



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

**Alternatívne možnosti napájania mestských koľajových vozidiel
(MKV) v Prahe a hodnotenie ekonomickej efektivity**

**Alternative possibilities of city rail vehicles (CRV) supplying in
Prague and valuation of economic effectivity**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Ekonomika a řízení energetiky

Vedoucí práce: doc.Ing.Jaromír Vastl, CSc.

Bc.Daniel Sihlovec

Praha, jún 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sihlovec** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **393466**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Ekonomika a řízení energetiky**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Alternatívne možnosti napájania mestských koľajových vozidiel (MKV) v Prahe a hodnotenie ekonomickej efektivity

Název diplomové práce anglicky:

Alternative possibilities of city rail vehicles (CRV) supplying in Prague and valuation of economic effectivity

Pokyny pro vypracování:

- možnosti zapojenia a využitia konkrétnych variant alternatívneho napájania
- case-study na využitie konkrétnej metódy alternatívneho napájania MKV v Prahe na konkrétnom vozidle
- prepočet výstupných hodnôt energií v rámci využitia systému na konkrétne zvolenej trati v rámci Prahy
- investiční a prevádzkové náklady na vybraný typ alternatívneho zdroja

Seznam doporučené literatury:

Fojtik, P. Linert, S. Prosek, Fr.: Historie mestske hromadne dopravy v Praze, 3.vydani, Dopravni podnik hl. M. Prahy, 2005 ISBN 80-239-5013-4
Panteleev, V.I. Prof. Sizyanova, E.Yu. Prof. Osnovy elektricheskogo transporta. Teaching material for students of programme Electroenergetics and Electrical engineering, Krasnoyarsk, 2008

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jaromír Vastl CSc., katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **25.05.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prehlásenie

Prohlašuji, že jsem diplomovou prací s názvem: **Alternatívne možnosti napájania mestských koľajových vozidiel (MKV) v Prahe a hodnotenie ekonomickej efektivity**

Vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Podpis

Pod'akovanie

Táto práca by nemohla vzniknúť bez cenných rád pri tvorbe technického modelu od Doc. Igora Alexandroviča Plotnikova, KTN z Tomskej polytechnickej univerzity a pána Doc. Ing. Jaromíra Vastla, CSc. z Českého vysokého učení technického pri zostavení ekonomického modelu a usmernení myšlienok do správnej roviny. Rovnako ďakujem ostatným zamestnancom katedry ekonomiky, manažerství a humanitných vied, FEL ČVUT za praktické poznatky vo výuke, ktoré som mohol využiť pri tvorbe tejto práce a v neposlednom rade ďakujem svojim rodičom, bez ktorých ohromnej podpory by som sa k písaniu tejto práce nikdy nedostal.

Abstrakt

Cieľom tejto práce je obsiahnuť v prípadovej štúdii technickú a ekonomickú analýzu využitia alternatívnych zdrojov energie v mestskej koľajovej doprave v Prahe na konkrétnom type vozidla. Práca sa zaoberá technickou analýzou, kde je zostavený model v programe MATLAB Simulink, ktorý na základe vložených dát a uložených parametrov počíta podkladové dáta pre ekonomickú analýzu, ktorá následne zhodnocuje navrhnuté technické riešenie využitia alternatívnych zdrojov v konkrétnom type vozidla na električkovej sieti v Prahe.

Klíčové slová

Električka, Supercapacitor, Akumulátorová batéria, ekonomická analýza, úspora energie, ekológia prevádzky

Abstract

Main target of this work is to aim a case-study based on technical analysis and economic evaluation of use of alternative power sources in city rail transport in Prague on the exact vehicle type. This case-study is considering technical analysis, where the core is model built in MATLAB Simulink, which calculate, according to input data, basement for economic evaluation, that finally evaluate given technical solution based on use of alternative power source in definite tramway and definite track part in Prague.

Key words

Tramway, Supercapacitor, Acumulator battery, economic evaluation, energy savings, maintenance ecology

Použité skratky

AB – akumulátorové batérie

AC – alternating current system (striedavý systém)

AZE- Alternatívny zdroj energie

BS – brzdový systém

CF – cash-flow (hotovostný tok)

DC- direct current system (jednosmerný systém)

DPP- Dopravní podnik Praha, a.s.

EDB- elektrodynamická brzda

EV – elektrické vozidlo

VN- vysoké napätie

LTO – Lítium-Titánový oxid ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

MG- motor-generátor

NCA – Lítium-Nikel Kobalt Hlinitý oxid (LiNiCoAlO_2)

NMC – Lítium-Nikel Mangánovo Kobaltový oxid (LiNiMnCoO_2)&

NPV – Net present value (čistá súčasná hodnota)

PCC- Presidents' Commerce Committee model usporiadania električky

pF – piko-Farad ($1\text{pF} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ F}$)

PRE –Pražská energetika, a.s.

SC – Superkapacitor

TRAM- električka

μF – micro Farad ($1\mu\text{F} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$)

VN- vysoké napätie

Obsah

Prehlásenie	3
Poďakovanie	4
Abstrakt.....	5
Klíčov \acute{e} slová	5
Abstract.....	5
Key words.....	5
Použit \acute{e} skratky.....	6
Zoznam obrázkov	8
Zoznam grafov	8
Zoznam tabuliek.....	9
Úvod.....	10
1. História a súčasnosť električiek v Prahe	11
2. Alternatívne zdroje energie v mestskej doprave.....	12
2.1. Toky energií a straty v električkovej prevádzke.....	12
2.1.1. Energetické toky a straty v električke bez rekuperácie a batérii	12
2.1.2. Toky energií v električke umožňujúcej rekuperáciu	13
2.1.3. Tok energie v električke využívajúcej hybridný systém batérii a superkapacitorov... ..	13
2.2. Dôvody pre využitie alternatívnych zdrojov v mestskej koľajovej doprave v Prahe	14
2.3. Typy akumuláčnych zariadení.....	14
2.3.1. Akumulácia na báze elektro-chemickej výmeny.....	15
2.3.2. Vysoko výkonné Lithium- ionové batérie založené na kobalte	15
2.3.3. Akumulácia na báze elektrostatického poľa	16
2.3.4. Superkapacity	17
2.4. Porovnanie vhodnosti aplikácie elektrochemických akumulátorov a superkapacitorov pre účely využitia ako alternatívny zdroj energie električky.....	18
2.5. Využitie alternatívnych zdrojov energie vo svete.....	20
2.5.1. Bombardier MITRAC, Mannheim, Nemecko	20
2.5.2. Siemens SITRAS systém	21
3. Reálne dáta a simulácia	22
3.1. Zvolená trať pre fyzickú interpretáciu električkovej trate v Simulinku	22
3.2. Zvolené vozidlo na realizáciu modelu v Simulinku	24
3.2.1. Základné dáta o vozidle	24
3.2.2. Fyzikálny model električky a použité rovnice	25
3.3. Kalkulácia dát pre projektovanie hybridného systému	27
3.4. Projektovanie hybridného systému.....	32

3.4.1.	Kalkulácia energetickej hustoty akumulácie energie.....	32
3.4.2.	Projektovanie superkapacitorového akumuláčného systému	32
3.4.3.	Projektovanie systému využívajúceho batérie	34
3.4.4.	Projektovanie hybridného systému využívajúceho batérie a superkapacity	34
3.4.5	Porovnanie navrhnutých riešení napájania	35
4.	Simulink model	36
4.1.	Všeobecný model využívajúci AZE v schéme	36
4.2.	Mechanický model električky	37
4.3.	Elektrický model električky	39
5.	Ekonomická časť	41
5.1	Úvod do ekonomickej časti.....	41
5.1.1.	Základné kritéria pre porovnanie ekonomickej efektívnosti projektu	41
5.1.2.	Konkrétne zvolené kritérium a jeho špecifikácia pre konkrétne podmienky	42
5.2.	Distribúcia a dodávky elektrickej energie	42
5.3.	Konštrukcia ceny pre VN odberateľa	42
5.4.	Investičné náklady	44
5.5.	Kalkulácia prevádzkového Cash-flow a stanovenie diskontu	44
5.6.	Výsledná ekonomická kalkúlia hodnoty projektu a zhodnotenie ekonomickej analýzy pri daných parametroch.....	45
5.7.	Konfigurácia parametrov ekonomického hodnotenia a citlivostné analýzy.....	46
5.8.	Celkové zhodnotenie ekonomických aspektov a vyvodenie záverov	50
6.	Záver	51
	Literatúra	52

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 - Tok energie - Schéma električky s odporovým brzdením (Autor: Daniel Sihlovec)	12
Obrázok 2 - Tok energie - Schéma električky umožňujúcej rekuperáciu (Autor: Daniel Sihlovec).....	13
Obrázok 3 - Tok energii - schéma električky s využitím hybridného systému využitia akumulátorových batérií a superkapacitorov (Autor: Daniel Sihlovec).....	14
Obrázok 4 - Schéma systému Bombardier MITRAC (Zdroj: marketingové prospekty Bombardieru)	20
Obrázok 5 - Princíp systému SITRAS (zdroj: marketingové materiály Siemens).....	22
Obrázok 6 - Interpretácia síl a uhla α pri jazde do kopca	25
Obrázok 7 - Schéma prenosu elektrického točivého momentu na koleso (autor: Daniel Sihlovec) ..	27
Obrázok 8 - Zapojenie hybridného systému do trakčného systému električky (kde: 1-zberač prúdu, 2–menič, 3-Batérie, 4-superkapacity, 5- motory spojené v podvozkoch).....	37
Obrázok 9 - Mechanický model električky s projekciou síl	38
Obrázok 10 - Model elektrického systému električky	39
Obrázok 11 - Model P3_DC/DC meniča	40

Zoznam grafov

Graf 1 - Energetická hustota NCA a NMC Li-ion akumulátorov v porovnaní s NiCd, NiMH či olovenými akumulátormi (Zdroj: Batteryuniversity.com)	16
Graf 2 - Porovnanie životnosti akumulátorov medzi rôznymi typmi akumulátorov (Zdroj: Batteryuniversity.com)	16
Graf 3 - V-A charakteristika superkapacitora - nabíjanie ^[7]	17
Graf 4 - V-A charakteristika superkapacitora - vybíjanie ^[7]	18
Graf 5 - Tabuľka porovnania špecifického výkonu a špecifickej energie akumulátorov spomenutých vyššie (autor: Daniel Sihlovec)	19
Graf 6 - Porovnanie systémových informácií s (bledomodrá) a bez (parížska modrá) systému MITRAC, kde: horný graf – prúdové pomery počas jazdy, spodný graf – Kolísanie napätia počas jazdy (zdroj: marketingové materiály Bombardier)	21
Graf 7 - Výškový profil trate linky č.1 (k dátumu 16.6.2016)	22
Graf 8 - Výškový profil trate linky č.7 (k dátumu 16.6.2016)	23
Graf 9 - Výškový profil trate linky č. 13 (k dátumu 16.6.2016)	23
Graf 10 - Reálne traťové podmienky na električkovej trati linky č.1	24
Graf 11 - Oscilácie uhla α medzi električkovými zastávkami linky č.1	26
Graf 12 - Aproximácia výškového profilu trate do funkcie H(s).....	28
Graf 13 - Aproximácia oscilácie uhla do funkcie Alpha(s).....	28
Graf 14 - Rýchlosť električky medzi nadefinovanými úskami	29
Graf 15 - Funkcia sily závislá od vzdialenosti počítaná medzi zastávkami.....	30
Graf 16 - Výkon počítaný medzi zastávkami	30
Graf 17 - Projekcia výkonu v čase do energie (kde: bledomodrá - znázornenie využitej energie, zelená - energia voľná k uloženiu)	31
Graf 18 - Energia uložená v superkapacitoroch pri využití systému postupného ukladania	33
Graf 19 – Závislosť čistej súčasnej hodnoty od zmeny ceny elektrickej energie v jednotlivých rokoch	47
Graf 20 - Závislosť čistej súčasnej hodnoty od výšky diskontu v jednotlivých rokoch.....	48
Graf 21 - Dvoj-parametrická citlivosťná analýza zmeny cien vstupov a ceny nakupovanej el. energie voči NPV	49

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 - Porovnanie vlastností superkapacitorov a Li-ion akumulátorov ^[15]	19
Tabuľka 2 - Technické parametre použité pre Simulink model električky	24
Tabuľka 3 - Parametre jednotlivých druhov riešení AZE	35
Tabuľka 4 - Skladba investičných nákladov.....	44

Úvod

My, ako civilizácia 21. Storočia, sme obklopení modernými technológiami vo všetkých oblastiach nášho života. Medzi moderné trendy v technike patria však aj pojmy ako ekológia, ekonómia a úspora energie. Táto obsiahla téma nezahŕňa len naše domácnosti, voľnočasové technológie avšak aj pracovné pomôcky a dopravné technológie. Hlavné požiadavky vyvinutej spoločnosti na dopravu sú rýchlosť, úspora a ekológia, ktoré sú samozrejme zo dňa na deň stále viac prízvukované.

Táto diplomová práca je primárne písaná ako prípadová štúdia založená na možnosti využitia alternatívnych zdrojov ako akumulátorov energie v pražskej električkovej doprave. Ako postupne táto práca ukáže existuje mnoho možností ako možno využiť energiu alternatívne, ako sú zotrvačníky, palivové články, batérie alebo hybridný systém pozostávajúci z kombinácie batérií a superkapacitorov v jednom zariadení. V rámci tejto diplomovej práce sú skúmané tri druhy technológií a ich energetické a ekonomické zhodnotenie. Jedná sa o využitie iba superkapacitorov, využitie iba batérií a využitie hybridného systému pozostávajúceho ako z batérií, tak aj zo superkapacitorov.

Úvod práce pozostáva zo stručnej histórie a vývoja električkovej prevádzky v Prahe. Praha, ako hlavné mesto Českej republiky, používa električkovú dopravu viac ako 140 rokov a práve kvôli tomu je s týmto mestom spojených aj niekoľko známych značiek výrobcov električiek ako bola továreň Ringhoffer Smíchov, Tatra Smíchov či ČKD, pričom tieto podniky svoje výrobky dodávali hlavne na koľaje hlavného mesta.

Vo výskumnej časti sú podstatné dva vstupy, ktoré je možné si ľubovoľne zvoliť. Jedná sa o výber trate na ktorej bude navrhnuté vozidlo premávať a samotné vozidlo. Trať je možné si vymyslieť pre účely tejto práce, no praktickejšie a realickejšie je podľa môjho názoru preskúmať výškové pomery niekoľkých tratí na ktorých premávajú konkrétne linky a vybrať tú najexponovanejšiu, kde môžem pomerne zreteľne deklarovať toky energie jednak pri rozbehoch a jednak možné toky energií, ktoré môžem pri rekuperácii ukladať do systému a samozrejme ekonomické ukazatele. Pre tieto účely bola vybraná linka č.1, ktorá premáva zo Sídlište Petřiny na Spojovací. Kalkulácie sú spočítané práve pre tento jeden smer, nakoľko pre opačný smer sú uvedené iné zastávkové polohy, z toho sa odvíjajúce rozdielne výškové polohy zastávok, ktoré teda v konečnom dôsledku môžu tvoriť rozdielne hodnoty vo vypočítaných energiách avšak v budúcom rozšírenom vydaní tejto práce, či pri využití tejto práce ďalším autorom môže poslúžiť ako základ práve v práci navrhnutý model. Model by mal pre správnu funkciu obsahovať ako mechanický model, z ktorého sa odvíja model elektrický, resp. ako veľké mechanické sily je nutné prekonať aby sa vozidlo dalo do pohybu. Následný elektrický model by mal spĺňať základnú požiadavku voľného prepojenia toku z motorov pri rekuperácii buď do siete alebo priamo do hybridného systému, v ktorom bude energia uskladnená do doby než ju systém pri ďalšom rozbehu nevyužije. Z tohto modelu by mal byť výstupom sumár potrebných kombinácií energií pre celú trať.

