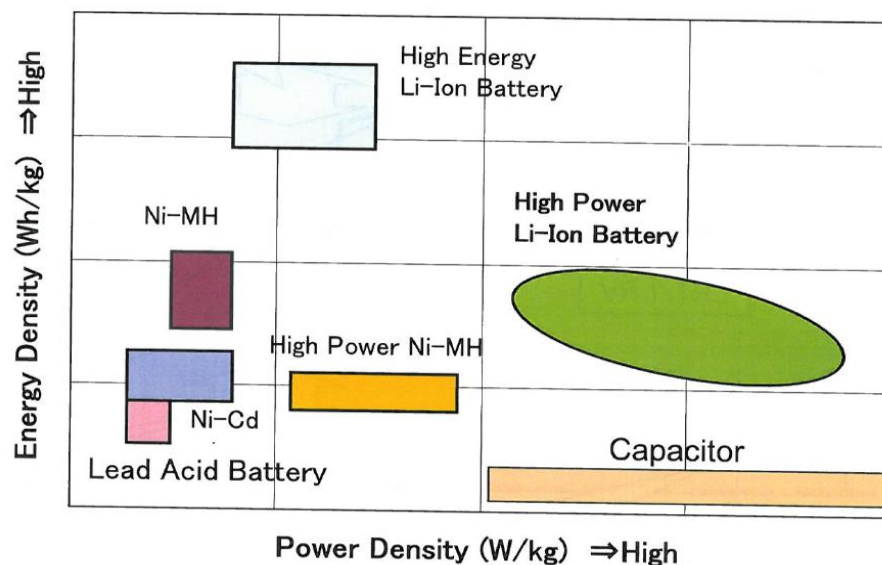
### 2.2.2 Baterie (velké E, menší P)

Nejrozšířenější, po dlouhou dobu užívané, jsou baterie olověné („kyselé“, s  $H_2SO_4$ ) a baterie NiCd (nikl-kadmiové, kde elektrolytem je louh). Oba tyto typy sice byly v minulosti a jsou ještě do jisté míry i v současnosti používány v pohonech elektromobilů, nákladních elektromobilů, bateriových vozíků („ještěrek“) apod., ale neuplatnily se v masovém měřítku, především pro jejich relativně malou měrnou kapacitu (Wh/kg). Určitou výjimkou jsou manipulační vozíky. U těchto vozíků není využívána rekuperace, vzhledem k charakteru jejich použití by neměla reálný význam. Baterie vozíků jsou dimenzovány na provoz přes den s tím, že následně jsou po celou noc nabíjeny.

Ani baterie jiných typů se nedočkaly masového rozšíření v pohonech vozidel, především pro jejich náročnost na provozní podmínky.

Výjimkou jsou Li-ion baterie. K jejich velikému rozvoji došlo nejdříve v oblasti napájení různých mobilních elektronických zařízení (mobilní telefony, notebooky apod.). Bouřlivý vývoj Li-ion baterií umožnil i jejich nasazení v trakti.

Konkrétním provedením Li-ion baterií lze získat tzv. High Energy baterie, určené především pro akumulaci velké energie nebo tzv. High Power, schopné poskytnout velký okamžitý výkon.



Obr. 2.1 Měrné hustoty energie a výkonu různých typů baterií [2]

### 2.2.3 Setrvačníky (velké P, menší E)

Na vývoji rekuperace energie při brzdění do setrvačnicků pracovala a pracuje řada firem již desítky let. Moderní setrvačnický jsou vinuty s kevlarových vláken, pracují s vysokými otáčkami (20.000 otáček/min. i více). Aby nedocházelo ke ztrátám třením o vzduch, umísťují se do vakuovaných prostor. Konstrukce setrvačnicků pro vozidla se řeší s ohledem na bezpečnost, aby v případě havárie vozidla energie v setrvačnicku nezpůsobila závažné škody. U setrvačnicků pro vozidla se řeší rovněž potlačení gyroskopického efektu. Přes veškerý pokrok ve vývoji setrvačnicků nenašel tento systém významnějšího rozšíření. Na tramvajích jsou setrvačnický použity např. ve městě Rotterdam.

Příklad setrvačnicku vinutého z kevlarových vláken je v příloze č. 1.

### 2.2.4 Supravodivé zásobníky energie (velké P, menší E)

Další z možností akumulace energie je její akumulace v magnetickém poli supravodivé cívky. Klíčovou částí takového zásobníku je supravodivý materiál. Současné supravodivé materiály se dělí na „nízkoteplotní“ (okolo 4K) a „vysokoteplotní“ (až 77K). Ale i „vysokoteplotní“ supravodiče vykazují dostatečnou výkonnost jen při velice nízkých teplotách – řádově 4K. Vývoj supravodivých materiálů je zaměřen na nalezení supravodivých materiálů vykazujících supravodivé vlastnosti při vyšších teplotách.

Supravodivý zásobník energie zabírá nezanedbatelný prostor. Do 1 m<sup>3</sup> magnetického pole lze sice teoreticky uložit energii cca 6 kWh/l, ale provedení cívky je nutno řešit s ohledem na homogenitu pole, magneticky odstínit, zajistit chlazení. Zatím neřešenou otázkou je i vliv rozptylového pole takových zásobníků na okolí. K ukládání/odebírání energie do/z supravodivého zásobníku slouží pulzní měnič [3].

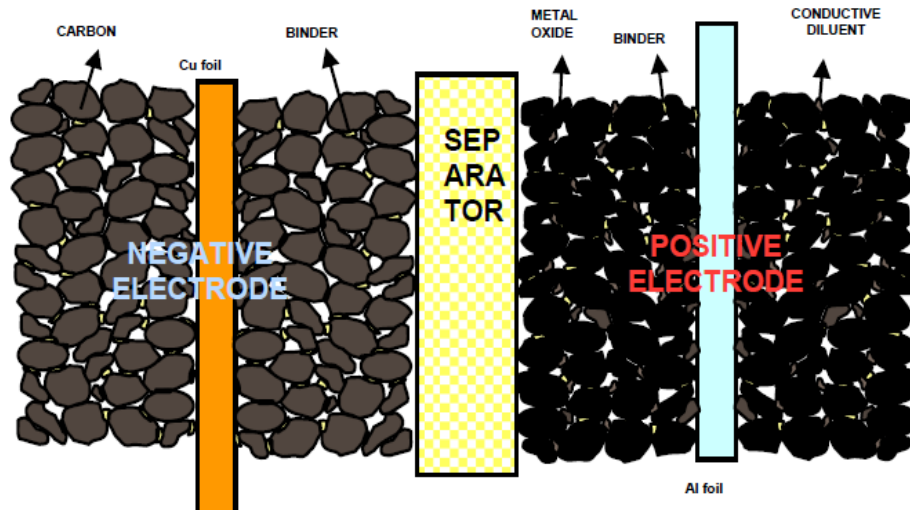
Příklad supravodivého zásobníku energie – Japonský SMES je v příloze č. 2.

Vzhledem ke složitosti systému se supravodivé zásobníky energie nejeví jako vhodné pro vozidla lehké trakce.

## 3 Li-ion baterie

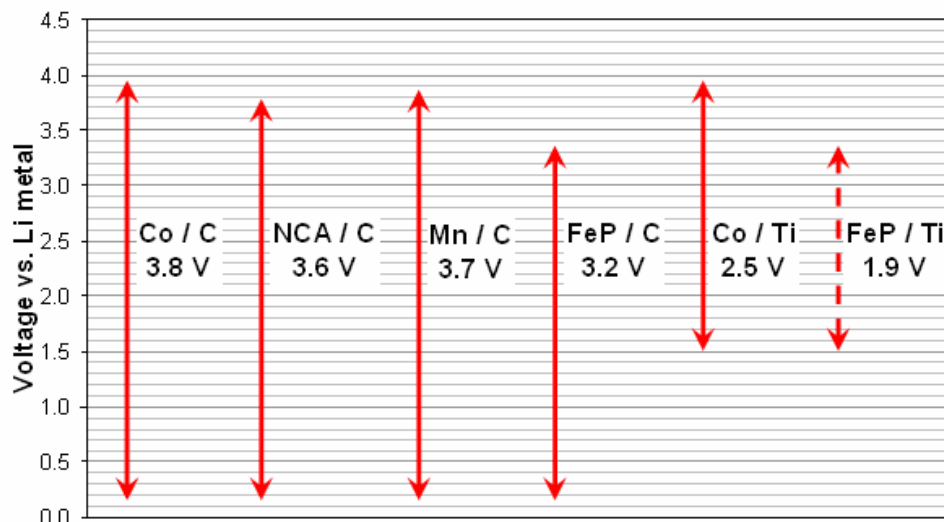
### 3.1 Struktura Li-ion baterií

Základní sestavu Li-ion baterií tvoří kladná elektroda a záporná elektroda, mezi nimiž je umístěn separátor.



Obr. 3.1 Princiální sestava Li-ion baterií [4]

Efekt nabíjení a vybití způsobuje pohyb iontů lithia mezi elektrodami odpovídající toku elektronů vnějšího obvodu. Záporná elektroda lithium-ion je téměř výhradně z grafitu. Jako kladná elektroda jsou používány různé typy sloučenin lithia. Materiálem použitým pro elektrody článku je dáno jmenovité napětí článku.



Voltage indicates approximate mid-point value.