Na technickú časť naväzuje časť ekonomická, ktorá využíva dáta získané z technického modelu a na základe metód ekonomického hodnotenia alternatív podáva obraz o výhodnosti či nevýhodnosti daného navrhnutého riešenia. Výsledkom economickej analýzy je zhrnutie urobené aj na základe citlivostnej analýzy, ktorá ukáže za akých okolností je zariadenie výhodné a naopak, kedy sa neoplatí do tohto projektu sa púšťať.

Táto diplomová práca je písaná pomocou balíka Microsoft Office a kalkulácie a simulácie boli implementované v programe Matlab Simulink. Všetky súbory obsahujúce model, informácie o trati a ekonomické kalkulácie je sú k dispozícii na internete.

1. História a súčasnosť električiek v Prahe

Medzi moderné trendy v mestskej doprave patrí okrem iného komfort a využitie ekologickejších spôsobov dopravy ako metro či električky. Nápad využiť koľaj v rámci mesta bol prvý krát spomenutý niekedy v 19. storočí. Ak zmieňujem špeciálne Prahu, prvý mestský koľajový systém bol vybudovaný k dátumu 23.09.1875 ako „koňka“, čiže koňmi ťahané vagóny. Prvá trať „koňky“ bola postavená z Karlína na Národní Třídu. V priebehu 20 rokov sa rozrástla sieť v rámci Prahy približne na 20 kilometrov. Počiatky využitia elektrickej energie ako nositeľa energie užíwanej k pohybu vozidiel sa datujú k počiatku osemdesiatych rokov 19. storočia do ruského Petrohradu, pričom o zhruba 10 rokov neskôr sa tento trend presúva aj do Prahy.

František Křížík, meno spojené s počiatkami elektrizácie tratí v Prahe jednosmerným systémom o veľkosti 600V a skonštruovaním prvej električky v dobovom Rakúsko-Uhorsku, kde plus pól električky bola trolej, resp. styk troleja so zberačom a mínus pól bola koľaj.

V skutočnosti to s elektrizáciou mestských koľajových sietí nebolo tak prosté, ako sa to na prvý pohľad zdá. Využitiu elektrickej energie k pohybu vozidiel konkurovali možnosti ďalšieho využitia koní, skonštruovanie parou poháňanej električky, plynová električka či šliapacia električka. Jedná sa o špeciálny vynález českého konštruktéra Sylvestra Krnku, kde električka obsahuje 20 miest pre ľudí, ktorí s ňou hýbu na úplne rovnakom princípe ako je princíp bicykla.^[1] Vzhľadom na požiadavku ekológie, by sme mohli považovať toto riešenie za stále uskutočniteľné.

Počas 20. storočia sa v Prahe tri krát jednalo o zrušenie električkovej dopravy. Bolo to počas prvej a druhej svetovej vojny a v šesťdesiatych a sedemdesiatych rokoch, kedy v Prahe začala výstavba metra. Niektoré linky boli zrušené, keďže premávali v rovnakom smere ako metro. Pokles využitia električiek sa však zamedzil v osemdesiatych rokoch, odkedy sa električková sieť opäť rozrástá.

Čo sa týka vozidlového parku 20. storočia, po Ringhofferových električkách a dodávkach T3, prichádza v polovici osemdesiatych rokov pomerne zásadná zmena a tou je dodávka obojsmerných električiek typu KT8D5. Po páde komunistického režimu v roku 1989 sa v deväťdesiatych rokoch objednávajú typy T6A5, koncepčne veľmi podobné legende T3 avšak vychádzajúce z novších prvkov regulácie. V rámci obnovy vozidlového parku v prvých rokoch nového tisícročia sa rozhodlo, že ďalšie električky, ktoré sa do mesta budú kupovať už budú výhradne nízkopodlažné a preto v roku 2005 prichádzajú električky radu 14T vyrobené v plzenskej Škoda Transportation. S odstupom času sa táto rada ukázala ako nie práve skvelý výber pre rozsiahle technické problémy a preto sa uvažovalo najskôr s odpredajom týchto električiek, či ich rozpálením, neskôr sa však rozhodlo, že tieto budú opravené, upravené a vrátené do plnej prevádzky.

Posledné roky prebieha dodávka z kontraktu Dopravního podniku Praha a.s. s plzenskou firmou Škoda Transportation na dodávku 250ks nových električiek typu 15T (125 ks) a 15T4 (125 ks). Tieto dodávky prebiehajú medzi rokmi 2015-2018 a celkovo sa vďaka tomuto kroku mohli vyradiť najstaršie stroje typu T3, T3SU a T3SUCS a T6A5 ktoré boli tým pádom nahradené plne nízkopodlažnými vozidlami využívajúcimi technológie 21. storočia. V súčasnosti tiež prebieha rekonštrukcia 5 vozidiel odkúpených z Miškovca a Straussbergu typu KT8D5, ktoré doplnia flotilu dvojčlánkových vozidiel KT8D5R.N2P so stredovými nízkopodlažným článkom.

2. Alternatívne zdroje energie v mestskej doprave

2.1. Toky energií a straty v električkovej prevádzke

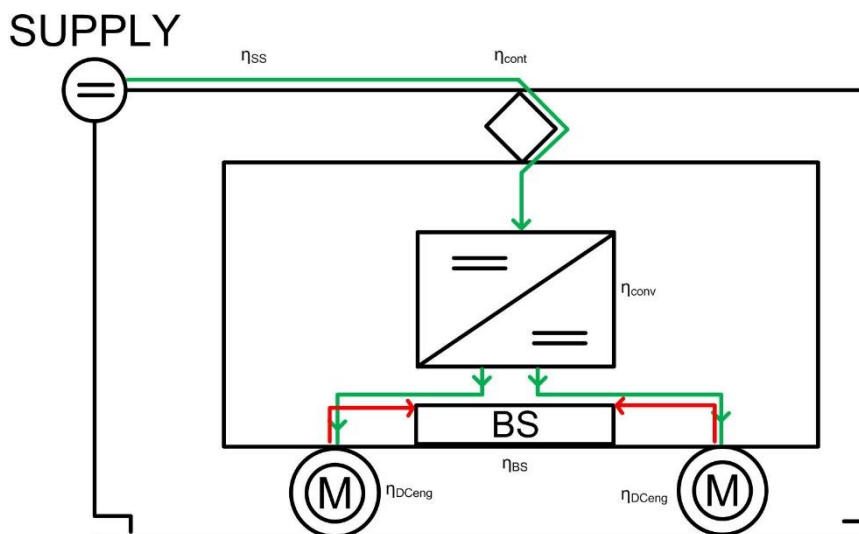
Existuje viacero spôsobov využitia energie vyrobenej pri elektro-dynamickom brzdení. Môžeme spotrebovať túto energiu v brzdovom odporníku a premeniť ju v teplo, pre ktorý musíme naprojektovať dodatočné chladenie alebo môžeme túto energiu vrátiť späť do siete. Druhý zo spomínaných prípadov môžeme využiť v prípade, že v napájanom DC úseku odoberá energiu iná električka, ktorá môže túto vracanú spotrebu využiť. Tretia možnosť je uskladniť energiu priamo vo vozidle a to v batériách či superkapacitoroch.

2.1.1. Energetické toky a straty v električke bez rekuperácie a batérii

Prvé straty (**zelená línia** v obrázku 1) môžeme namerať v podstate už na vedení (*supply*) a jedná sa o straty vzhľadom na vzdialenosť voči napájacímu bodu (η_{ss} – *supply point*) a straty na nedokonalom styku trolej zberač (η_{cont} - kontakt). Nedokonalosť styku je daná najmä kľukatosťou troleja, či oneskorenou reakciou spätnej väzby vzduchového či pružinového zariadenia vyvíjajúceho tlak zberača na trolej.

Straty v trakčnom meniči (η_{conv}) sú vyššie, než pri ostatných typoch električiek, čo je dané najmä faktom, že v zmysle trakčného meniča je použitý odporový zrýchľovač. Ďalšie straty energie sú v jednosmerných motoroch (M - (η_{DCeng})). Je to dané najmä faktom, že vo vozidlách s odporovou reguláciou sú používané práve jednosmerné motory, ktoré nemajú bezkontaktný prenos energie medzi rotorom a svorkovnicou motora. Používame uhlíkové kontakty, ktoré zabezpečujú spojenie svorkovnice s magnetickým obvodom rotora. Všetky tieto straty uvažujeme počas rozbehu električky.

Najvyššie straty však električka dosahuje počas procesu brzdenia do odporu (**červená línia** v obrázku 1), kedy je všetka vyprodukovaná energia, vytvorená počas generátorického chodu motora, marená v odporníku (η_{BS}) ktorý je tvorený odporovým materiálom. Znamená to teda, že energia je marená v teplo, ktoré je nutné dodatočne odvádzať a tento odporník (na obrázku BS) chladiť a chrániť ho tým proti roztaveniu.

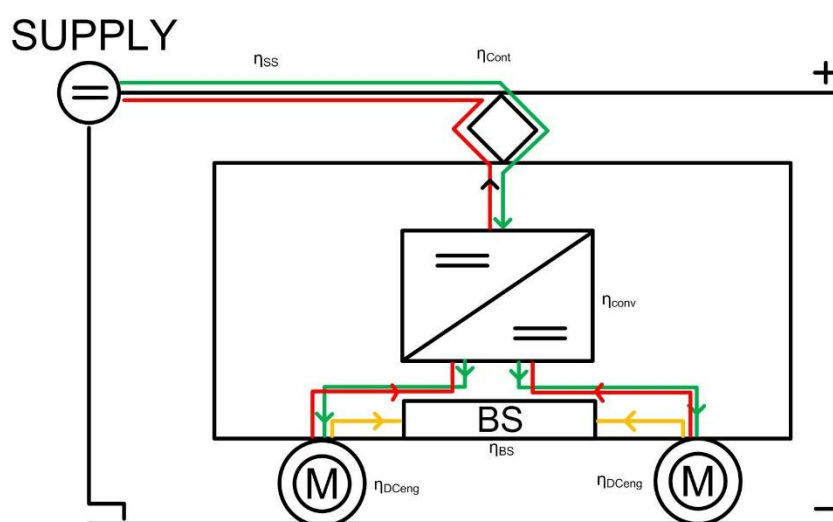


Obrázok 1 - Tok energie - Schéma električky s odporovým brzdením (Autor: Daniel Sihlovec)

2.1.2. Toky energií v elektrické umožňujúcej rekuperáciu

V tomto type vozidla sú vstupné straty totožné so stratami vozidla so zapojením brzdnéj schémy do odporu. Jedinou rozdielnou veličinou sú straty v trakčnom meniči, pričom vozidlá umožňujúce rekuperáciu obvykle majú modernejšie asynchrónne či synchrónne motory, kde sa energia do rotora prenáša bezkontaktné a trakčné meniče obsahujú prvky na báze polovodičových prvkov IGBT či GTO, kde sú straty približne na úrovni 3-5%. Straty na motoroch ($M - (\eta_{DCeng})$). sú tak isto minimalizované nakoľko, ako je spomenuté vyššie sa jedná o novšie typy motorov.

Straty pri procese brzdenia môžeme interpretovať ako straty v premene točivej energie späť na elektrickú pričom energia tečie späť z motorov idúcich v generátorickom režime do siete (**žltá línia** v obrázku 2). Je to jedna z možností ako môžeme eliminovať straty pri brzdení (η_{BS}) na minimum. Rekuperovať však vozidlo môže len v úseku, kde sa nachádza vozidlo, ktoré môže energiu spotrebovať, v opačnom prípade je nutné túto energiu premeniť na energiu tepelnú v odporníku ($BS - brake system$), čím opäť vznikajú dodatočné straty.

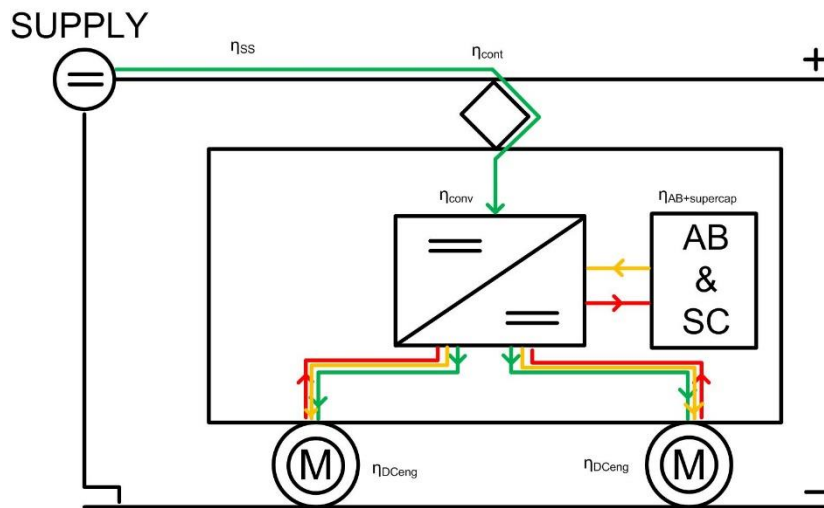


Obrázok 2 - Tok energie - Schéma elektrického systému umožňujúcej rekuperáciu (Autor: Daniel Sihlovec)

2.1.3. Tok energie v elektrické využívajúcej hybridný systém batérii a superkapacitorov

Straty, ktoré vznikajú pri rozbehu majú rovnaký charakter ako pri predchádzajúcich dvoch príkladoch (**zelená línia** v obrázku 3). Medzi súčasti, ktoré sú najmenej stratové patria v tomto prípade elektromotory ($M - (\eta_{DCeng})$). Príkladom tohto druhu vozidla môžu byť električky 15T či 27T pre čínske mesto Qingdao od spoločnosti Škoda Transportation. Elektromotory vyvinuté pre tieto vozidlá sú synchrónneho typu s NdFeB permanentnými magnetmi, ktoré sa vyznačujú účinnosťou približne o 2% lepšou než najlepšie asynchrónne elektromotory.

Počas brzdenia (**červená línia** v obrázku 3) sú typické príklady strát v trakčnom meniči, v elektromotore a samozrejme straty v superkapacitore a akumulátorových batériách ($\eta_{AB+supercap}$), nakoľko z tohoto systému nevieme a ani nemôžeme vybiť 100% energie. Samozrejme sú aj straty pri opačnom procese (**žltá línia** v obrázku 3) a teda, keď napájame elektromotory z nášho hybridného systému pozostávajúceho z akumulátorových batérii a superkondenzátorov. Môžeme eliminovať straty pri rozjazde nakoľko môžeme odberové špičky napájať práve z tohto systému.



Obrázok 3 - Tok energii - schéma električky s využitím hybridného systému využitia akumulátorových batérií a superkapacitorov (Autor: Daniel Sihlovec)

2.2. Dôvody pre využitie alternatívnych zdrojov v mestskej koľajovej doprave v Prahe

Moderné trendy v pracovnom a osobnom živote znamenajú najmä znižovanie spotreby elektrickej energie. V doprave sú tieto štandardy platné tak isto. Mnoho spoločností prevádzkujúcich mestskú hromadnú dopravu v veľkých európskych mestách využíva práve rôzne spôsoby na šetrenie energie, či už je to využívanie rekuperácie u vozidiel alebo práve testovanie a vývoj vozidiel s alternatívnymi možnosťami napájania. Energia je ukladaná do systému, z ktorého môže byť použiteľná pre ďalší pohyb vozidla a nemusí byť tak marená zbytočne v odpore. Jedným z hlavných dôvodov pre rozšírenie vozového parku o druh vozidiel, ktoré dokážu v sebe uchovávať elektrickú energiu pre ďalšie použitie môže byť tiež zachádzanie vozidiel pravidelne mimo možnosti stabilného napájania. Jedná sa napríklad o električkové trate, kde električka posledných pár kilometrov zachádza na trať mimo troleja. Tieto varianty sa v praxi testujú napríklad v Turecku v meste Konya a vychádzajú finančne menej náročne než dobudovanie siete stabilného napájania. Tieto akumuláčny zariadenia sú nabíjané počas toho, ako je vozidlo pripojené k sieti a túto energiu následne využívajú mimo siete.

Ďalšia možnosť, ako využiť uloženú energiu je vyhladzovať prúdové odberové špičky pri rozjazddoch zo zastávok či križovatiek. Tieto systémy môžu byť inštalované pre napájanie pomocných pohonov, osvetlenie interiéru, či napájanie elektroniky v pohotovostnom stave.

Hoci sú náklady na vybavenie vozidiel systémami hybridného napájania stále pomerne vysoké, v niektorých prípadoch môžu byť rovnocenné či dokonca nižšie v prípade, že porovnáваме s výstavbou pevnej trakčnej siete. Samozrejme samotná cena siete vždy závisí od povrchu, poveternostných podmienok a ďalších vplyvov.

2.3. Typy akumuláčny zariadení

Pre účely tejto práce nie je podstatné podrobne vymenovať všetky druhy zariadení na ukladanie energie, ako je napríklad zotrvačník, avšak ako jedna z alternatív je spomenutá. Pre účely tejto práce budú však zahrnuté akumuláčny zariadenia, ktoré sú schopné ukladať energiu na základe elektrostatického poľa a na základe elektro-chemickej výmeny a to konkrétne superkapacitory a Lítium-ionové batérie.

2.3.1. Akumulácia na báze elektro-chemickej výmeny

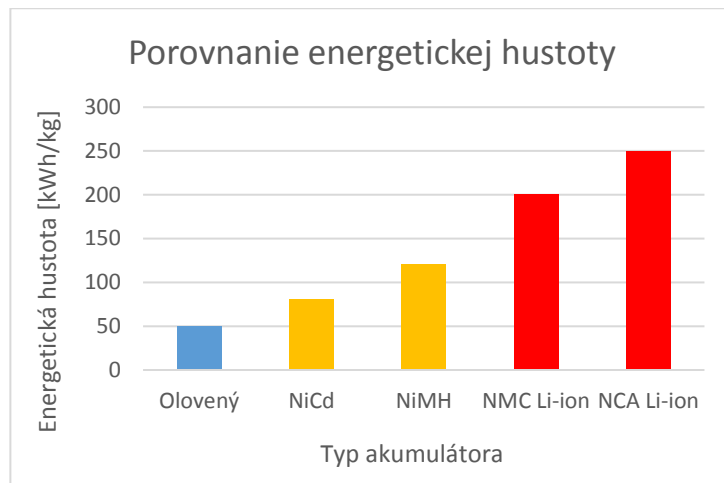
Základným princípom elektro-chemickej výmeny v akumulátoroch sú interakcie medzi jednotlivými chemickými prvkami v danom zariadení. Medzi tieto zariadenia patria palivové články, olovené, NiCd či NiMH akumulátory. Tento druh akumulátorov nepatrí medzi nové technológie a prešiel si tak mnohými vývojovými etapami. V počiatkoch sa jednalo práve o vyššie spomínané olovené akumulátory neskôr nahradzované NiCd článkami, ktoré sa dajú rýchlejšie nabiť, či majú dlhšiu životnosť, krivka samo-vybitia je však počas prvých 14 dní strmšia než u klasických olovených akumulátorov. NiMH články boli vlastne náhradou anódovej kadmiovej časti za metal-hydridovú, čo zaručovalo vysokú kapacitu vďaka vodíku, ktorý sa neukladá pod tlakom. Výhodou bolo využitie pri nižších teplotách, pri tých vyšších však akumulátor degradoval rýchlejšie. Medzi poslednú technológiu, ktorá sa neustále vyvíja a v poslednom období sa začína hojne využívať v doprave patria Li-ion akumulátory.

2.3.2. Vysoko výkonné Lithium- ionové batérie založené na kobalte

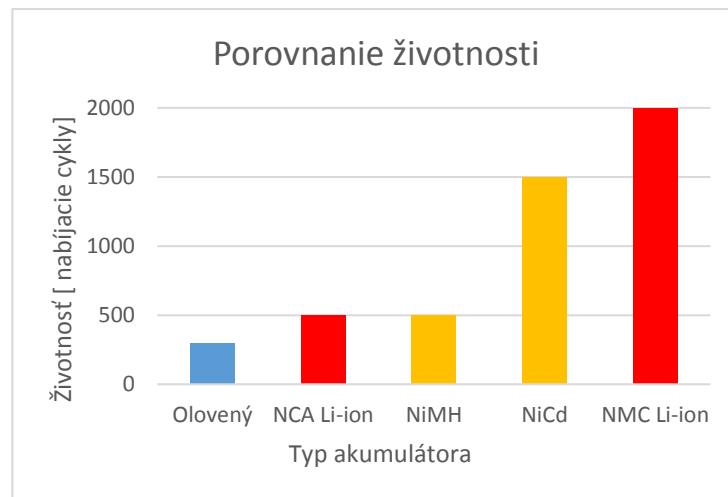
Väčšina lítium-iónových batérií pre aplikácie na prenosných zariadeniach sú kobaltové. Systém pozostáva z katódy, ako kladnej elektródy, na báze oxidu kobaltu a anódy, ako zápornej elektródy, na báze grafitu. Medzi ďalšie možnosti chemických interakcií v rámci batérií je možnosť využiť LiNiMnCoO₂ (NMC) alebo Li₄Ti₅O₁₂ (LTO) ako katódu.^[5,6] Nabíjacia charakteristika Li-ion akumulátorov je veľmi podobná NiMH akumulátorom.

Jednou z hlavných výhod akumulátorov na báze kobaltu je vysoká energetická hustota. V grafe č.1 je znázornené porovnanie energetickej hustoty [Wh/kg] Li-ion článkov založených na rôznych materiáloch z ktorých je zložená katóda vzhľadom k oloveným, NiCd či NiMH akumulátorom. Hlavné zdokonalenie technológie je využitie kobaltu spolu s mixom hliníka, oxidu mangánu alebo napríklad titánu (NCA-nikel, kobalt, hliník, NMC – nikel, mangán, kobalt). Toto riešenie zvyšuje energetickú hustotu, na druhú stranu však tento druh článku neumožňuje vysoké nabíjacie prúdy a nie je veľmi tepelne stabilný.

Napriek nevýhodám sa však tento druh batérií v doprave, a nielen v doprave, používa. Jedná sa napríklad o automobilovú dopravu (Tesla Model S – 60kWh alebo 85kWh - naprojektovaný na nabitie približne 40-50 krát za rok s vybijacím cyklom približne 7 dní), prípadne o domáce riešenie akumulácie energie od firmy Tesla – nástenné batérie Tesla Powerwall (6,4kWh). Ak si vezmeme napríklad práve automobil Tesla model S. Na to, aby batérie udržali auto v chode je ich nutný celkový počet 7104, pričom sú uložené v 16tich navzájom vymeniteľných moduloch. Toto batérové riešenie stojí približne 10 000 – 30 000 \$, čo je zhruba 20% automobilu. Vzhľadom na tieto fakty je preto predpokladateľné, že táto technológia bude s rozširujúcim sa portfóliom a zároveň rozšírením samotného segmentu lacnejšia.



Graf 1 - Energetická hustota NCA a NMC Li-ion akumulátorov v porovnaní s NiCd, NiMH či olovenými akumulátormi (Zdroj: Batteryuniversity.com)



Graf 2 - Porovnanie životnosti akumulátorov medzi rôznymi typmi akumulátorov (Zdroj: Batteryuniversity.com)

V grafe č.2 môžeme vidieť porovnanie energetických hustôt a životnosti vyššie spomínaných typov elektro-chemických akumulátorov. Z grafu je viditeľné, že Li-ion akumulátory sú z výberu vyššie uvedených technológií najvýkonnejšie z pohľadu porovnania životnosti v nabíjaciach cykloch.

Z pomedzi všetkých akumulátorov sa jedná teda o najlepší model pre využitie v mestskej hromadnej doprave, avšak tento systém je zatiaľ nevhodný pre samostatnú prevádzku vďaka svojej charakteristike s obmedzením počtu cyklov nabitia a preto je cieľ tejto práce stanovený na využitie kombinácie systému superkapacitorov s batériami v hybridnom systéme.

2.3.3. Akumulácia na báze elektrostatického poľa

Oproti akumulátorom využívajúcim elektro-chemickú premenu, sú tie s využitím elektrostatiky vhodnejšie pre aplikácie, kde je potrebné rýchle nabitie, rýchle uvoľnenie energie a časté využívanie nabíjaciach cyklov počas krátkych časových úsekov s vysokým nabíjajúcim/vybíjajúcim prúdom. Funkcia ukladania energie v elektrostatických akumulátoroch je v aplikácii napätvej diferencie medzi kladne a záporne nabitú platňu, čo nabíja kondenzátor. Tieto rozdeľujeme do troch základných kategórií:

- Elektrostatický kondenzátor so suchým separátorom (kapacita v rádoch pF – μ F)
- Elektrolytický kondenzátor (kapacita v rádoch μ F - mF)
- Superkapacitor (kapacita v ráde F)

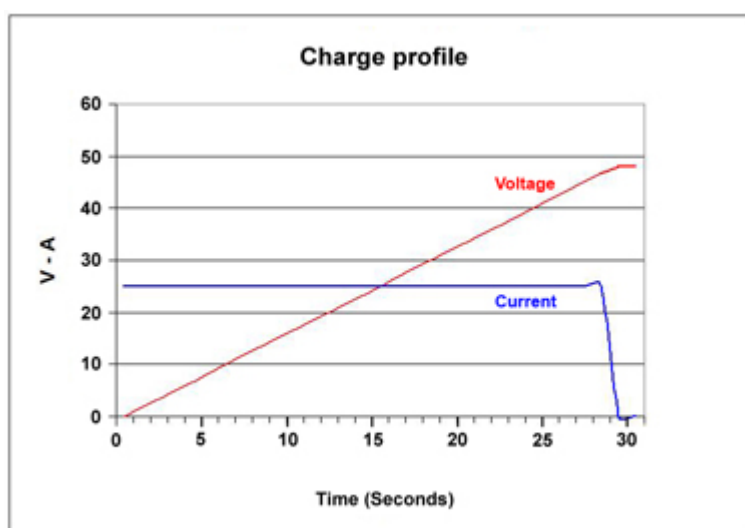
2.3.4. Superkapacity

Využívajú technológiu dvojvrstevných kondenzátorov a sú rozdielne od klasických kondenzátorov, keďže ich kapacita sa rádovo posúva zhruba na jednotky Faradov. Medzi prvé technológie superkapacitorov patrí asymetrický elektrochemický dvojvrstevný kondenzátor (AESLC), ktorý pracoval na princípe batérie ako elektródy na zvýšenie energetickej hustoty, avšak s nižším životným cyklom. Následne boli využívané grafénové elektródy. V súčasnosti vývoj postúpil do fázy využitia elektrochemických dvojvrstevných kondenzátorov (EDLC) avšak s využitím uhlíkových záťaží a organickej výroby. Táto technológia je lacnejšia a jednoduchšia na výrobu.

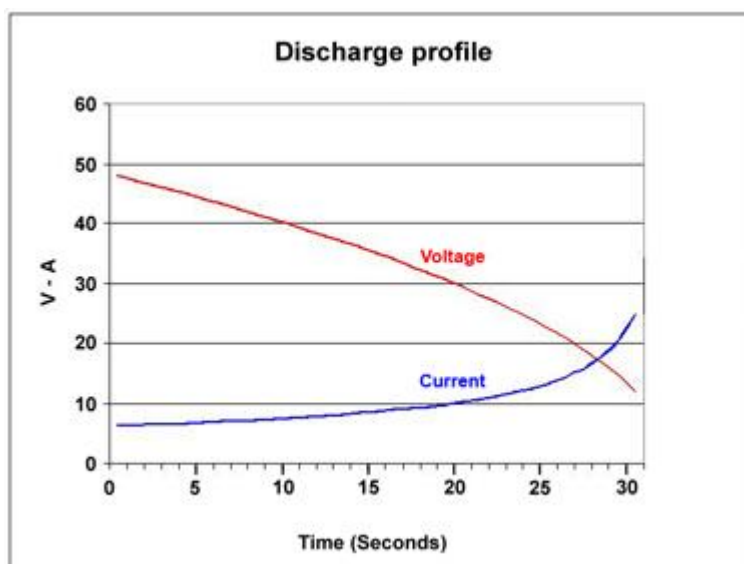
Elektrostatický kondenzátor môže byť vyrobený pre vysokonapäťové aplikácie avšak superkapacitor je na nižšie napätia, približne 2.5-2.7V. Pri súčasných technológiách je možné vyrobiť superkapacitor aj s vyšším maximálnym napätím, avšak toto vylepšenie by bolo na úkor zníženia jeho životnosti. Jediná možnosť ako získať vyšší napäťový strop je teda zapojenie viacerých superkondenzátorov do série, no pri tomto riešení je nutnosťou zapojenie vyvažovacieho obvodu, pokiaľ je do série zapojených viac ako 3 superkapacity. ^[7]

Vyvažovací obvod je vhodné použiť najmä ako prevenciu proti prepätiam na ľubovoľnom superkapacitore zapojenom v obvode. Hoci využitie väčšieho počtu kusov zvyšuje kapacitu tejto batérie a zvyšuje napätie, je toto najvhodnejšia metóda ako vyzískať zo systému vyššie napätie. Superkapacitor má obvyklý čas nabitia v rozmedzí 1-10 sekúnd. Príklad (uvedený na stránke batteryuniversity.com) nabíjacej a vybíjacej charakteristiky je možné prezrieť v grafoch 3 a 4 nižšie.