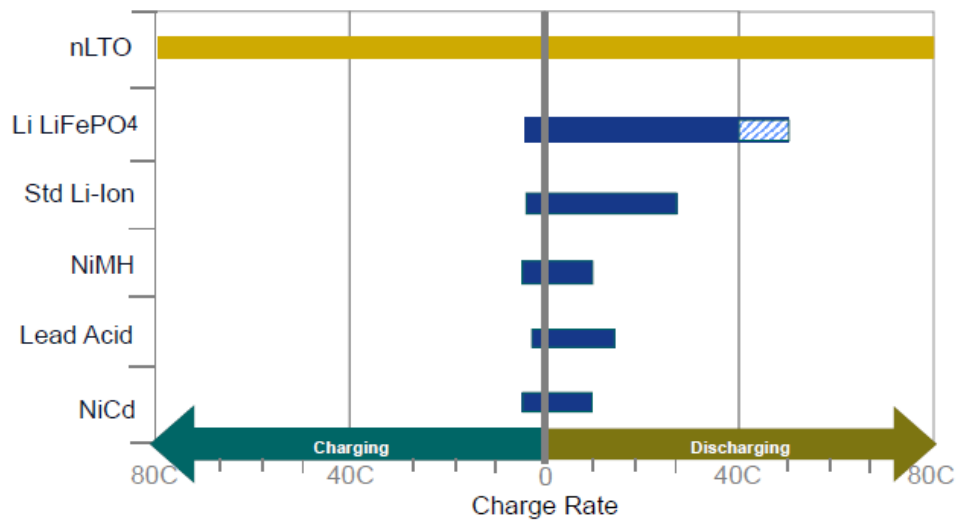
Co =  $\text{LiCoO}_2$ ; Mn =  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ; FeP =  $\text{LiFePO}_4$ ; C = Graphite; Ti = lithium titanate

Obr. 3.2 Napětí článků podle materiálu elektrod [5]

Volba materiálu kladné elektrody je také ovlivněna užitím baterie, např.  $\text{LiCoO}_2$  jsou využívány u notebooků a podobných přenosných zařízení.

V trakci se uplatňují především  $\text{LiFePO}_4$  a Lithium-Titan. Jak je z Obr. 3.2 patrné, je napětí titanových článků výrazně nižší než článku s grafitem, ale titanové články snášejí daleko větší nabíjecí a vybíjecí proudy.

### nLTO Charges 10x Faster Than Competing Technologies

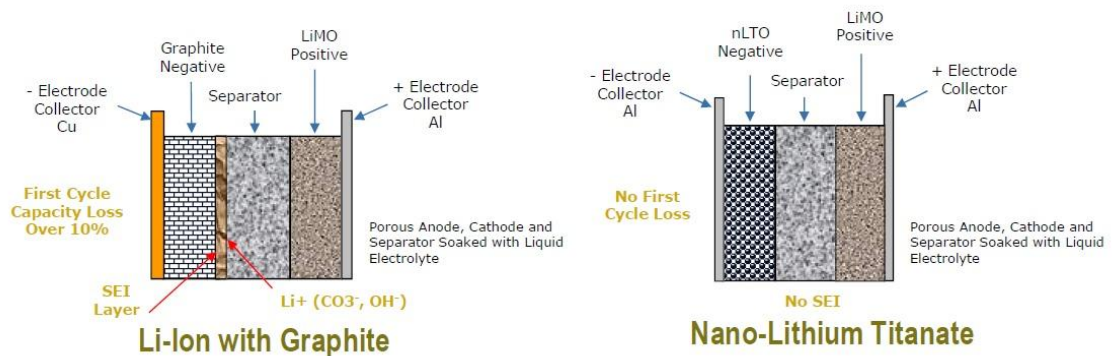


Obr. 3.3 Maximální nabíjecí a vybíjecí proudy různých typů baterií [6]

Obrázek ukazuje použitelné hodnoty proudů pro nabíjení a vybíjení různých typů baterií od NiCd po nLTO.

V článcích s grafitovou elektrodou je potřebná oddělovací vrstva mezi grafitem a separátorem. Tato vrstva má negativní vliv na maximální proudy článků.

### The Battery Difference: nLTO Has No Resistive SEI Layer



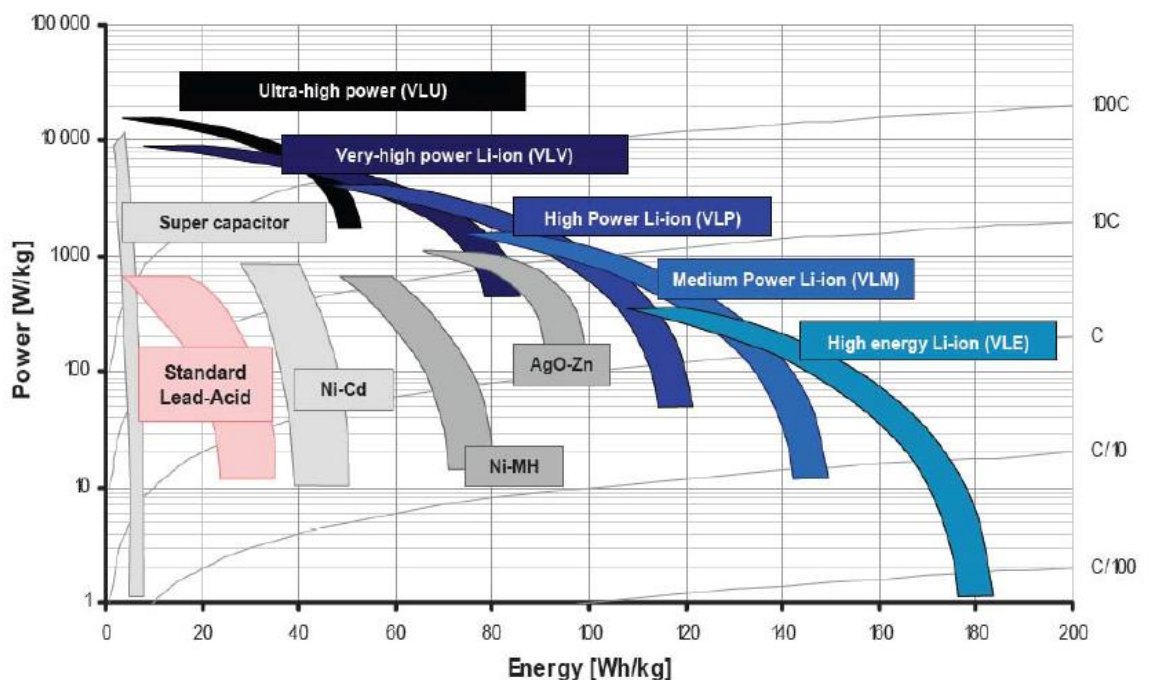
Obr. 3.4 Rozdíl struktury grafitové a titanové Li-ion baterie [6]



Elektrolytem v Li-ion článcích je normálně lithium-hexafluorfosfát ( $\text{LiPF}_6$ ). Jeho přesné složení závisí do jisté míry na materiálu elektrod. Na rozdíl od klasických olověných či NiCd baterií není elektrolyt v Li-ion článcích přítomen jako volná kapalina, je nasáklý v porézním materiálu článku.

### 3.2 Základní vlastnosti Li-ion baterií z hlediska jejich použití

Konstrukci článků lze získat články tzv. high power nebo high energy podle toho, je-li potřeba baterie o velkém výkonu nebo o velké energii.



Obr. 3.5 Měrný výkon a měrná energie Li-ion baterií různých provedení [4]

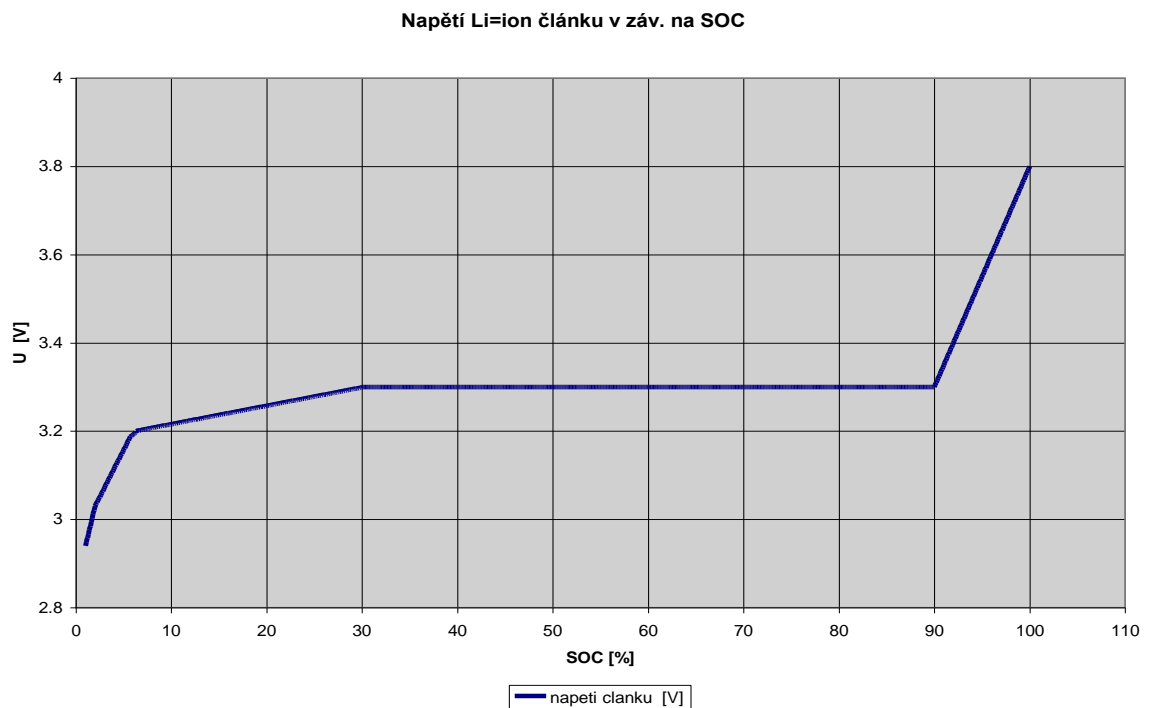
Parametry Li-ion baterií lze nalézt na webových stránkách firem Saft, Altairnano, GS YUASA a jiných.