Spočiatku napätie lineárne stúpa, počas konštantného toku prúdu, pokiaľ prúd neklesne na nulu a napätie sa neustáli. Počas procesu vybíjania napätie klesá takmer lineárne. Ako optimálne riešenie môžeme využiť DC-DC menič, ktorý udržuje úroveň výkonu zvyšovaním prúdu vypínaním napätia. Superkapacitor nie je možné priviesť do stavu prebitia, takže v momente kedy je dobitý, prestane cezeň tiecť prúd. Pri nabíjaní prázdneho superkapacitora je potreba obmedziť nabíjací prúd nakoľko je schopný v tomto momente pohltiť do seba všetku energiu, ktorá je k dispozícii.



Graf 3 - V-A charakteristika superkapacitora - nabíjanie ^[7]



Graf 4 - V-A charakteristika superkapacitora - vybíjanie [7]

Superkapacitory sú ideálne pre využitie v aplikáciách, kde je potreba rýchle nabitie, ktoré je využité na vyplnenie krátkodobého energetického požiadavku. Najefektívnejšie sú pri premostení výpadkov výkonu alebo pri vyplňaní špičkovej hodnoty namiesto tvrdého zdroja na niekoľko sekúnd či minút.

Napriek tomu sú superkapacitory stále drahá technológia, keďže majú nízku špecifickú energiu a sú drahé hlavne na výrobu, keďže sa stále neprodukujú masovo. Znamená to teda vysokú cenu za 1 watt energie.

2.4. Porovnanie vhodnosti aplikácie elektrochemických akumulátorov a superkapacitorov pre účely využitia ako alternatívny zdroj energie električky

Superkapacitor má špecifickú energiu niekde v rozmedzí 1-30Wh/kg, ktorá je približne 10-50 krát menšia než u lítiových batérii. Medzi ďalšie nevýhody patrí vybíjacia charakteristika, kde elektrochemické akumulátory dodávajú stabilné napätie má práve napätie u superkapacitora tendenciu klesať takmer lineárne. Tento fakt spôsobuje redukciu spektra použiteľnej energie.

Môžeme si to predstaviť na 6V zdroji, ktorý je povolené vybiť do úrovne 4.5V, potom sa vybavenie odpojí. Ak porovnáme superkapacitor s elektrochemickým akumulátorom, ktorého vybíjacia charakteristika je približne horizontálna, superkapacitor sa vybijie v prvej štvrtine cyklu a zvyšnú energiu nemôžeme využiť. Pre lepšie využitie energie môžeme využiť vyššie spomínaný DC-DC menič na využitie aj nízkeho pásma napätia. V prípade elektrochemického akumulátora môžeme využiť približne 90%-95% energie.

Pokiaľ tieto dva zdroje porovnáme z hľadiska auto-vybíjania, má túto schopnosť vyššiu než elektrostátické kondenzátory, takisto vyššiu než elektrochemické akumulátory. V prípade superkapacitora môžeme povedať, že stratí približne 50% svojej energie v priebehu 30-40 dní, naopak elektrochemický zdroj ako napr. Li-ion batéria sa za mesiac vybijie zhruba o 5%.

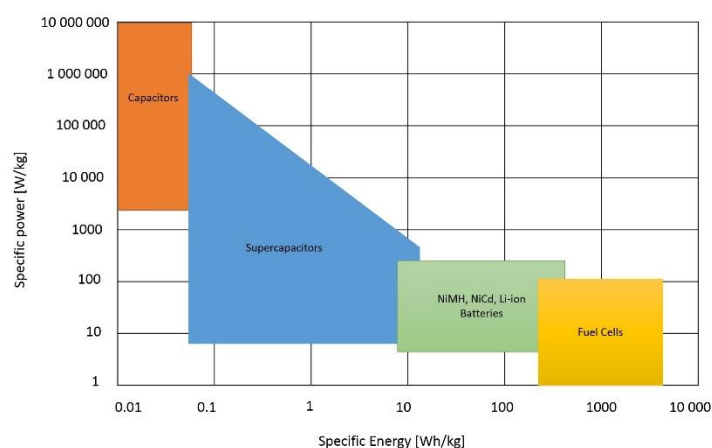
V porovnaná počtu cyklov počas životnosti a všeobecne životnosti oboch zariadení má lepšie vlastnosti superkapacitor, ktorý má možnosti cyklov v podstate neobmedzené a v priebehu 10 rokov v prevádzke zníži svoju kapacitu približne na 80% jeho pôvodnej kapacity.

Superkapacitory tiež môžu byť využívané v systéme powertrains, kde je požiadavka veľmi rýchleho nabitia počas elektrodynamického brzdenia a dodanie veľkého prúdu na rozbeh. Tieto požiadavky

robia superkapacitor ideálnym zdrojom energie pre špičkové doplnky energie pre hybridné vozidlá. Medzi prednosti systému tiež patrí veľký rozsah pracovných teplôt v porovnaní s elektrochemickými zdrojmi a dlhá životnosť. Medzi ďalšie výhody systému tvoreného superkapacitorami patrí vysoký špecifický výkon s nízkym odporom, ktorý umožňuje využitie vyšších prúdov, či jednoduché nabíjanie bez možnosti prebitia zariadenia.

Funkcia	Superkapacitor	Lítium - ion (vo všeob.)
Čas nabitia	1-10 s	10-60 min
Počet cyklov	1 milión/ 30.000h	500 a viac
Napätie bunky	2.3 - 2.75 V	3.6V nominálnych
Špecifická energia [Wh/kg]	5 (typicky)	120-240
Špecifický výkon [W/kg]	Do 10.000	1000-3000
Cena za kWh	10.000 \$ (typicky)	250\$ - 1000\$ (väčší systém)
Životnosť	15-20 rokov	5-10 rokov
Teplota pre nabitie	-40°C to 65°C	0°C to 45°C
Teplota pre vybitie	-40°C to 65°C	-20°C to 60°C

Tabuľka 1 - Porovnanie vlastností superkapacitorov a Li-ion akumulátorov [15]



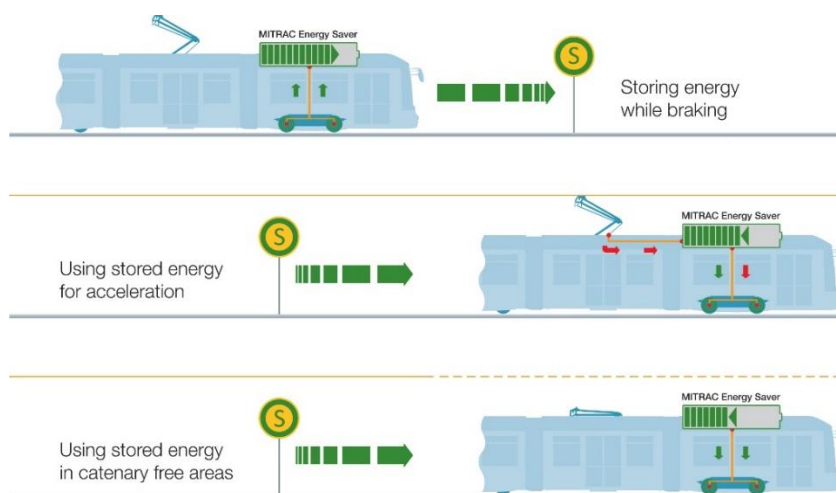
Graf 5 - Tabuľka porovnania špecifického výkonu a špecifickej energie akumulátorov spomenutých vyššie (autor: Daniel Sihlovec)

Na sumarizovanie všetkých spomenutých informácií slúži Tabuľka 1 a Graf 5, z čoho jasne vyplýva, že superkapacitory sú ideálne ak pri rýchlom nabití potrebujeme doplniť krátkodobý dopyt energie. Oproti tomu elektrochemické akumulátory dodávajú dlhotrvajúco energiu. Kombinovaním týchto dvoch alternatív do jedného hybridného systému môžeme dosiahnuť dobrých podmienok pre prevádzku alternatívneho zdroja energie v mestskej električkovej sieti.

2.5. Využitie alternatívnych zdrojov energie vo svete

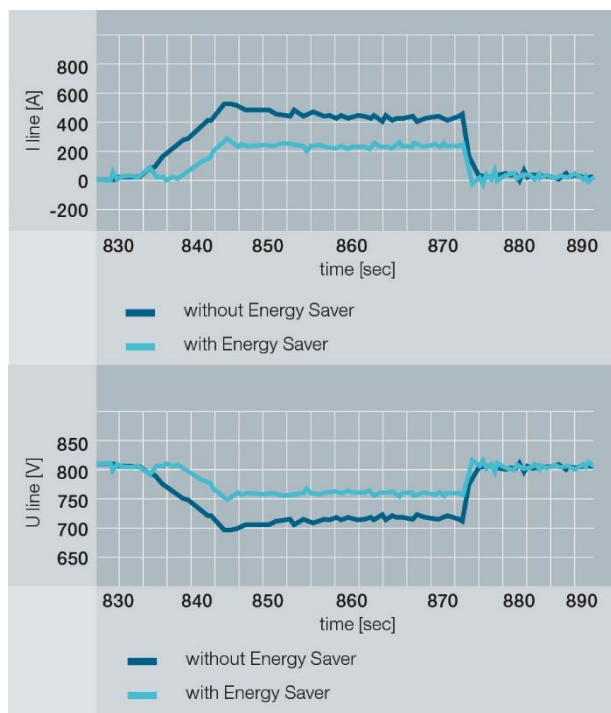
2.5.1. Bombardier MITRAC, Mannheim, Nemecko

Hoci technológia využitia superkapacitorov v doprave je pomerne nová, bola už vyskúšaná na niekoľkých miestach vo svete. Medzi príklady patrí nemecké mesto Mannheim, kde bola táto technológia prvý krát vyskúšaná v roku 2009. Dnes dopravný podnik mesta Mannheim (Rhein-Neckar-Verkehr GmbH) vlastní 30 vozidiel využívajúcich technológiu superkapacitorov. Táto technológia je primárne používaná na pokrývanie napätových špičiek a zlepšenie využitia energie pri rekuperačnom brzdení. V súčasnej situácii testujú nové batérie PRIMOVE (Li-ion batérie na báze mangánu a kobaltu NMC) so systémom MITRAC. Rekord na prejdenú vzdialenosť drží práve mesto Mannheim, kde vozidlo prešlo bez akéhokoľvek dodatočného nabitia či iného pripojenia na zdroj 41,6 km. V Mannheime je väčšina tratí postavená bez trakčného vedenia a možnosti napájania z tvrdej siete.^[8]



Obrázok 4 - Schéma systému Bombardier MITRAC (Zdroj: marketingové prospekty Bombardieru)

Kompletný systém založený na systéme Bombardier Mitrac Energy Saver môže zredukovať spotrebu pre električky či metro až do výšky 30% celkovej trakčnej energie, približne 40% rezervovaného výkonu a zhruba 20% celkových nákladov. Systém je vyvinutý na zníženie špičkových prúdov pri rozjazdoch a ukladanie energie počas elektrodynamického brzdenia. Tento systém môže byť využitý aj ako urýchľovač, pridávajúci väčšie množstvo energie pre rýchlejší rozjazd. Merania počas akcelerácie do rýchlosti 50 kmh^{-1} ukazujú špičkový dopyt energie a napätové výchylky v trakčnej sieti počas používania systému MITRAC (slabozelená línia) a bez použitia tohto systému (parížsko-modrá línia) ako je ukázané v grafe 6.



Graf 6 - Porovnanie systémových informácií s (bledomodrá) a bez (parížska modrá) systému MITRAC, kde: horný graf – prúdové pomery počas jazdy, spodný graf – Kolísanie napätia počas jazdy (zdroj: marketingové materiály Bombardier)

Na týchto grafoch môžeme skutočne vidieť, že systém pomáha šetriť energiu a zabraňuje výkyvom napätia v trakčnej sieti. V prvom grafe je zaznamenaných zhruba 40-50 sekúnd zrýchlenia na rýchlosť 50 kmh^{-1} . Bez použitia systému MITRAC môžeme vidieť, že prúdy pri rozbehu narastú približne v 10 sekundách na úroveň 500A. Ak vezmeme do úvahy, že v Mannoheime je napätie trakčnej siete 750VDC tak pri použití vzorca:

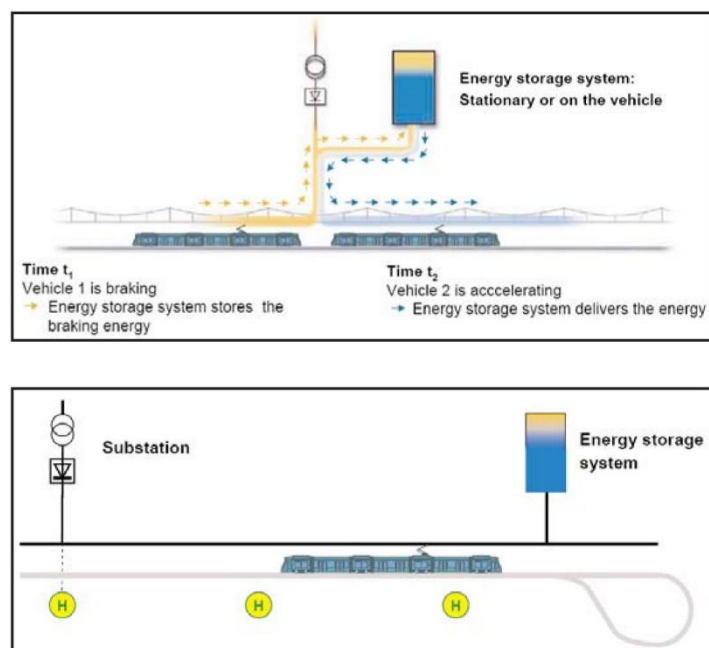
$$P = p(t) = U \cdot I \quad [1]$$

je hodnota okamžitého výkonu 375kW. Pri použití systému MITRAC je to približne 187,5kW, čo je zhruba polovica ušetrenej energie. Podobne môžeme sledovať na spodnom grafe, že oscilácia napätia v sieti sa minimalizuje, avšak bez použitia tohto systému nám hodnota klesá približne na 700VDC.

2.5.2. Siemens SITRAS systém

Systém SITRAS SES (Static Energy Storage) pracuje na princípe superkapacitorovej batérie (3000F, 2.7 V), ktoré sú nainštalované v určitých bodoch siete na ukladanie energie z vozidiel a optimalizáciu napäťových oscilácií. Systém pozostáva z prepojenia superkapacitorov upevnených na doske pri napájacom bode pripojenej paralelne. Tento systém pracuje napríklad v Bochum, Cologne, Dresdene, Madride či Pekingu. Systém používaný v Cologne pracuje ako ukladač energie. Vďaka tomuto systému ušetrí dopravný podnik priemerne 320 000kWh ročne, avšak vzhľadom na okolnosti je možné dosiahnuť úsporu až 500 000kWh ročne.

Rozdielna situácia je v Madride, kde je systém využívaný na stabilizáciu oscilácií napätia v sieti metra. Jeho hlavnou úlohou je stabilizovať pokles napätia pri rozjazde viacerých súprav naraz. Jedná sa o to, že pri rozjazde je požiadavka na prúd obrovská z čoho plynie pokles napätia. Tento prúdový dopyt pomáha vyplňať práve systém SITRAS a darí sa tak stabilizovať oscilácie 600V siete zhruba na úroveň 530V, kde predtým táto hodnota klesala až k 490V. ^[11]



Obrázok 5 - Princíp systému SITRAS (zdroj: marketingové materiály Siemens)

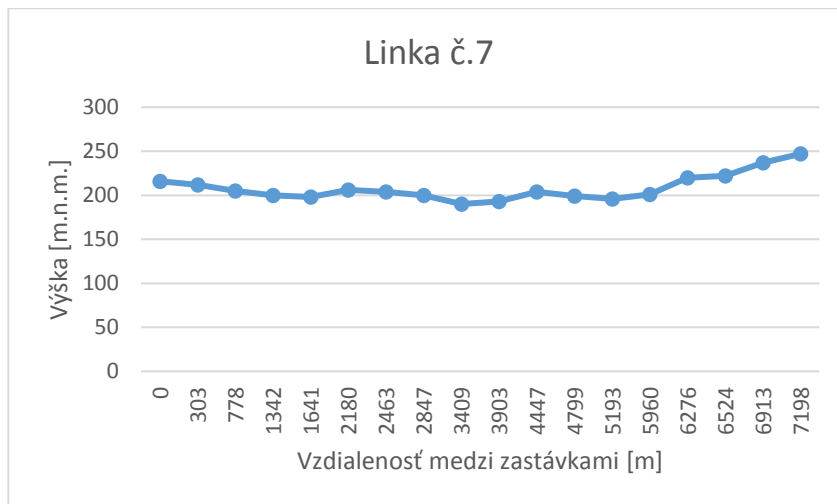
3. Reálne dáta a simulácia

3.1. Zvolená trať pre fyzickú interpretáciu električkovej trate v Simulinku

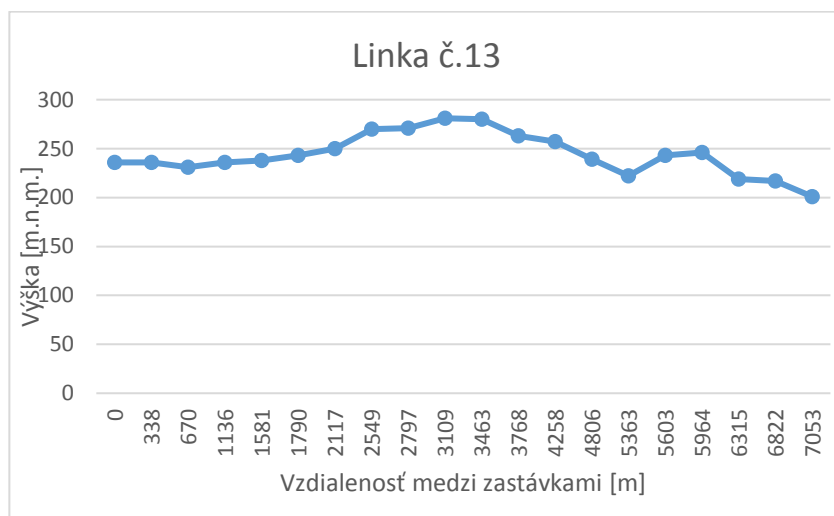
Medzi hlavné úlohy tejto práce patrí simulácia v programe MATLAB, či je možné a efektívne využívať hybridný systém v pražských električkách. Ako prvé dáta som si našiel závislosť nadmorskej výšky jednotlivých zastávok vzhľadom na ich vzdialenosť. Centrum mesta je vybudované v doline avšak okolité časti sú takmer všetky na kopci. Pre implementovanie dát je najlepšie vybrať si trasu, ktorá obsahuje ako stúpanie tak aj klesanie, prípadne jazdu po rovine. Vybral som si pre porovnanie tri rôzne električkové linky, jazdiace po 3 rôznych tratiach. Jedná sa o linku č.1, linku č.7 a linku č.13. Hlavnou úlohou je porovnať vlastnosti tratí a nájsť najvhodnejšiu variantu pre čo najčastejšie využitie hybridného systému. Pre tento účel bola vybraná linka č.1. Jej výškový profil trate môžeme vidieť v grafe 7. Pre vizuálne porovnanie uvádzam v grafe 8 a 9 aj výškové profily pre linky číslo 7 a 13.



Graf 7 - Výškový profil trate linky č.1 (k dátumu 16.6.2016)



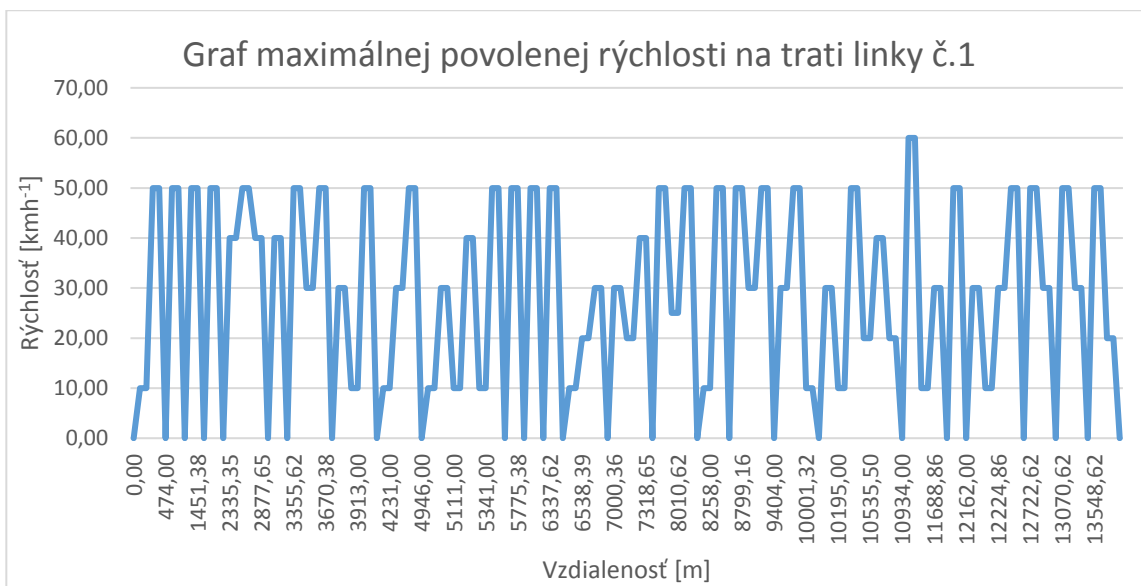
Graf 8 - Výškový profil trate linky č.7 (k dátumu 16.6.2016)



Graf 9 - Výškový profil trate linky č. 13 (k dátumu 16.6.2016)

Linka číslo 1, ktorá poslúži na interpretáciu a simuláciu v mnou riešenej prípadovej štúdii, premáva cez Prahu 6,7,8 a 3 medzi západnou a východnou časťou Prahy. Počas svojej cesty električka prejde celkom 13 963m a zastaví na 27 zastávkach. Najväčšie prevýšenie počas svojej jazdy prejde na úseku Palmovka-Krejčárek, kde prekoná celkovo 182 metrov výškových. V prvej časti svojej cesty z Petřín klesá prakticky až do vzdialostnej polohy 6976m na zastávku Vltavská. Potom pokračuje jazda miernymi výškovými osciláciami až na zastávku Palmovka odkiaľ začne stúpať najskôr pomerne prudko na zástavku Krejčárek a následne už iba mierne po zástavku Strážní, odkiaľ sa trať zase preklopí do klesania až do konečnej zastávky Spojovací.

Medzi ďalšie dôležité vstupné dáta je veľmi dôležité zdefinovať si maximálnu rýchlosť na trati. Pre túto kalkuláciu využijeme zrýchlenie $a_{\text{električky}} = 0.8\text{ms}^{-2}$, ktoré som získal ako reálnu hodnotu z riadiaceho počítača daného typu električky. Nejedná sa o maximálnu hodnotu zrýchlenia, nakoľko tento druh jazdy nie je ani ekonomicky či technicky výhodný a pre cestujúcich veľmi nekomfortný. Maximálne zrýchlenie sa môže pohybovať až do hodnoty $a_{\text{max}} = 1.5\text{ms}^{-2}$, avšak toto zrýchlenie nie je pre jazdu veľmi typické a preto sme sa rozhodli práve pre vyššie uvedenú hodnotu. Maximálna rýchlosť je stanovená na 50kmh^{-1} . Pre realistickejšie dáta by som v ďalšom pokračovaní svojej práce rád zahrnul aj detailnejší pohľad na trať a to brzdenie a rozbehy aj s križovaní v rámci koľajovej siete (kde rýchlosť prechodu týchto miest je stanovená na 10kmh^{-1}) rovnako ako najvyššie dovolenú rýchlosť medzi stanicami Krejčárek a Palmovka na 60kmh^{-1} ako je možné vidieť v grafe 10.



Graf 10 - Reálne traťové podmienky na električkovej trati linky č.1

3.2. Zvolené vozidlo na realizáciu modelu v Simulinku

3.2.1. Základné dáta o vozidle

V rámci stavby fyzikálneho modelu je nutné poznať detailné informácie o vozidle. Nakoľko je tieto informácie k súčasným moderným vozidlám nemožné dohľadať využil som vozidlo staršej stavby, avšak v posledných rokoch rekonštruované na moderný spôsob riadenia trakčnej energie cez polovodičovú techniku a to konkrétne električku KT8D5R.N2P. V mojom modeli počítam s vyššou hmotnosťou električky vzhľadom k faktu, že električka zasahuje do bežnej premávky s cestujúcimi a preto som jej hmotnosť navýšil o 4000kg (50 cestujúcich po 80kg)

Technické parametre:		
	Hodnota	Jednotka
Dĺžka	30.30	m
Váha	38500,00	kg (bez cestujúcich)
Maximálny počet pasažierov	56+171	sediaci + stojaci pasažieri
Maximálna rýchlosť	65,00	km/h
Celkový výkon	360,00	kW
Elektromotor	45kW	8 x TE 023, DC sériové budenie
Otáčky motora	1720	rpm
Moment	256,00	Nm
Hodinový prúd	175,00	A
Účinnosť motora	0.89	-
Prevodový pomer	1 : 7.36	-
Polomer kolies	0,35	m
Koeficient ložisiek	5,00	-
Koeficient suchého trenia	0.3	-
Koeficient odporu vzduchu	0.0031	-

Tabuľka 2 - Technické parametre použité pre Simulink model električky

3.2.2. Fyzikálny model električky a použité rovnice

Pre modelovanie celkového chovania vozidla na trati je okrem informácii o trati a vozidle samotnom nutné poznať aj sily, ktoré na toto vozidlo pôsobia, či už vozidlo stúpa, klesá, ide po rovine. Všetky tieto sily môžeme zhrnúť do rovnice, kde konkrétne členy danej rovnice sú objasnené nižšie:

$$\sum_{i=1}^i F_{celková} = 0 \quad [2]$$

kde $F_{celková}$ nám interpretuje súčet všetkých mech. síl pôsobiacich na vozidlo

$$F_{inerciálna} + F_x + F_{suché_trenie} + F_{aerodynamický_odpor} - F_{mot} + F_{brzda} = 0 \quad [3]$$

Člen $F_{inerciálna}$ reprezentuje zotrvačné sily, ktoré sú de facto interpretáciou 1. Newtonovho zákona, ktorý hovorí, že teleso zotrúva v rovnomernom priamočiariom pohybe do chvíle, pokiaľ sa silové pomery nezmenia. Tento zákon platí iba v prípade, že zrýchlenie je nenulové, čo v praxi znamená, že tento člen môžeme v prípade jazdy konštantou rýchlosťou zanedbať.

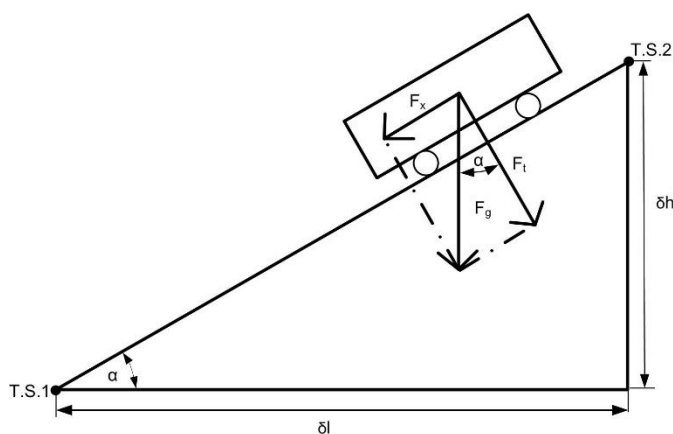
$$F_{inerciálna} = m\ddot{s} \text{ (kde } m \text{ – hmotnosť, } \ddot{s} \text{ – zrýchlenie)} \quad [4]$$

Okrem výšky je pre fyzikálny model električky dôležité poznať aj zmenu uhla α , ktorý mi značí uhol zvierajúci gravitačná sila F_g a sila F_x , ktorú získame ortogonálnym priemetom gravitačnej sily do roviny električky idúcej z alebo do kopca.

Jednoducho povedané uhol α nám hovorí do ako veľkého stúpania električka ide a z tejto informácie viem vypočítať koľko energie električka potrebuje na dosiahnutie požadovanej rýchlosti. Pričom silu F_x počítame pomocou rovnice:

$$F_x = F_g \sin \alpha \quad [5]$$

Tento člen zároveň interpretuje silu, ktorá brzdí električku pri jazde do kopca a urýchľuje električku pri jazde z kopca. Pre lepšie pochopenie situácie je k dispozícii Obrázok 6.