Pro účely akumulace brzděné energie vozidel jsou vhodné typy  $\text{LiFePO}_4$  high energy.

Základními parametry Li-ion článků jsou napětí, kapacita, vybíjecí a nabíjecí proudy, pracovní teplota. V provozu je pak důležitou veličinou stav nabití – SOC = State of Charge.

### Napětí článku

Jmenovité napětí článku, jak již bylo uvedeno, závisí na chemickém složení jeho elektrod. Aktuální napětí článku závisí dále na stavu nabití článku (SOC – *Obr. 3.6*) a na teplotě článku.



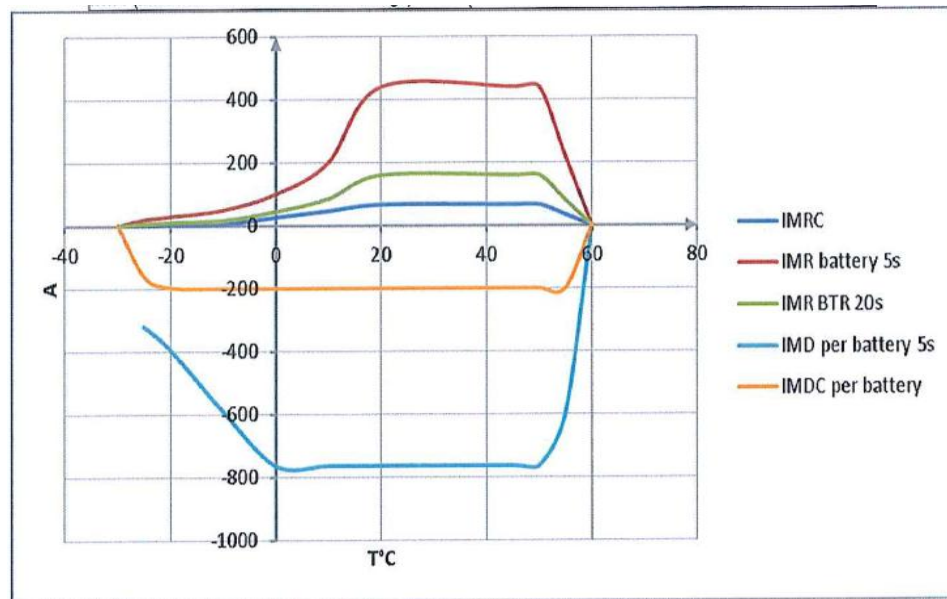
*Obr. 3.6* Závislost napětí článku na stavu jeho nabití

### Kapacita článku

Kapacita článku je dána jeho konstrukčním provedením. Kapacita článků pro trakční účely bývá desítky Ah/článek. Kapacita článku se zatěžováním a stářím klesá. Pokles kapacity článku na 80% jmenovité hodnoty se zpravidla považuje za konec životnosti článku.

### Proudová zatížitelnost

Vybíjecí a nabíjecí proudy výrazně závisí na teplotě článku a na délce trvání vybíjecího/nabíjecího proudu. Příklad je na *Obr. 3.7*.



Obr. 3.7 Závislost maximálního nabíjecího a vybíjecího proudu na teplotě [7]

IMRC = trvalý maximální nabíjecí proud

IMR = krátkodobý maximální nabíjecí proud (5s a 20s)

IMDC = trvalý maximální vybíjecí proud

IMD = krátkodobý maximální vybíjecí proud

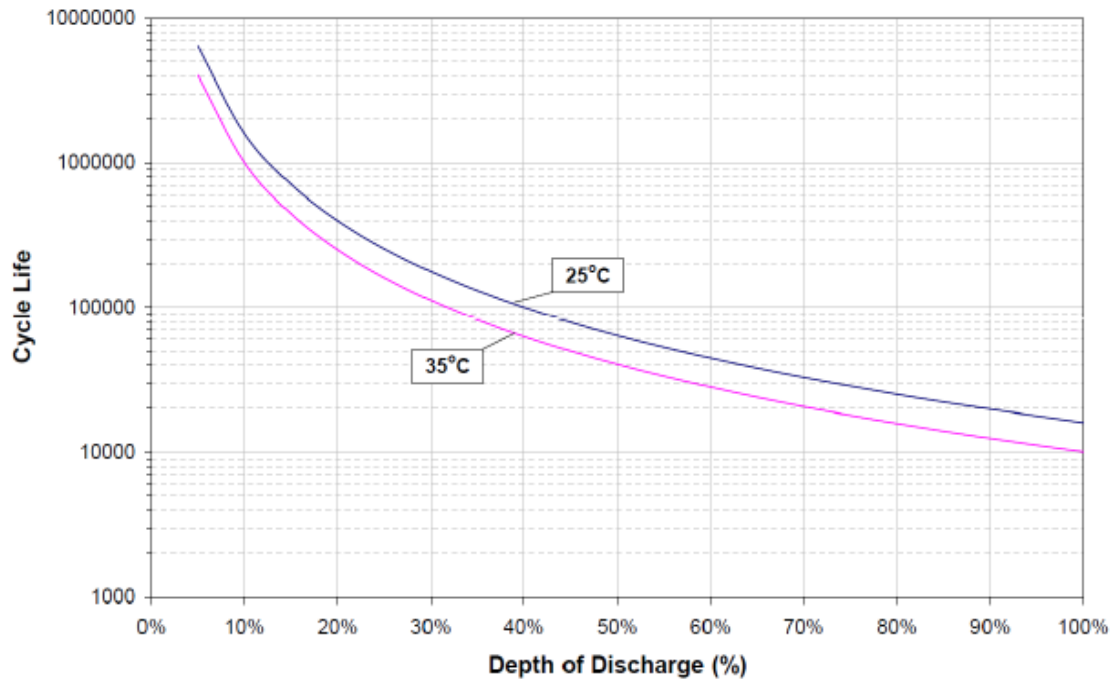
#### Stav nabití – SOC

Za optimální oblast využití článků je považována oblast od 40% do 80% SOC. Oblast 20% – 40% SOC je doporučována jako rezerva, vybíjení pod 20% se považuje již za nebezpečné pro články. V oblasti nad 80% pak dochází k omezení velikosti maximálního nabíjecího proudu, nad 90% k výraznému omezení nabíjecího proudu. Z hlediska rekuperace energie při brzdění je proto oblast nad 80% SOC nevhodná.

#### Životnost článků

Životnost článků/baterií závisí především na hloubce vybíjení (DOD = Depth of Discharge) a na provozní teplotě.

Příklad závislosti životnosti na DOD článků ALTAIRNANO je na následujícím grafu (Obr. 3.8).



Obr. 3.8 Závislost životnosti na DOD Li-ion článků [6]

Obdobné průběhy vykazují Li-ion články i jiných výrobců, které lze dohledat na webových stránkách.

Z grafů je patrné, že životnost baterií nezanedbatelně stoupá se snižováním DOD. Velikost baterie se proto volí s ohledem nejen na akumulovanou energii, ale i na požadovanou životnost baterie.

### 3.3 Pomocná zařízení Li-ion baterií

Bateriový systém sestává vedle vlastních Li-ion článků z dalších, pomocných zařízení nutných pro správnou funkci baterie.

Jsou to:

- řídicí a diagnostický systém baterie
- zařízení pro tepelnou stabilizaci článků baterie (udržuje teplotu článků mezi cca 20°C – 40°C)
- výkonové obvody – spínání baterie, jištění baterie, filtr baterie
- měniče nabíjení baterie a regulovaného odběru z baterie.

Pro zajištění správné funkce, spolupráce s pohonem a dalšími systémy vozidla, zajištění optimální životnosti a diagnostiky bateriového systému je tento systém vybaven Řídicím

systémem baterie – BMS (Battery Management System).

Baterie je tvořena sériovou, případně serio-paralelní kombinací Li-ion článků. Sériové řazení článků vyžaduje vyrovnávání napětí/nabití jednotlivých článků („balancing“). K tomu účelu je každý článek opatřen vyrovnávacím obvodem.

Stav nabití baterie (SOC) je průběžně měřen řídicím systémem baterie. Napěťová charakteristika Li-ion baterií v závislosti na SOC je velice plochá, pro průběžné určování SOC se nedá použít (viz *Obr. 3.6*) SOC se proto počítá z naměřeného proudu baterie. Výpočet není dlouhodobě absolutně přesný, proto systém měření SOC vyžaduje pravidelnou kalibraci. Ke kalibraci se využívá oblast nabití baterie na 90-100%, kde závislost napětí článku na SOC je výrazná.