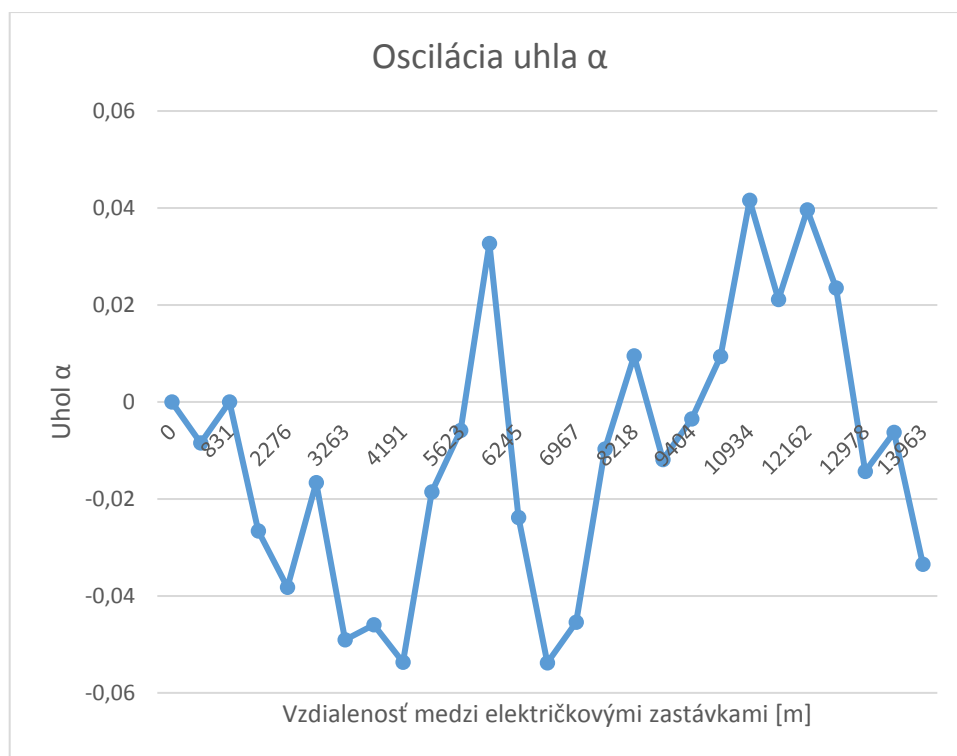
Obrázok 6 - Interpretácia síl a uhla α pri jazde do kopca

Sila F_x závisí od uhla α , čo znamená, že táto sila sa bude meniť vždy pokiaľ sa zmenia sklonové pomery trate. Preto pre simuláciu potrebujeme poznať údaje o uhle α v každom okamihu a jeho zmenách v celej dĺžke trate. Túto hodnotu som veľmi jednoducho vypočítal v tabuľkovom editore pomocou vzorca:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\delta h}{\delta l}\right) \quad [6]$$

kde: δh – zmena výšky v úseku, δl – zmena vzdialenosti v úseku

Osciláciu uhla vypočítanú na základe každej hodnoty uhla α je možné vidieť v grafe 11, pre každý úsek trate.



Graf 11 - Oscilácie uhla α medzi električkovými zastávkami linky č.1

Suché trenie, reprezentované členom $F_{suché_trenie}$ je druh trenia, ktoré závisí na interakcii električky a koľaje. Ako som uviedol v rovniach 7 až 9 nižšie, kde čísla reprezentujú čísla veľmi blízke reálnej električky ^[17] vyzískané z modelu ruskej električky KTM5, ktorá je jazdnými vlastnosťami veľmi podobná nášmu modelu. Okrem konštánt suchého trenia (*konštanty a, b*) závisí výsledná hodnota aj na váhe, ktorú reprezentuje hmotnosť prázdnej električky M_t a pridanej hmotnosti M_p cestujúcich. Pre túto kalkuláciu použijeme hodnoty 50 cestujúcich s priemernou hmotnosťou 50 kg. Premenná g interpretuje gravitačné zrýchlenie.

$$F_{suché_trenie} = F_{Co} * sgn(v) \quad [7]$$

$$F_{Co} = a + b * v + b * v^2 \quad [8]$$

$$F_{Co} = 5 * mg + 0.0031 * mg * v^2 \quad [9]$$

Po úprave základnej rovnice [9] môžeme zapísať výslednú rovnicu pre suché trenie električky.

$$F_{suché_trenie} = 5.0 * 0.0031 * (M_t + M_p) * g \quad [10]$$

Pri jazde električky je nutné uvažovať aj odpor vzduchu a preto je nutné ho zahrnúť do rovníc 11 a 12. Je vidieť, že tento člen, $F_{aerodynamický_odpor}$, je závislý na druhej mocnine rýchlosti a teda so zvyšujúcou sa rýchlosťou rastie tento odpor kvadraticky. Rovnica obsahuje navyše konštantu μ_2 reprezentujúcu závislosť váhy konštánt, ktoré sú rozdielne v závislosti na tvare prednej

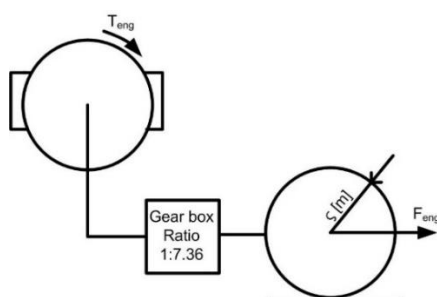
a zadnej časti električky. Rovnako ako v prípade suchého trenia uvažujeme váhu električky v prázdnom stave spolu s váhou 50 pasažierov s priemernou hmotnosťou 50kg na pasažiera.

$$F_{aerodynamický_odpor} = \mu_2 * |v| * v \quad [11]$$

$$\mu_2 = 0.0031 * 0.001 * (M_t + M_p) * g * 3.6^2 \quad [12]$$

Konštantu μ_2 reprezentuje teda konkrétne zloženie konštánt (v tomto prípade zložené z konštánt $a = 0.0031$ a $b = 0.001$), pričom oba koeficienty sú prevzaté z vozidla typu KTM5 ruskej produkcie, ktoré je tvarom a teda aj odporovo dosť podobné vozidlu KT8D5R.N2P. Do rovnice síl je nutné ešte dodať silu motora F_{mot} ako silu, ktorá pôsobí proti silám ostatným. Pre vlastnú kalkuláciu použijeme krútiaci moment motora T_{eng} , polomer kolesa ζ a účinnosť motora η .

$$F_{mot} = \frac{T_{eng}}{\zeta * \eta} \quad [13]$$



Obrázok 7 - Schéma prenosu elektrického točivého momentu na koleso (autor: Daniel Sihlovec)

Použitie brzdy, implementované do modelu iba pri využívaní mechanického brzdovania je v zmysle trenia mechanickej brzdy počas brzdovania, čo môžeme opísať rovnicami 14 a 15:

$$F_p = (F_{trenie} + F_x) + F_{brzda} \quad [14]$$

$$0 = (F_{trenie} + F_x) + F_{brzda} \xrightarrow{potom} F_{brzda} > -(F_x + F_{trenie}) \quad [15]$$

Čo znamená, že sila potrebná na zastavenie musí byť väčšia než ortogonálna projekcia gravitačnej sily na plochu po ktorej ide električka povýšenej o treciu silu. Táto sila je využívaná najmä pri veľmi nízkej rýchlosti, kedy je sila motora tak malá, že nemá význam rekuperovať.

3.3. Kalkulácia dát pre projektovanie hybridného systému

V prvej časti mojich kalkulácií využívam závislosť uhla α na vzdialenosti a profile trate, čo bolo spomenuté v časti 4.1. a 4.2.2.2. Následne som nasimuloval 27 zastávok. Jedná sa však len o hrubé dáta, ktoré je jednoduchšie aproximovať do konkrétnej funkcie. Rovnako som postupoval aj pri aproximácii oscilácie uhla α . Urobil som tak preto, lebo zdefinovať funkciu, ktorú zavolám pri konkrétnom požiadavku je jednoduchšie, než opakovane volať tabuľkové dáta.

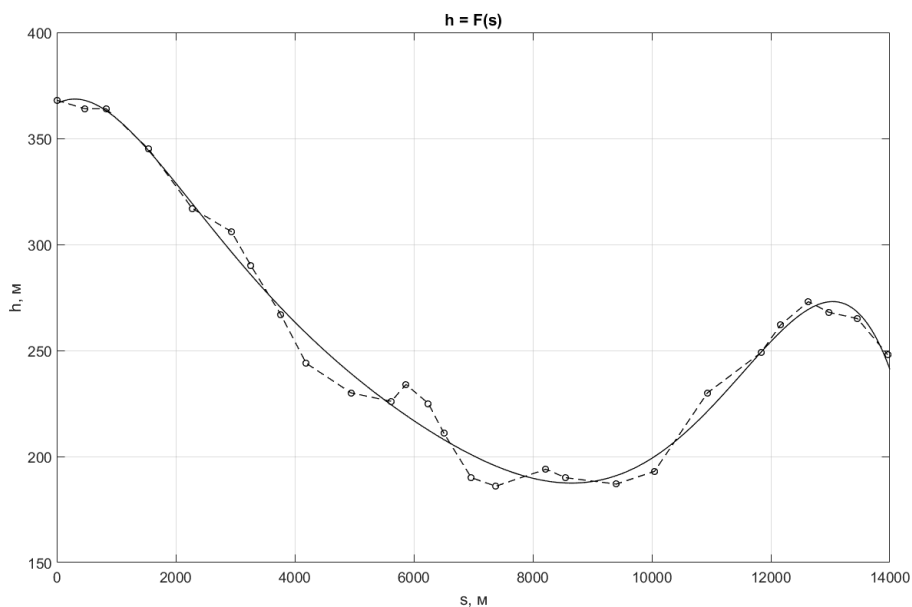
Príslušná aproximácia trate do funkcie $H(s)$:

$$H(s) = -1.9339e-21*s^6 + 7.4649e-17*s^5 - 1.1123e-12*s^4 + \dots + 8.2586e-09*s^3 - 2.993e-05*s^2 + 0.01593*s + 366.26$$

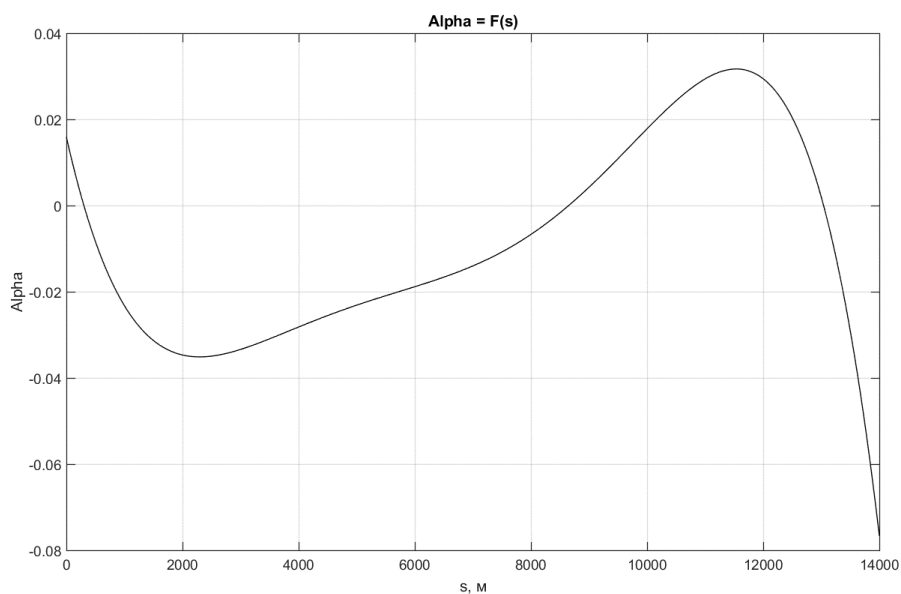
Aproximácia uhla α do funkcie $\text{Alpha}(s)$:

$$\text{Alpha}(s) = -1.16034e-20*s^5 + 3.73245e-16*s^4 - 4.4492e-12*s^3 + \dots \\ 2.47758e-8*s^2 - 0.5986e-4*s + 0.1593e-1$$

Aproximácie funkcií je teda interpretovaná aj v grafickom prevedení ako môžeme vidieť v grafoch 13 a 14. Použil som polynomicnú aproximáciu šiesteho radu pre aproximovanie závislosti vzdialenosti na výške a polynóm piateho radu pre aproximáciu oscilácie uhla v závislosti na vzdialenosti.

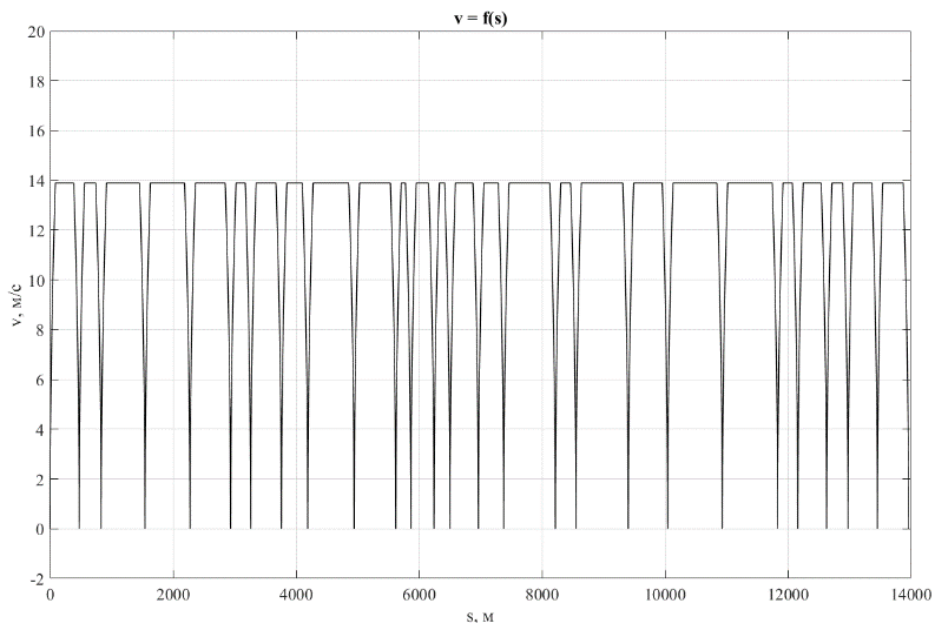


Graf 12 - Aproximácia výškového profilu trate do funkcie $H(s)$



Graf 13 - Aproximácia oscilácie uhla do funkcie $\text{Alpha}(s)$

Pre potreby simulácie trasy linky č.1 je dôležité ju definovať. Tzn. že trasu dlhú 14 kilometrov rozdelím na 27 úsekov s určitými vzdialenosťami zastávok. Nadefinoval som si 4 módy funkcie električky. Jedná sa o rozbeh, jazdu, brzdu a státie na zastávke. Zrýchlenie, resp. spomalenie je definované na úroveň $a=0.8 \text{ ms}^{-2}$. Každý z daných medzi-zastávkových úsekov je rozdelený na 1000 častí pre interpretáciu časovej derivácie.



Graf 14 - Rýchlosť električky medzi nadefinovanými úskemi

V ďalšom kroku som si vykalkuloval charakteristiky sily vzhľadom na vzdialenosť. Rovnice 16 a 17, ktoré uvádzam nižšie, som použil pre každý jeden krok časovej derivácie (n).

- Rozbeh a brzda:

$$F_{1+3}(n) = F_{inerciálna}(n) + F_x(n) + F_{suché_trenie}(n) + F_{aerodynamický_odpor}(n) \quad [16]$$

- Jazda konštantnou rýchlosťou:

$$F_2(n) = F_x(n) + F_{suché_trenie}(n) + F_{aerodynamický_odpor}(n) \quad [17]$$

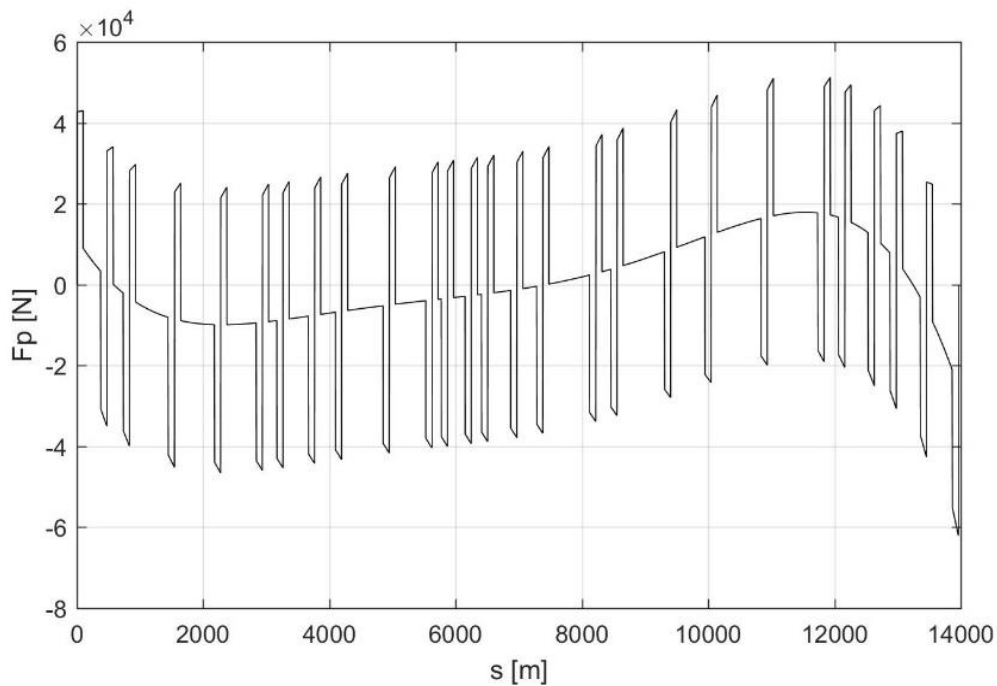
kde: F_{1+3} – sila potrebná na rozbeh električky + sila na jej brzdenie
 F_2 – Sila potrebná na jazdu konštantnou rýchlosťou

Jediný rozdiel medzi týmito dvoma rovnicami je absencia zotrvačnej sily pri jazde konštantnou rýchlosťou, čo je spôsobené tým, že zotrvačná sila je závislá na zrýchlení, ktoré je v momente jazdy konštantnou rýchlosťou nulové. V grafe 16 je charakteristika sily na celej dráhe linky č.1. Hodnoty, ktoré sa nachádzajú nad funkciou uhla α sú hodnoty sily, ktorá je nutná na rozbeh, hodnoty pod touto krivkou sú hodnoty nutné na zabrzdzenie.

Rovnice 16 a 17 sú však zadané len pre jeden úsek medzi dvomi zastávkami a preto pokiaľ chceme vypočítať sily pre celý úsek je nutné využiť vzorec:

$$\sum_{i=1}^n 2 * F_{(1+3)_x} + F_{2_x} \quad [18]$$

kde: x – vyjadruje vždy sily pre x – tý úsek trate

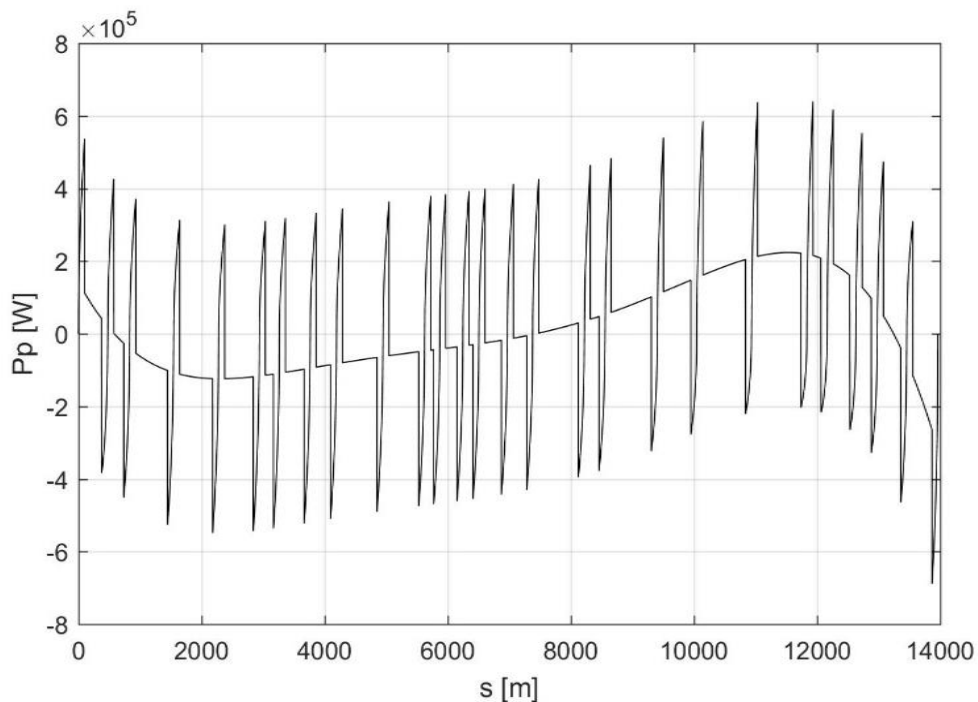


Graf 15 - Funkcia sily závislá od vzdialenosti počítaná medzi zastávkami

Predposledný krok je kalkulácia výkonu medzi jednotlivými zastávkami trate linky č.1. Po vypočítaní sily využitej na jazdu je každá časť násobená rýchlosťou v danom úseku podľa rovnice 19.

$$P_{\text{časť}}(n) = F_{\text{časť}}(n) * V(n) \quad [19]$$

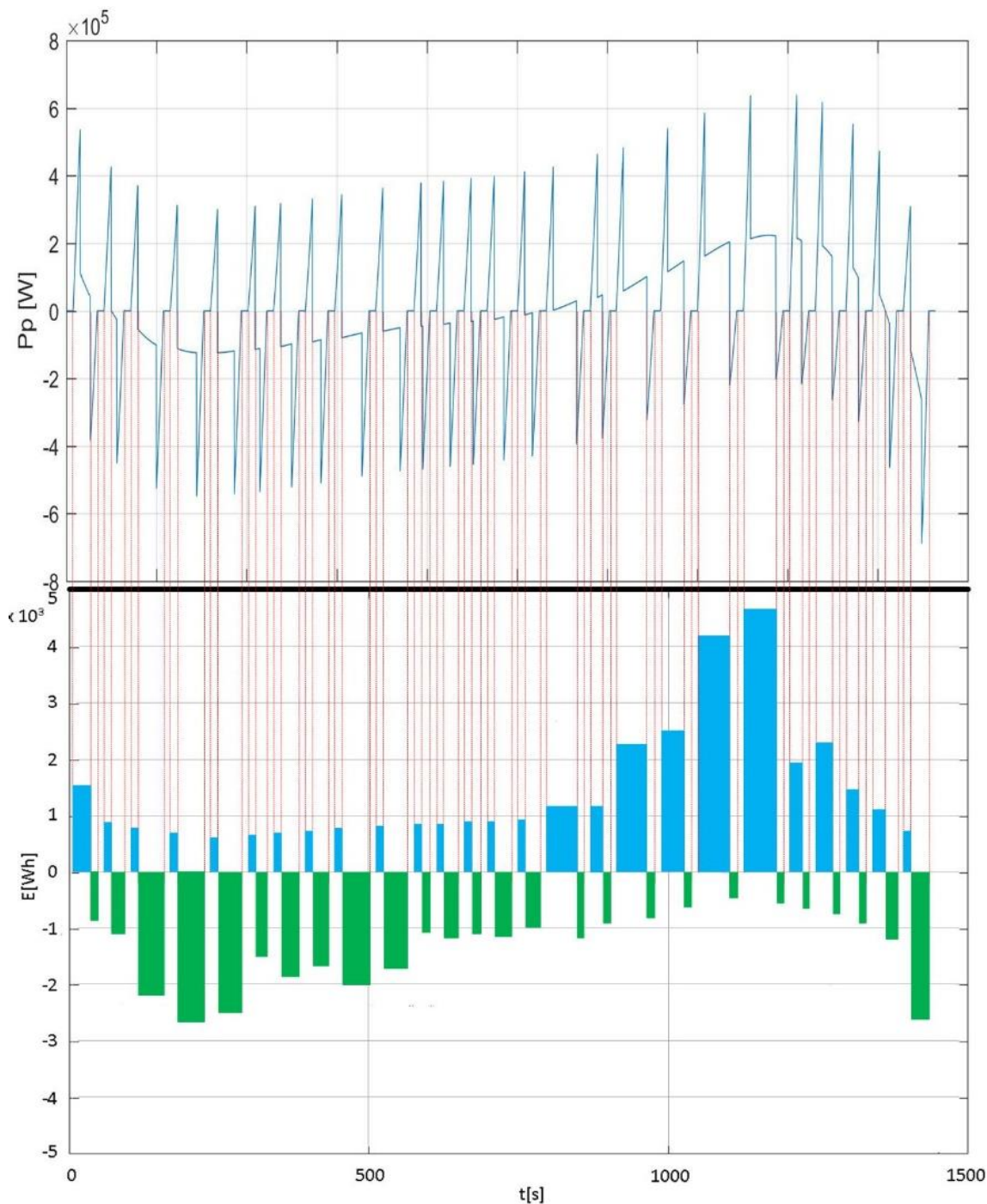
Všetky kalkulácie sú následne podané graficky v charakteristike v grafe 17. Interpretácia dát je veľmi podobná grafu 16, kde dáta nad krivkou uhla α sú informácie o výkone potrebnom na rozbeh, a dáta pod krivkou nám podávajú informáciu o brzdných výkonoch.



Graf 16 - Výkon počítaný medzi zastávkami

Pre správne naprojektovanie vhodného hybridného systému je nutné poznať energie, ktoré tečú v rámci systému na danej linke. Jedná sa teda o výsledné hodnoty, ktoré som potreboval z modelu dostať. Model je vytvorený tak aby dokázal oddeliť od seba energie, ktoré sú nutné na rozbeh a energie, ktoré môžeme do hybridného zariadenia ukladať počas regeneračného brzdenia. Energiu na n-tom úseku ($E_{\check{c}ast}(n)$), ktorú využijeme/vieme uložiť medzi n-tou a n+1 zastávkou som vypočítal ako potrebný výkon na n-tom úseku $P_{\check{c}ast}(n)$ v čase $t(n)$, za ktorý električka n-tý úsek prejde podľa vzorca 20.

$$E_{\check{c}ast}(n) = P_{\check{c}ast}(n) * t(n) \quad [20]$$



Graf 17 - Projekcia výkonu v čase do energie (kde: bledomodrá - znázornenie využitej energie, zelená - energia voľná k uloženiu)

Pre ďalšie využitie dát pri projektovaní systému je vhodné využiť dáta z grafov 16 a 17 uvedených vyššie súvisiace s energiami v medzi-zastávkových úsekoch.

3.4. Projektovanie hybridného systému

V predchádzajúcej časti bolo dokázané výpočtami, že počas prevádzky električky sú produkované v elektromotore energie, ktoré je možné uskladniť a využiť ich pre ďalšiu jazdu. Preto som sa rozhodol vybrať si konkrétny spôsob, akým bude táto energia ukladaná. Vybral som si možnosť ukladať energiu do Li-ion bateriek, do superkapacitorov, či do zariadenia obsahujúceho obidve technológie. Podľa výpočtov bude zrejmé, ktorý z týchto systémov má najlepšie parametre a je vhodný pre prevádzku.

3.4.1. Kalkulácia energetickej hustoty akumulácie energie

3.4.1.1. Varianta s počítaním najvyššej uloženej energie na trati

Informácie z predošlých kalkulácií nám dávajú informácie o energiách a to konkrétne aké energie je nutné v jednotlivých častiach trate využiť pre jazdu a aké energie môžeme uskladniť. V tabuľke nižšie je znázornený energetický management pre konkrétne úseky tratí v dvoch možných mierach a to jednak v Jouloch (J) a jednak vo watt hodinách (Wh). Platí pritom, že:

$$1 J = 0.000277778 Wh \quad [21]$$

Prvou z variant je naprojektovať systém na najvyššiu nameranú energiu vôbec a teda využiť vždy celú energiu. (Čo samozrejme v praxi možné úplne nie je). V tabuľke 4 je uvedená maximálna možná uskladniteľná energia ktorá je približne 1,99787 kWh. Nevýhodou však je, že systém môže byť na ostatných tratiach neefektívny a je teda nutné ho naprojektovať všeobecnejšie.

3.4.1.2. Variant založený na využití postupne uloženej energie na báze dopytu energie

Tento variant je síce špecifickejší a komplikovanejší na výpočet avšak ekonomicky výhodnejší a praktickejší. Konkrétny systém akumulácie je zvolený a jeho veľkosť získaná kalkuláciami, kde uvažujem, že nie všetka energia uložená v systéme môže byť spotrebovaná v jeden moment a je teda pravdepodobné, že nejaká energia v tomto systéme ostane. Na základe tejto úvahy používame rovnicu, ktorá je založená na jednoduchých krokoch.

Po prvom zrýchlení medzi zastávkami systém ukladá energiu počas brzdenia. Túto energiu minie na druhý rozbeh. Avšak energia nutná na rozbeh je nižšia ako energia uložená v hybridnom systéme, čo v praxi znamená, že časť energie ostane naakumulovanej. Počas ďalšieho brzdenia naakumuluje ďalšiu energiu ktorá sa pričíta k tej predošlej, takže rezerva pre ďalší rozbeh je väčšia. V prípade, že sa rozbíhame do kopca a minieme celú naakumulovanú energiu, uložíme ju opäť do systému pri ďalšom brzdení. Tento systém je výhodný aj pri častejších rozbehoch a brzdení, čo je v prípade mestskej koľajovej dopravy práve kvôli kríženiu s cestnou dopravou a chodcami veľmi bežný jav.

3.4.2. Projektovanie superkapacitorového akumuláčného systému

Pre účely tejto prípadovej štúdie som si vybral superkapacity od firmy MAXWELL. V prípade výpočtu konkrétneho množstva je viacero dôležitejších faktorov medzi ktoré patria: energetická hustota, počet cyklov za životnosť, nominálne napätie, rozmery a tak isto veľmi dôležitým parametrom je hmotnosť.

Pre splnenie tejto podmienky je najlepšie nájsť stredú cestu ako kompromis medzi váhou, rozmermi, energiou a počtom zapojených superkapacitorov v systéme. Pre vhodné technické ale aj ekonomické

riešenie je dôležité poznať presné množstvo energie, na ktoré bude systém naprojektovaný. Vybral som si preto riešenie na báze postupného využitia energie podľa potreby.