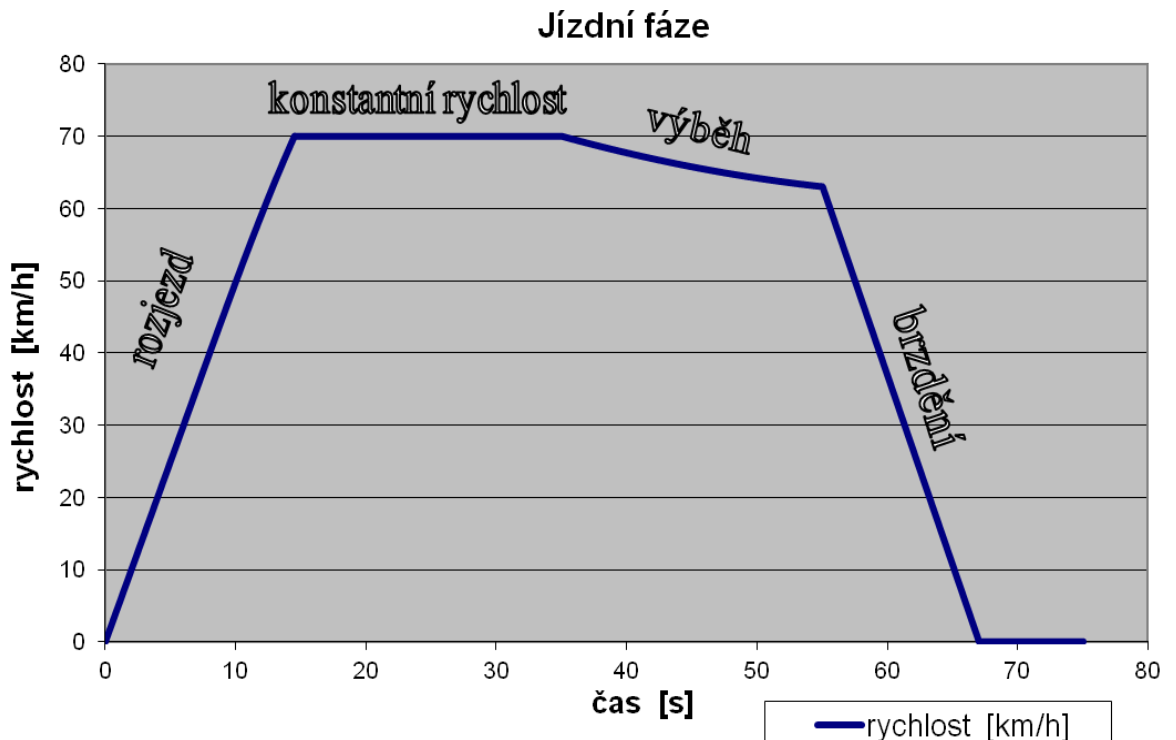
Za optimální oblast využití článků je považována oblast od 40% do 80% SOC. Oblast od 20% do 40% SOC je doporučována jako rezerva, vybití pod 20% se považuje již za nebezpečné pro články. V oblasti nad 80% pak dochází k omezení velikosti maximálního nabíjecího proudu, nad 90% k výraznému omezení nabíjecího proudu. Z hlediska rekuperace energie při brzdění je proto oblast nad 80% SOC nevhodná.

Efektivní funkce Li-ion baterií je jen v omezeném rozsahu provozních teplot – cca od +20°C do +50°C (*Obr. 3.7*). Baterie musí být proto vybavena systémem stabilizace teploty baterie (BTMS). Příklad závislosti maximální velikosti vybíjecího/nabíjecího proudu na teplotě je patrný z *Obr. 3.7* (Baterie SAFT z článků LiFePO<sub>4</sub>). BTMS při nízkých teplotách (pod cca +15°C) baterii ohřívá, při teplotách nad cca 40°C baterii chladí.

## 4 Energetické stavy vozidel

Jízdu vozidla lze rozložit na tři, případně čtyři, charakteristické fáze:

- rozjezd
- jízda konstantní rychlostí
- jízda výběhem (nemusí být vždy)
- brzdění



Obr. 4.1 Fáze jízdy vozidla

#### 4.1 Rozjezd

Při rozjezdu dochází ke zvyšování rychlosti vozidla.

Priváděná energie částečně kryje ztráty v pohonu (v měniči, trakčním motoru, převodech). Část energie je spotřebována na překonání jízdních odporů (odpor valení, odpor vzduchu, odpor svahu). Jízdní odpor lze obecně vyjádřit vztahem

$$Q = mp_o, \quad (4.1)$$

kde  $m$  se rovná hmotnosti vozidla,

$$p_o = K_1 + \frac{K_2}{m} + K_3v + K_4v^2, \quad (4.2)$$

kde  $K$  jsou konstanty závislé na vozidle a trati [8].

Obecně jízdní odpor závisí na hmotnosti vozidla, na rychlosti vozidla a druhé mocnině rychlosti vozidla.

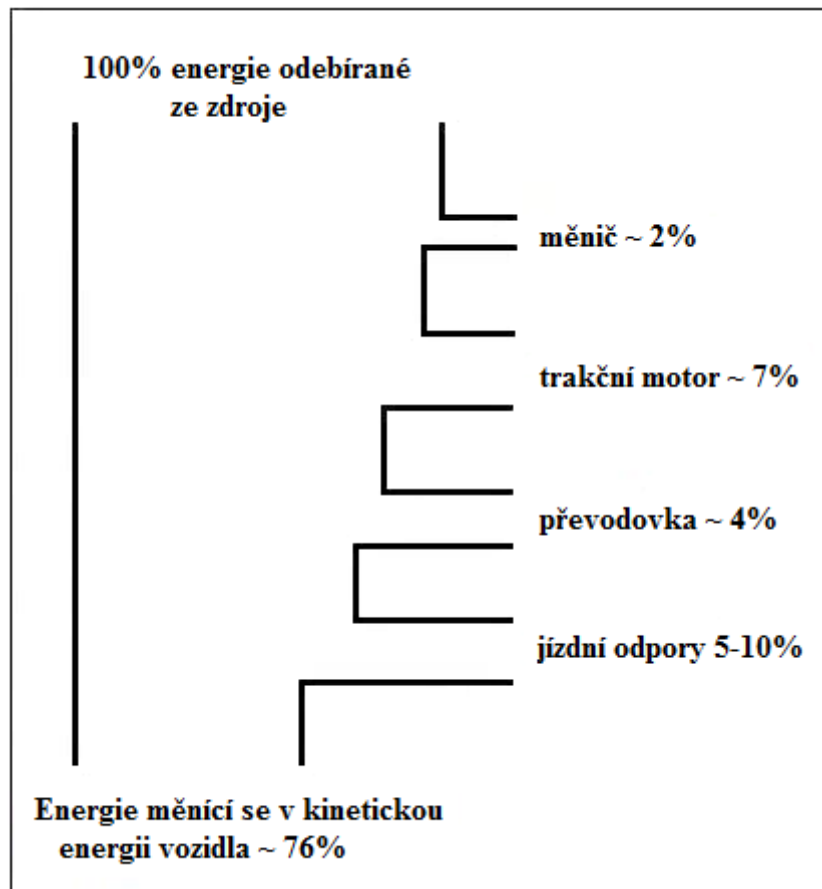
„Odpor svahu“ má vliv na okamžité parametry jízdy vozidla. Na uzavřené trati, kde koncový bod je roven výchozímu bodu, je konečná polohová energie vozidla nulová.

Pro relativně malé svahy je odpor svahu

$$Q = mg \frac{s}{100}, \quad (4.3)$$

kde  $m$  je hmotnost vozidla,  $g$  je gravitační zrychlení a  $s$  je svah v procentech [8].

Větší část energie přiváděné při rozjezdu se mění na kinetickou energii vozidla ( $E = 0,5mv^2$ ).



Obr. 4.2 Energetické poměry při rozjezdu

## 4.2 Jízda konstantní rychlostí

Kinetická energie vozidla se již nezvyšuje. Přiváděná energie kryje pouze překonání jízdních odporů a ztráty v pohonu. Ztráty v trakčním pohonu jsou menší než ve fázi rozjezdu, protože pohon dodává znatelně menší výkon.

## 4.3 Jízda výběhem

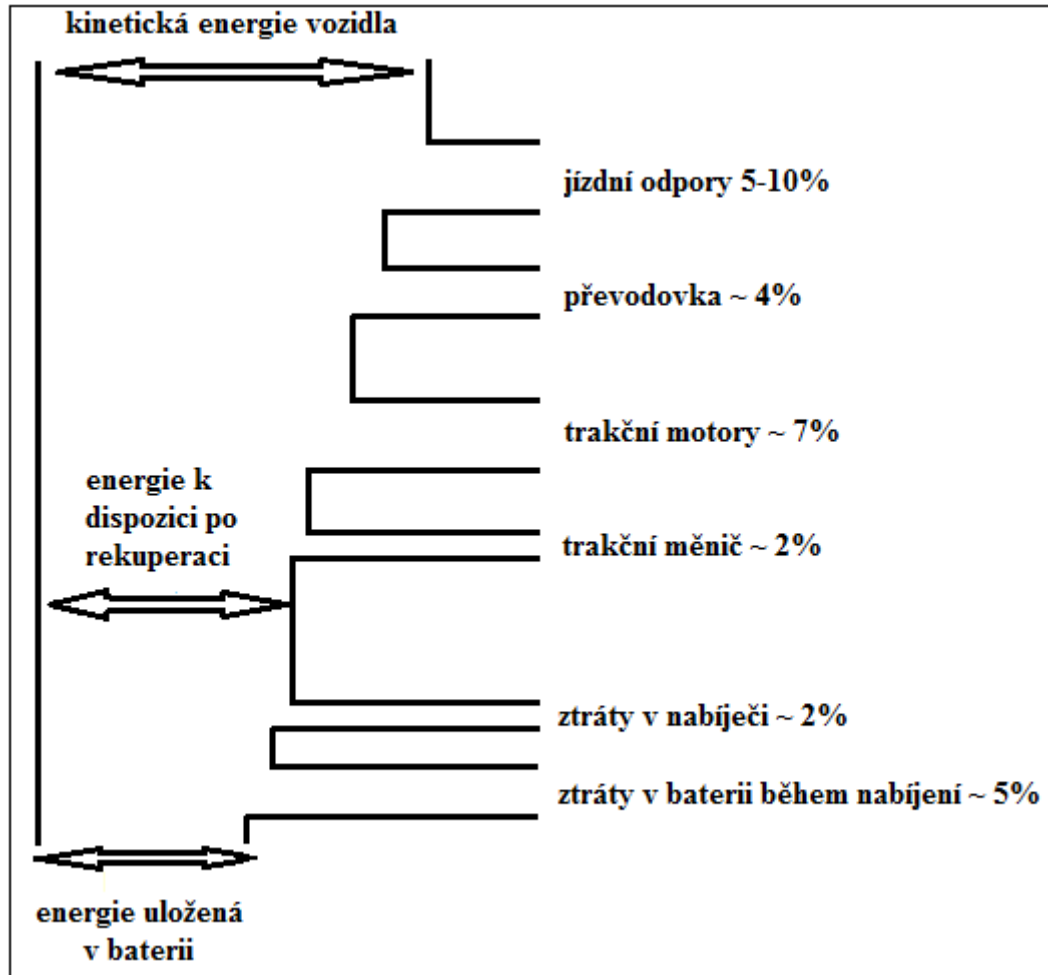
Při jízdě výběhem není přiváděna žádná energie, vozidlo jede setrvačností. Jízdní odpory způsobují pokles rychlosti vozidla a tím i pokles kinetické energie vozidla.

## 4.4 Brzdění

Při brzdění je třeba kinetickou energii vozidla odebrat. U většiny vozidel se zatím kinetická energie vozidel maří přeměnou na teplo a to buď v mechanických brzdách, nebo

v brzdových odpornících elektrodynamické brzdy. Zatím v omezené míře se využívá u vozidel závislé trakce rekuperace energie do napájecí sítě.

Kinetická energie vozidla je relativně značná – viz *Obr. 4.2*, proto je žádoucí ji akumulovat.



*Obr. 4.3 Energetické poměry při brzdění*

O energii rekuperovanou do baterie ( $E_r$ ) se pak při následném rozjezdu sníží energie odebíraná ze zdroje.



## 5 Návrh systému pro vozidlo lehké trakce s využitím Li-ion baterií

Vozidla lehké trakce se vyznačují především omezenými nápravovými tlaky. Vozidla lehké trakce mají obvykle dva nebo více podvozků, každý podvozek mívá dvě nápravy. Nápravové tlaky jsou zpravidla omezeny hodnotou 10 tun. Dalším význačným rysem vozidel lehké trakce je skutečnost, že jsou určena pro hromadnou dopravu osob v městské nebo příměstské dopravě, tedy s četným rozjížděním a zastávkami v relativně krátkých vzdálenostech (250 – 800 m). Právě velká četnost rozjezdů a brzdění má vliv na energetickou náročnost těchto vozidel.

Rychlost vozidel lehké trakce v městském provozu je obvykle omezena rychlostí 50km/hod. Tam, kde vozidla jezdí po separované trati, bývá využívána rychlost až 70km/hod., výjimečně až 80 km/hod.

### 5.1 Výkon pohonu a energie vozidla lehké trakce

Charakter provozu tramvají a LRV vyžaduje relativně velké zrychlení při rozjezdu a velké zpomalení při brzdění.

Tažná síla

$$F = mk_{rh}a, \quad (5.1)$$

kde  $m$  je hmotnost vozidla,  $k_{rh}$  je koeficient vlivu rotačních hmot (approx. 1,08),  $a$  je požadované zrychlení.

Pohon ovšem musí při rozjezdu vyvinout sílu větší, je třeba překonat i jízdní odpory.

Potřebná tažná síla

$$F' = F + Q, \quad (5.2)$$

kde  $Q$  reprezentuje jízdní odpory.

U vozidla hmotnosti 40 tun pro dosažení zrychlení  $1,2 \text{ m/s}^2$  je zapotřebí při rozjezdu tažná síla

$$F = 40 \cdot 1,08 \cdot 1,2 = 51,84 \text{ kN.}$$

Jízdní odpory tramvají a LRV se typ od typu dost liší. S použitím Davisova vzorce pro tramvaje bude pro vozidlo o váze 40 tun [8]

$$Q = 2,035 + 0,018v + 3,52 \cdot 10^{-4} v^2. \quad (5.3)$$

## Výkon

Požadované zrychlení – tím pádem požadovaná tažná síla – je zpravidla vyžadováno nejméně do poloviny maximální rychlosti vozidla. Pro vozidlo s  $v_{\max} = 70$  km/hod. je to do rychlosti cca 35 km/hod.

Požadovaný výkon pohonu pro zrychlení  $1,2$  m/s<sup>2</sup> při rychlosti 35 km/h pak vychází

$$F' = 51,84 + 3,095 = 54,94,$$

$$P = F' v \frac{1}{\eta} = 54,94 \cdot 9,72 \cdot \frac{1}{0,85} = 628 \text{ kW}.$$

Chceme-li, aby byl přínos zásobníku energie výrazný, měl by být schopen dodat alespoň polovinu uvedeného výkonu.

## Energie

Hlavním spotřebičem elektrické energie vozidel lehké trakce je hlavní pohon těchto vozidel. Jak již bylo zmíněno, četné rozjezdy vozidla mají výrazný vliv na jeho spotřebu. Dalším spotřebičem energie je topení, resp. klimatizace, jak kabiny řidiče, tak prostoru pro cestující. Nezanedbatelným spotřebičem energie jsou i pohony a řídicí obvody brzd.

Brzdy vozidel LRV jsou trojího typu:

- elektrodynamická – využívá zařízení hlavního pohonu, s možností rekuperace energie do trolejové sítě a do baterie, případně s mařením energie v brzdovém odporu
- mechanická – s čerpadlem hydrauliky a řídicími obvody, ventily apod.
- kolejnicová – silný elektromagnet, který přilne ke kolejnici a brzdí třením tohoto magnetu o kolejnici.

Dalšími spotřebiči vedle ovládacích a řídicích obvodů vozidla jsou zařízení sloužící cestujícím, jako ovládání dveří, ventilace, informační systémy, signální a výstražná zařízení apod.

Spotřeba těchto vedlejších spotřebičů zvyšuje celkovou energetickou náročnost vozidla.

Energie vozidla o hmotnosti 40 tun jedoucího rychlostí 70 km/hod. je

$$E = \frac{1}{2} m v^2, \quad (5.4)$$

$$E = 0,5 \cdot 4 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{70}{3,6}\right)^2 = 2100 \text{ Wh}.$$

Jak již bylo uvedeno výše, část této energie se ztratí v překonání jízdních odporů, ve ztrátách pohonu, ve ztrátách nabíjeného zásobníku energie. Část energie je použita k napájení vedlejších spotřebičů. Nicméně, zásobník energie by měl být schopen akumulovat podstatnou

část kinetické energie vozidla.

Fáze brzdění může být relativně krátká, z rychlosti 70 km/hod. do zastavení cca 15 sekund. Zásobník energie musí být schopen akumulovat energii vozidla za tuto dobu, musí být tedy možnost nabíjet jej výkonem

$$2100 \text{ Wh} / 15 \text{ sek} \approx 500 \text{ kW}.$$

Pro vozidlo o hmotnosti maximálně 40 tun, s maximální rychlostí 70 km/hod., by byl vhodný zásobník energie o kapacitě cca 2000 Wh s výstupním výkonem nejméně 350 kW, s krátkodobým přetížením při nabíjení až 500 kW.

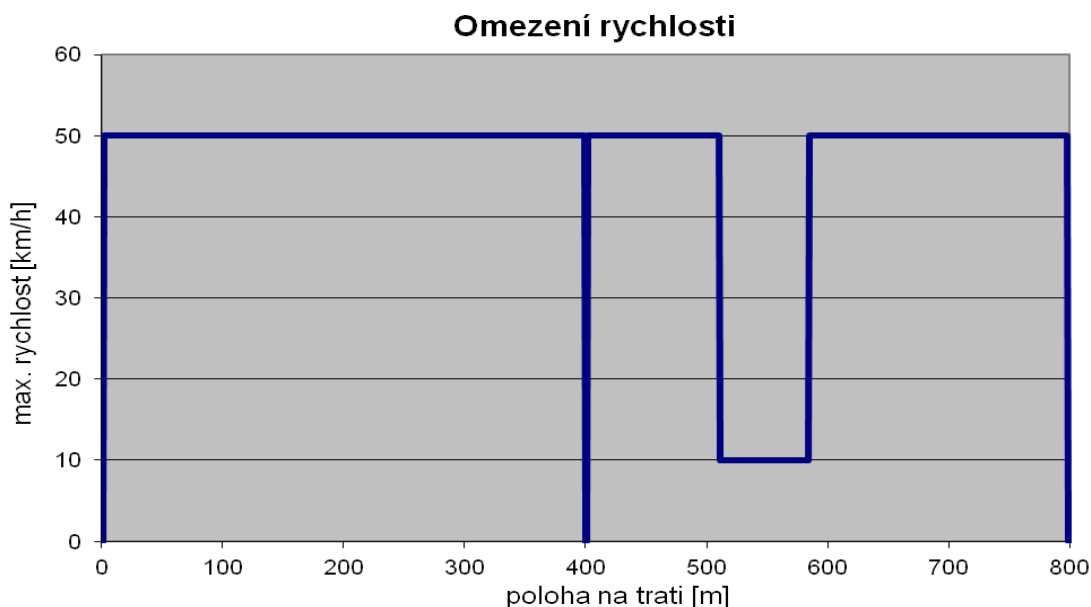
Při návrhu baterie tak, aby DOD bylo maximálně 20%, lze dosáhnout životnosti v trvání několika let. Na druhou stranu to ale znamená, že kapacita baterie je předimenzována, je výrazně větší, než kapacita nezbytná k akumulaci energie vozidla.

## 5.2 Rozbor jízdy a energetických stavů vozidla

Vliv použití zásobníku energie na vozidle lehké trakce vyšetřeme na příkladu jízdy na definovaném úseku tratě.

Uvažovaná trať (*Obr. 5.1*):

• část tratě o 2 úsecích, celkem	800 m
• délka úseku mezi zastávkami	400 m
• 1. úsek přímý, bez zvláštních omezení	
maximální rychlost	50 km/h
• doba stání na zastávce	15 s
• 2. úsek s omezením rychlosti v zatáčce	
maximální rychlost	50 km/h
max. rychlost v části 510-585 m	10 km/h (zatáčka o poloměru 20m)
Hmotnost vozidla	40 t
Maximální zrychlení/zpomalení	1,2 m/s <sup>2</sup>



Obr. 5.1 Omezení rychlosti trati

Byly vypočteny průběhy rychlosti ( $v$ ), ujeté dráhy ( $s$ ), příkonu pohonu ( $P_1$ ) a výkonu schopného rekuperace ( $P_{rek}$ ). Tyto průběhy jsou na Obr. 5.2.

Integrací průběhů výkonu v čase byly vypočteny energie - jak energie spotřebovaná pohonem, tak i teoretické množství energie, kterou by bylo možné uložit do baterie (při uvažování účinnosti přeměny energie cca 0,85). Výsledky jsou v následující tabulce.

	Celkový příkon [kWs]	Rekuperovatelná energie [kWs]
1. úsek	6300	3300
2. úsek	9295	5412
Celkem	15595	8712

Tab. 5.1 Celková spotřeba a rekuperovatelná energie

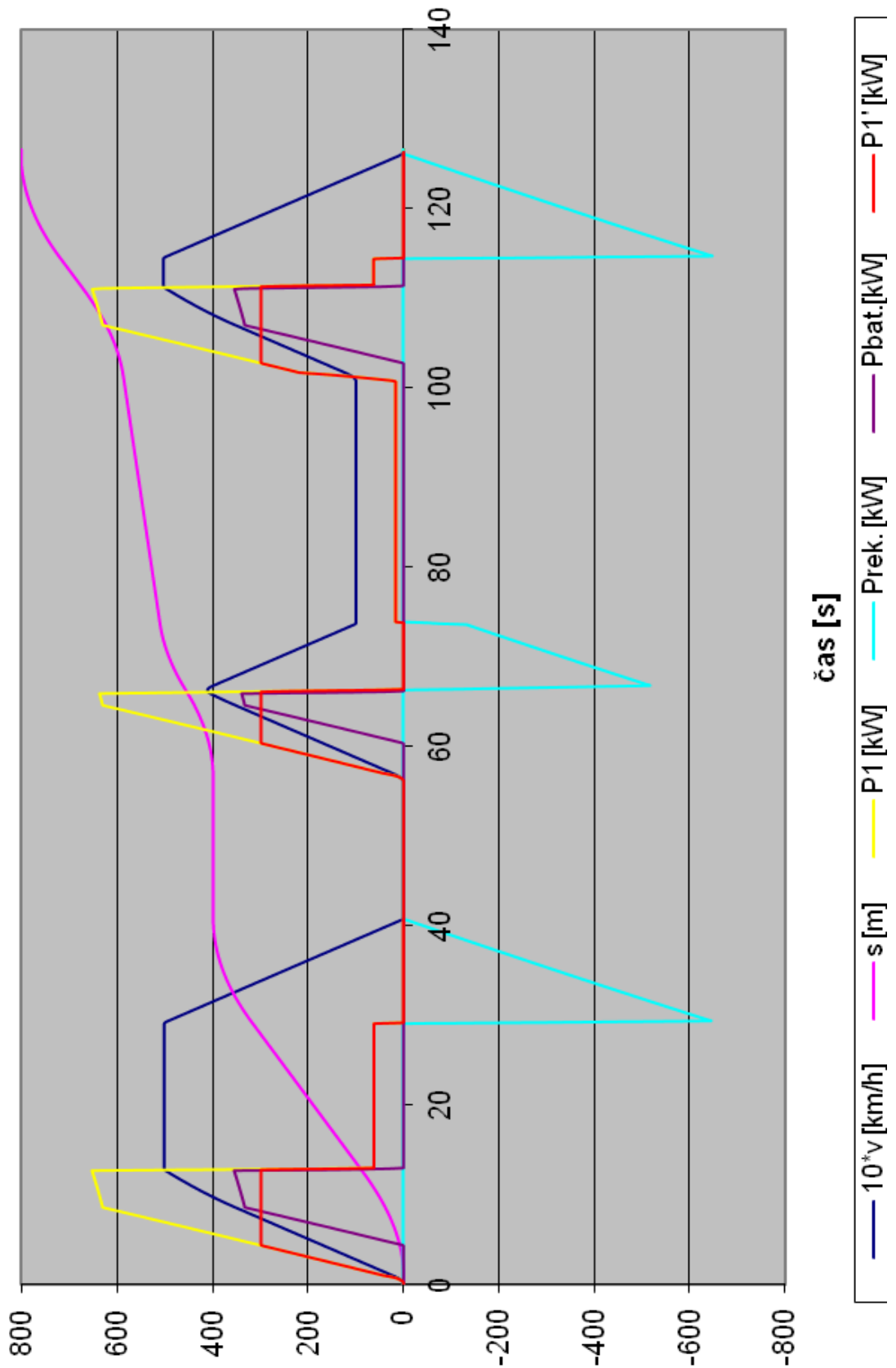
Průměrná rychlost vozidla včetně 15 s stání v jedné stanici je 22,85 km/h.

Doba rozjezdu z 0 na 50 km/h je 12,9 s, přičemž vozidlo ujede dráhu 91 m.

Doba brzdění z 50 km/h je 11,8 s, přičemž vozidlo ujede dráhu 82 m.

Z toho minimální délka trati, na niž vozidlo dosáhne rychlosti 50 km/h a z této rychlosti zabrzdí je 173 m.

I když budeme uvažovat reálné využití jen 50 - 60% z teoreticky rekuperovatelné energie, lze využitím této energie výrazně snížit špičkový výkon odebíraný z troleje. Viz křivky  $P_{Bat.}$  = výkon dodávaný při rozjezdu baterií a  $P_1'$  = výkon odebíraný z troleje na Obr. 5.2. Snížení špičkové hodnoty odběru z troleje může mít větší přínos, než pouhá úspora energie.



Obr. 5.2 Základní parametry vozidla při jízdě 2x400 m

### 5.3 Návrh funkčního uspořádání

Principiální návrh zapojení pohonu vozidla s baterií jako akumulátorem energie je na Obr. 5.3 „Hlavní obvody“. Zapojení vychází ze standardního zapojení pohonu tramvají a LRV, doplněno je baterií a měničem nabíjení/řízeného vybíjení baterie.

Proud z trolejového vedení je snímán pantografem. Bezprostředně k pantografu je připojena bleskojistka pro ochranu obvodů vozidla proti atmosférickému přepětí. Za pantografem následuje RFI filtr, tlumící průchod elektromagnetického rušení generovaného obvodu vozidla do trolejové sítě. Za filtrem následuje čidlo proudu pro měření proudu odebíraného vozidlem z troleje, případně proudu rekuperovaného vozidlem zpět do troleje. Přes hlavní jistič – rychlo vypínač je pak napětí připojeno na vstup „+“ bloku měničů. Svorka „-“ bloku měničů je připojena na nápravové sběrače vozidla.

Na vstupu bloku měničů je dioda V1 bránící vybíjení baterie do troleje. Tlumivka T1s kondenzátorem C tvoří filtr stejnosměrného meziobvodu měničů. Ze stejnosměrného meziobvodu jsou napájeny trakční měniče – invertory trakčních motorů. Jako trakční motory jsou v současné době užívány převážně motory asynchronní. Odpor připojený ke kondenzátoru C je pro bezpečné vybití kondenzátoru při vypnutí vozidla.

Antiparalelně k diodě V1 a tlumivce T11 může být připojen spínač V2 umožňující rekuperaci energie brzdícího vozidla do troleje v případě, že baterie by nebyla schopna pojmout veškerou energii a trolejová síť by byla schopna energii odebrat. Takový případ by mohl např. nastat při brzdění z dlouhého svahu.

Pro zajištění funkce elektrodynamické brzdy za všech okolností je ve stejnosměrném meziobvodu zapojen brzdový měnič (pulzní měnič) V5, V6 a brzdový odporník  $R_b$ . V tomto odporníku je při brzdění mařena energie vozidla v případě, že ji není možno rekuperovat ani do baterie ani do troleje. Brzdový měnič s brzdovým odporníkem fungují i jako ochrana proti přepětí ve stejnosměrném meziobvodu.

Baterie je tvořena sériovou, případně serio-paralelní kombinací Li-ion článků. Jmenovité napětí baterie je voleno těsně pod hranicí minimálního napětí troleje (cca 500V). Toto napětí příznivě ovlivňuje celkovou konfiguraci a účinnost systému.

Blok baterie obsahuje vedle vlastní baterie její jištění – pojistky F1, F2, stykače K01, K02, filtr  $C_{bat} + T_{1bat}$  a předbíjecí obvod K03 +  $R_p$  pro nabití kondenzátoru  $C_{bat}$  před

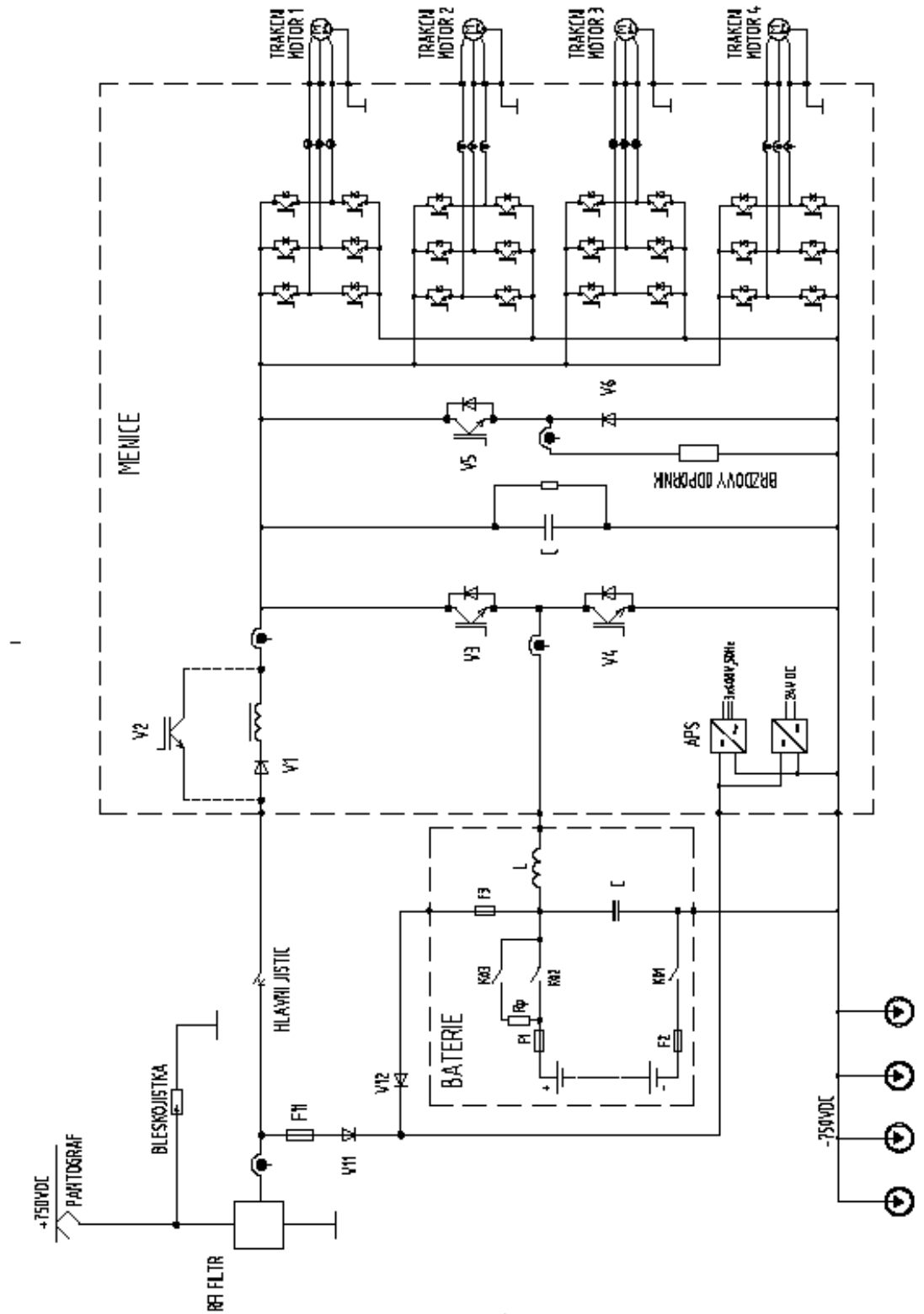
sepnutím stykače K02.

Baterie se nabíjí při brzdění vozidla ze stejnosměrného meziobvodu nabíječem jehož hlavními částmi jsou IGBT V3, dioda ve V4 a tlumivka Tlbat. Funkčně jde o snižující pulzní měnič [9,10].

Při rozjezdu je část energie pro rozjezd odebírána z troleje, část z baterie. Proud z baterie do stejnosměrného meziobvodu je regulován měničem sestávajícím z tlumivky Tlbat, IGBT V4 a diody ve V3. Funkčně jde o zvyšující pulzní měnič.

Filtr Cbat + Tlbat zmenšuje zvlnění proudu baterie. Zvlnění proudu baterií způsobuje v baterii přídavné ztráty. Redukce zvlnění proudu zlepšuje celkovou účinnost systému.

Blok měničů obsahuje i pomocné měniče. Je to jednak měnič DC/AC s třífázovým výstupním napětím pro napájení pomocných pohonů, chlazení měničů, tepelnou stabilizaci baterie apod. Měnič DC/DC s výstupním napětím 24V napájí řídicí obvody a nabíjí palubní baterii. Pomocné měniče jsou napájeny buď napětím z troleje (přes pojistku  $F_{po}$  a diodu V11) nebo z baterie (přes pojistku F3 a diodu V12). Toto napájení zajišťuje nepřerušovanou funkci pomocných měničů i při případných přerušeních napájení z troleje.



Obr. 5.3 Návrh principiálního zapojení tramvaje s bateriovým akumulátorem energie



## 6 Zhodnocení přínosů akumulace energie

Údaje o spotřebě tramvají se pohybují v širokém rozsahu. Záleží na provozních podmínkách, na způsobu jízdy řidiče a v neposlední řadě na způsobu měření.

Výrobci tramvají se zaměřují na měření spotřeby vlastního vozidla, zatímco dopravní podniky posuzují spotřebu včetně ztrát na měnících a v troleji. Výsledky se pak nezanedbatelně liší. Z hlediska provozovatele (dopravního podniku) je podstatné jaká spotřeba se naměří na vstupu měnírny, neboť tu provozovatel platí.

Plzeňský městský dopravní podnik vykazuje průměrnou spotřebu měřenou na měnících a přepočtenou na „solo“ tramvaj 2,43 kWh/km. Při průměrné hmotnosti zatížení tramvaje cca 25 t to je 97,2 Wh/t\*km, což koresponduje s průměrnou spotřebou tramvají udávanou i v jiných pramenech a s výsledky měření spotřeby kloubových tramvají provedených firmou Škoda na tratích PMDP a spotřeby kloubových tramvají v DP Ostrava.

Současné tramvaje jsou dnes již standardně vybaveny rekuperací do sítě. Účinnost této rekuperace však mj. závisí na schopnosti sítě rekuperovanou energii odebrat. Jak ukázala měření firmy Škoda na tratích PMDP [11], navzdory schopnosti vozidla rekuperovat energii do sítě, část energie o velikosti v průměru cca 10% byla mařena v brzdových odpornících. Podíl rekuperované energie se pohyboval od 17% do 32%.

Uvedených 10% energie, mařených v brzdových odpornících, by bylo možno uspořit její akumulací do zásobníku energie (baterie) umístěného na vozidle.

Přínosy akumulace energie na vozidle

Přímé:

- možnost úspor dalších cca 10% energie mařené dosud v brzdových odpornících
- snížení špičkového odběru proudu z troleje (viz Obr. 5.2), a tím snížení ztrát v napájecím systému
- rovnoměrnější odběr elektrické energie s menšími špičkovými odběry z primární (elektroenergetické) sítě a tím vytvoření předpokladu pro příznivější nákupní cenu elektrické energie.

Nepřímé:

- snížením špičkového odběru proudu z troleje menší nároky na dimenzování napájecího systému (měnících a troleje)
- možnost nasazení většího počtu vozidel na stávající tratě bez nutnosti posilování (rekonstrukce) napájecího systému.

## Velikost baterie

Určeme velikost baterie pro tramvaj uvažovanou v kapitole 5.2, tj. tramvaj o hmotnosti 40 t, s maximální provozní rychlostí 50 km/h.

Pro stanovení velikosti baterie je vedle velikosti akumulované energie a hloubce vybíjení další klíčovou otázkou počet vybíjecích a nabíjecích cyklů za rok.

Počet cyklů za rok.

Na příkladu tramvajového provozu v Dopravním podniku města Plzně odhadneme předpokládaný počet cyklů za rok:

Z jízdnicích řádů linek 1,2 a 4, z počtu zastávek a délky tratí vychází průměrná vzdálenost zastávek 450 m [12].

Minimální délka úseku trati pro cyklus s rychlostí 50 km/h je 173 m (viz kapitola 5.2).

Při započtení světelných křižovatek (s výjimkou těch, které jsou v těsné blízkosti zastávek) a zatáček s výrazně omezenou rychlostí vychází v průměru jedno brzdění z rychlosti až 50 km/h na cca 250 m, tj. 4 brzdění na kilometr.

Průměrný roční proběh tramvají je 60 000 km/rok. Z toho předpokládaný průměrný počet cyklů rozjezd/brzdění vychází

$$4 \text{ cykly / km} \cdot 60000 \text{ km / rok} = 240000 \text{ cyklů / rok}.$$

## Kapacita baterie

Minimální kapacita baterie pro akumulaci energie 1 cyklu je  $3300 \text{ kWs} = 0,917 \text{ kWh}$ , tj. cca 1 kWh (viz kapitola 5.2). Jak bylo uvedeno v popisu vlastností Li-ion baterie v kapitole 3.2, je za optimální oblast využití baterií považována oblast od 40% do 80% SOC, tedy oblast využívající 40% jmenovité kapacity baterie. Pak potřebná jmenovitá kapacita baterie je nejméně 2,5 kWh.

Použijeme-li bateriový systém o jmenovité kapacitě 2,5 kWh, hloubku vybíjení DOD=40%, pak životnost baterie při 25°C bude 100 000 cyklů (viz Obr. 3.8). Při předpokládaném počtu cyklů 240 000 cyklů/rok je životnost 100 000 cyklů neúnosně malá.

Cestou pro prodloužení životnosti baterie je použití baterie s větší jmenovitou kapacitou a tím snížení hloubky vybíjení baterie.

Použijeme-li baterii o jmenovité hodnotě 10 kWh, pak DOD bude pouze 10% a životnost baterie bude (viz Obr. 3.8) cca 1 300 000 cyklů. Při 240 000 cyklech za rok to

znamená životnost baterie  $\frac{1300000}{240000} = 5,4 \text{ roku}$ .

## Kapacita baterie při uvažování částečné rekuperace do sítě

Převážná část tramvají v provozu a všechny moderní tramvaje jsou vybaveny pohony umožňující rekuperaci energie do trolejové sítě. Podmínkou této rekuperace je schopnost trolejové sítě rekuperovanou energii vstřebat. Jak ukázala již zmíněná měření tramvají na linkách PMDP, podíl rekuperované energie se pohyboval od 17% do 32%. Přesto stále ještě cca 10% energie se mařilo v brzdových odporcích. Tuto, zatím ztracenou energii může ušetřit použití bateriového systému. Systém však není nutno dimenzovat na plný počet cyklů (240 000 za rok) o energii odpovídající zabrzdění vozidla z rychlosti 50 km/h (cca 1 kWh), ale na celkovou energii menší.

Úspora pouze 10% z celkové spotřeby energie sice znamená menší úspory v nákladech na energii, na druhou stranu ale bateriový systém navržený pro akumulaci menší energie bude levnější.

## Ceny

Ceny baterií pro trakční vozidla nejsou běžně dostupné. Údaje o cenách jsou důvěrného charakteru, dostupné pouze prodejci a odběrateli. Získat lze jen orientační poměrné ceny bateriových systémů v Kč/kWh. V této práci vycházím jednak z orientačních poměrných cen od firmy SAFT, fg FORTE, Altairmano aj., jednak z rozdílu ceny klasického trolejbusu ŠKODA a trolejbusu obdobného typu vybaveného bateriovým systémem.

Ceny Li-ion baterií pro trakční účely se pohybují v širokém rozsahu podle výrobců. Poměrné ceny systémů o kapacitě několika desítek kWh jsou v rozmezí od 15 000 Kč/kWh do 60 000 Kč/kWh. Cena baterie bude mít jednak složku konstantní, nezávislou na kapacitě baterie, jednak složku úměrnou kapacitě baterie. Do konstantní složky se promítnou především náklady na řídicí a diagnostický systém baterie. Cena ostatních částí systému závisí na kapacitě a výkonných parametrech baterie.

Pro podmínky PMDP, kde při brzdění část energie je rekuperována do trolejové sítě, uvažujme bateriový systém o kapacitě 5 kWh. Při poměrné ceně 40 000 Kč/kWh bude část ceny závislá na kapacitě

$$5 \cdot 40000 = 200000 \text{ Kč}.$$

Konstatní složku ceny odhadněme na cca 10% této částky, pak celková cena bateriového systému bude 220 000 Kč.

Nákupní cena elektrické energie (PMDP) je 2,83 Kč/kWh bez DPH. Roční náklady na elektrickou energii vozidla o hmotnosti 40 t při průběhu 60 000 km/rok je

$$97,2 \cdot 40 \cdot 60000 \cdot \left( \frac{2,83}{1000} \right) = 660180 \text{ Kč [Wh/t} \cdot \text{km, t, km, Kčč/kWh]}.$$

Z toho 10% energie mařené dosud v odporńicích lze při  $\eta \approx 93\%$  (viz *Obr. 4.3*) ukládání energie do baterie ušetřit  $10\% \cdot 0,93 = 9,3\%$  energie, což znamená finanční úsporu  $660180 \text{ Kč} \cdot 0,093 \approx 61397 \text{ Kč}$ .

Při ceně bateriového systému 220 000 Kč pak návratnost nákladů na bateriový systém bude

$$\left( \frac{220000}{61397} \right) = 3,6 \text{ roku.}$$

Investice do bateriového systému bude rentabilní, pokud životnost baterie bude větší než 3,6 roku.

Uvedený výpočet rentability investice vychází z podmínek Plzeňských městských dopravních podniků. Pro jiné provozní podmínky v jiných dopravních podnicích bude efektivnost investice odlišná. Odlišný může být jízdní diagram, odlišné mohou být i náklady na energii. Například při výrazně nižší ceně elektrické energie (např. cena pro DP Košice je pouze 49,65 EUR/MWh [13]) může se návratnost investice přiblížit životnosti baterie.

Vhodnost použití baterií pro akumulaci kinetické energie vozidla při brzdění je třeba posuzovat případ od případu. Obecně lze konstatovat, že použití baterie dává předpoklady ke snížení provozních nákladů tramvají.

## Závěr

V práci jsou rozebrány systémy pro ukládání energie se zaměřením na ukládání energie při brzdění lehkého kolejového vozidla (LRV) a zpětné využití uložené energie při rozjezdu vozidla. Pro ukládání energie na trakčních vozidlech jsou vhodné baterie typu LiFePO<sub>4</sub> a Lithium-Titanové. Baterie musí být vybaveny příslušenstvím zajišťujícím správné provozní podmínky – systémem udržujícím správnou teplotu baterie, řídicím a diagnostickým systémem sledujícím stav nabití (SOC), omezujícím nadměrné vybití/nabíjení baterie, diagnostikujícím případnou poruchu.

Požadavky na kapacitu baterie a její zatížitelnost vyplývají z energetických stavů vozidla a četností pracovních cyklů baterie. Vhodným návrhem baterie lze dosáhnout životnosti baterie v provozu více než 5 let.

Pro použití k ukládání a vybírání energie z baterie je systém vozidla doplněn nabíječem baterie (snižující pulzní měnič) a měničem řízení odběru energie z baterie (zvyšující pulzní měnič).

Rozbor ekonomických aspektů provedených v kapitole 6 pro podmínky plzeňských městských dopravních podniků ukazuje, že v některých konkrétních případech může být ekonomická návratnost investice – tedy zakoupení dražších vozidel vybavených bateriovým systémem pro akumulaci energie – pro dopravní podnik zajímavá. Konkrétně pro PMDP vychází návratnost investice zhruba ve 2/3 životnosti baterie.

Skutečností je, že v jiných konkrétních podmínkách může být návratnost investice méně příznivá, ale může být i příznivější. Nezanedbatelnými jsou nepřímé přínosy, např. úspory investic do trolejového systému v důsledku menšího špičkového zatěžování troleje.

Řešení na úrovni současného stavu techniky se jeví jako ekonomicky výhodné.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] American Public Transportation Association, *Streetcar Propulsion Power: Alternatives and considerations*, USA, 2010.
- [2] Prepared by GS Yuasa International Ltd., *GS Yuasa Lithium Ion Technology Introduction*, USA, 2010.
- [3] ŠAŠEK, Jiří, *Akumulace brzděné energie v magnetickém poli supravodivé cívky*, disertační práce, ČR, 2003.
- [4] POIRIER, F., D'USSEL, L., COADOU, A., BYNUM, A., *Advanced Li-ion Battery Technologies*, firemní literatura firmy Saft, Francie, USA, 2008.
- [5] MCDOWALL, Jim, *Understanding Lithium-Ion Technology*, firemní literatura firmy Saft, USA, 2009.
- [6] KOLB, Cynthia, *Introduction to Altairnano Battery Technology*, propagační literatura firmy Altairnano, USA, 2012.
- [7] BENAIR, Emilie, firemní literatura firmy Saft, Francie, 2014.
- [8] JANSÁ, František, *Elektrická trakcia I.*, ČSR, 1976.
- [9] KŮS, Václav, *Elektrické pohony a výkonová elektronika*, ČR, 2005.
- [10] VONDRÁŠEK, František, *Výkonová elektronika, část 1 pulzní měniče*, ČR, 2012.
- [11] PROTOKOL Měření spotřeby elektrické energie tramvaje LTM 10.08, ŠKODA Dopravní technika, Plzeň, 1998.
- [12] Jízdní řády PMDP, dostupné z: <http://jizdnirady.pmdp.cz/LinesList.aspx>, datum navštívení 26.5.2014.
- [13] Smlouva o dodávkách elektrické energie pro dopravní podnik Košice, dostupné z: <http://www.dpb.sk/o-podniku/verejne-informacie/povinne-zverejnovanie/?inst=3946>, datum navštívení 27.5.2014.
- [14] Obrázek setrvačnicku vinutého z kevlarových vláken, dostupné z: <http://www.ctgltd.com/product/flywheels>, datum navštívení 30.5.2014.

## Přílohy

Příloha č. 1 – Setrvačnick vinutý z kevlarových vláken [14]



Příloha č. 2 – Příklad supravodivého zásobníku energie (Japonský SMES)