V prvom kroku bolo nutné vypočítať si akú kapacitu musí systém mať a koľko energie sme teda schopní do neho naakumulovať.

$$E_{zost} = E_{uložená} - E_{použitá} \text{ potom } E_{zost_1} = E_{zost} + E_{uložená_1} - E_{použitá_1} \dots \quad [22]$$

Pre tento druh aplikácie som vypočítal celkovú uložitelnú energiu $E_{SE}=4181.654 \text{ Wh}$. Vzhľadom na znalosť konkrétneho množstva energie vieme následne vypočítať množstvo superkapacitorov, ktoré potrebujeme na jej uloženie. Zvolený typ superkapacitora je od firmy MAXWELL BCAP3000. Vzhľadom na znalosť nominálneho napätia U , kapacity C a prúdu I vieme vypočítať energiu jedného superkapacitora. Pri znalosti tohto údaju je výpočet potrebného množstva jednoduchým delením celkovej energie E_{SE} a energie jedného superkapacitora E_0 .

$$E_0 = \frac{1}{2}CU^2 \quad [23]$$

Zo základných údajov je jasné, že nominálne napätie je $U = 2.7 \text{ V}$ a kapacita $C = 3000 \text{ F}$ (Faradov). Vypočítaná hodnota energie jedného superkapacitora je teda $E_0 = 3.037 \text{ Wh}$. Po následnom prepočte je celkový počet nutných superkapacitorov 1393. Pre jednoduchší výpočet môžeme počítať s číslami medzi 1393-1400.



Graf 18 - Energia uložená v superkapacitoroch pri využití systému postupného ukladania

Pre správnu funkciu systému musí však byť navrhnutá ešte presná schéma spojenia jednotlivých kusov do obvodu a to v počtoch do série, či paralelne. V praxi to znamená, že čím viac kusov je sériovo zapojených, na tým vyššie napätie môže byť systém projektovaný. V prípade paralelných zapojení zase zvyšujeme prúdovú priepustnosť systému (maximálny prúd pre mnou vybraný BCAP3000 je $I_{BCAP3000_Max} = 147 \text{ A}$). Pre ideálne zapojenie je teda nutné nájsť medzi týmito dvoma veličinami kompromis pomocou podmienok znázornených v rovniciach.

$$100 \text{ V} < U_{work} < 300 \text{ V} ; I_{BCAP3000_Max} = 147 \text{ A} \quad [24]$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \text{ potom pre DC systém } U_c = \frac{1}{C} I_c t \quad [25]$$

$$E = \frac{1}{2} C U_c^2 \quad [26]$$

kde U_c – napätie kondenzátora, C – kapacita a I_c – prúd kondenzátora

Kalkulácia presného počtu musí byť kombinatorická a teda nájsť najvhodnejšie pomery zapojenia paralelne a sériovo, tak aby príslušná kombinácia vyhovovala všetkým parametrom. S použitím tabuľkového editora Excel som vypočítal možnosti pre 10 hodnôt sériových zapojení pre všetky možnosti paralelných kombinácií (13-37 paralelných vetiev). Moje výpočty začali od 13 paralelných vetiev z dôvodu, že 12 vetiev s maximálnym množstvom 111 superkapacitorov (299.7V) dáva len 1332 kusov, čo nie je pre mnou navrhovaný hybridný systém dostačujúce.

Tieto čísla sú založené na hodnotách maximálneho napätia a výkonu, ktoré nie je možné dosiahnuť ak hodnota prúdu bude vyššia, či nižšia než je vhodná. Využitím podmienok na zapojenie môžem zapojiť množstvo od 38 sériových článkov, ktoré spolu dávajú napätie 102.6V do 111 superkapacitorov, ktorých napätie je 299.7 V.

Toto rozpätie paralelných a sériových spojení som teda kombinatoricky vyhodnotil, tak aby sa počet hýbal v rozmedzí 1393-1400 kus v systéme a ako najvhodnejšie riešenie, čo sa týka výkonu mi vyšlo zapojenie 50ks superkapacitorov v sériovom zapojení s $U_{SC_total} = 135 V$ v 28 vetvách pri $I_{SC_total} = 4116 A$. Celkový počet je teda 1400 ks a celkový výkon P_{total_DC} je 555.56 kW pri použití vzorca 27.

$$P_{total_DC} = U_{SC_total} * I_{SC_total} \quad [27]$$

Samotné výsledky sú však len 80% hodnoty, keďže počítam so všetkými možnými stratami nielen počas ukladania ale aj počas starnutia systému. Čo je výhodné aj pre ďalšie technické a ekonomické výpočty.

3.4.3. Projektovanie systému využívajúceho batérie

Ďalšou z možností hybridného systému pre ukladanie energie je využitie batérii. Všetky plusy a mínusy batérii boli spomenuté vyššie. Základné kalkúcie sú rovnaké ako v prípade superkapacitorov a preto ich nebudem z dôvodu triviálnosti opakovať. Mám k dispozícii totálne množstvo energie $E = 4230,036 Wh$. Pre projektovanie som si zvolil batérie LFP300 od výrobcu Liotech, Novosibirsk, Ruská federácia. Menovitá energia batérie $E_{bat} = 320 Wh$ (dáta získané výpočtom z kapacity batérie 200Ah násobenej nominálnym napätím 3.2V). Po delení týchto dvoch hodnôt je výsledkom potreba 14tich kusov batérii.

Napätie zapojenia všetkých batérii do série je 44.8V, ktoré je samostatne akceptovateľné avšak prúd je len 200A čo je pre trakčné projekty nepostačujúce. Pre tento prípad je jediným riešením doplnenie ďalších 5tich paralelných vetiev, čo by tvorilo celkový prúd zhruba 1200A avšak pri tomto riešení je problémová váha 84ks batérii.

3.4.4. Projektovanie hybridného systému využívajúceho batérie a superkapacity

Pri tejto projekčnej možnosti je určite veľkou výhodou spojenie vlastností výkonovej hustoty v prípade superkapacitorov a energetickej hustoty v prípade Li-ion akumulátorových batérii.

Pre tento prípad som sa rozhodol systém zjednodušiť a rozdeliť na štvrtiny ako množstvo Li-ion batérii, tak aj superkapacitorov a štvrtinu každej technológie vložiť do spoločného hybridného systému.

Parametre Li-ion akumulátorov a superkapacitorov ostávajú nezmenené ako v predošlých prípadoch, čo znamená 3000 F superkapacity a 200Ah elektrochemické akumulátory. Počítaním tejto varianty som sa pokúšal nájsť riešenie ktoré by bolo optimálne jednak pre energetickú hustotu no aj pre výkonovú hustotu a spĺňa podmienky hmotnostné a v ďalších kapitolách riešené výpočtom samozrejme aj ekonomické.

Vo výpočtoch som sa dopracoval k hodnote 350tich superkapacitorov a 21 kusov elektrochemických akumulátorov. Akumulátory sú rozdelené do 3 paralelných vetiev vždy so 7mimi kusmi zapojenými do série. V prípade superkapacitorov sa jedná o 25 kusov sériovo zapojených so 14timi vetvami. Celková energetická hustota je približne 15.33kWh a celková výkonová hustota je 152kW, čo nám v podstate dáva systém vhodný ako do množstva ukladanej energie a nabíjacieho času.

3.4.5 Porovnanie navrhnutých riešení napájania

V záujme porovnania navrhnutých možností riešenia AZE pomocou technických parametrov s ich výhodami a nevýhodami je k dispozícii tabuľka 5, z ktorej je veľmi jednoduché spoznať výsledok. Je nutné vybrať jeden druh zapojenia, ktoré je najvýhodnejšie.

	SUPERKAPACITORY	LI-ION	HYBRIDNÝ SYSTÉM	
PARALELNÉ VETVY	28	6	Superkap 16	Li-ion 8
ZAPOJENIE V SÉRII	50	14	Superkap 25	Li-ion 7
PRÚD – PARALELNÉ VETVY	4116 A	1200 A	Superkap 2352 A	Li-ion 1600 A
NAPÄTIE – ZAPOJENIE V SÉRII	135 V	44,8 V	Superkap 67,5 A	Li-ion 22,4 A
CELKOVÝ VÝKON	555,56 kW	53,76 kW	194,6 kW	
CELKOVÁ ENERGIA	7,59 kWh	53,76 kWh	37,738 kWh	
CELKOVÁ HMOTNOSŤ	714 kg	798 kg	736 kg	

Tabuľka 3 - Parametre jednotlivých druhov riešení AZE

V prípade, že porovnáваме výkonovú hustotu, vybrali by sme si systém založený na superkapacitoroch. Hodnota výkonovej hustoty však opisuje: „ Ako veľký tok energie môže pri nabíjaní/vybíjaní tiecť z/do superkapacitora“. Táto hodnota teda popisuje a ovplyvňuje ako rýchlo sa dokáže zariadenie nabiť, či vydať zo seba energiu. Pre aplikácie v doprave je však dôležitá aj samotná kapacita zariadenia, ktorá je podľa Tabuľky 5 pri superkapacitoroch nízka. V elektrochemických Li-ion akumulátoroch je táto kapacita 7 krát vyššia, z čoho vyplýva, že vieme napájať zariadenie z Li-ionu 7 krát dlhšie ako zo superkapacitorov. Pre nájdenie optimálnej varianty nepomôže ani hľadisko váhy, keďže rozdiel medzi variantom so superkapacitormi a variantom s batériami je len niečo okolo 80 kg.

Hybridný systém založený na oboch technológiách teda obsahuje obe prednosti oboch variant a to ako vysokú energetickú hustotu tak aj vysokú výkonovú hustotu. Pre porovnanie hodnôt v Tabuľke 5 sa jedná síce približne o 2,5 krát menší výkon ako v prípade superkapacitorov avšak je približne 4 krát lepší než pri variante s batériami. Tak isto energia, ktorú môžeme uložiť je kompromisom medzi týmito dvoma technológiami.

Pre použitie v trakčnej aplikácii a to konkrétne v električke typu KT8D5R.N2P je táto energia E dostačujúca nakoľko potrebujeme uložiť približne $4.2kWh$ a teda náš variant je kompromisom medzi veľkosťou úložného priestoru a rýchlosťou nabitia.

$$E = P * t$$

[28]

Použitím vzorca 28, môžeme pri získaných údajoch z Tabuľky 5 vyzískať aj časy plného nabitia systému. Toto číslo je približne 77 sekúnd, čo je číslo približne použiteľné pre mestskú hromadnú dopravu nakoľko sa jedná o dlhšie jazdy medzi zastávkami a častú jazdu z kopca.

Posledný nemenej dôležitý a nezanedbateľný faktor je váha. V prípade mnou zvoleného riešenia je rozloženie váhy medzi súčasti nasledovné. Váha jedného kusu superkapacitora je približne 0.5kg a váha jedného kusu batérie je 9.5kg. Podľa tabuľky uvedenej vyššie je aj váha systému približným kompromisom medzi dvoma samostatnými metódami. Váha systému totiž ovplyvňuje aj množstvo energie nutnej na rozbeh, trenie a samozrejme usporiadanie môže ovplyvniť aj aerodynamický odpor, rozdiel však je koľko energie a ako rýchlo vieme do systému uložiť.

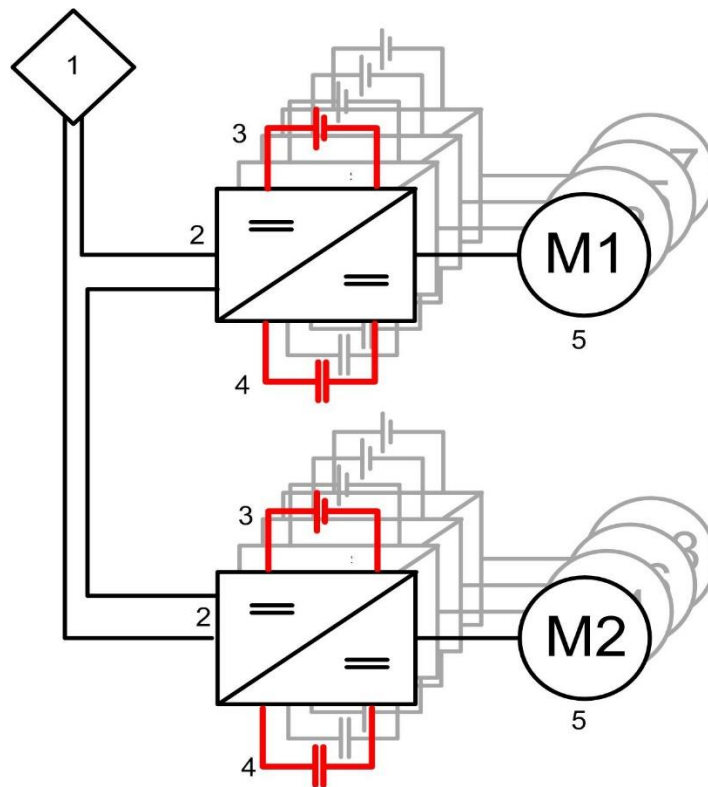
4. Simulink model

4.1. Všeobecný model využívajúci AZE v schéme

Napriek tomu, že v predchádzajúcej časti, by bolo pre využitie v električkovej doprave dostačujúce využitie superkapacitorov, pre účely prípadovej štúdie som sa rozhodol využiť hybridného systému na báze batérii a superkapacitorov z dôvodu univerzálnosti využitia vozidla.

Bolo nutné vyriešiť spôsob zásobovania tohto systému energiou a vzhľadom k faktu, že toto vozidlo má 4 podvozky, pričom každý podvozok má 2 DC motory, čo v prepočte znamená celkový brzdný prúd približne 800A (ak počítame aj straty v kabeláži a meniči) Maximálny prúd elektromotora TE.023A je 250A. Automaticky teda rastie prúd idúci do hybridného systému 8 krát na hodnotu 2000A a táto hodnota musí byť započítaná v našich kalkuláciách.

Môžeme využiť faktu, že každý podvozok má svoj vlastný menič, čo sú vlastne dva sériovo zapojené meniče v sérii, pre každý motor jeden. Vzhľadom na usporiadanie tohto systému je omnoho jednoduchšie vybaviť každý menič svojim hybridným systémom obsahujúcim akumulátor a superkapacitory podľa schémy na obrázku 8.



Obrázok 8 - Zapojenie hybridného systému do trakčného systému električky (kde: 1-zberač prúdu, 2-menič, 3-Batérie, 4-superkapacitory, 5- motory spojené v podvozkoch)

Prepojenie medzi oboma meničmi na podvozku je sériové z dôvodu fyzickej neexistencie dvoch individuálnych meničov. Je to spôsobené požiadavkou na nižšie napätia. Ak je napájacie napätie meniča 600V, tak to v praxi znamená, že na každom motore by sa malo objaviť napätie 300V.

Ak počítam so systémom 8 elektromotorov, najvhodnejším variantom implementácie bude vhodný počet batérii a superkapacitorov, ktorý je možné deliť ôsmimi. Podľa odseku 4.4.5 použijem 16 vetiev superkapacitorov a 8 batériových vetiev, pričom na každom motore sú dve vetvy superkapacitorov a jedna vetva batérii.

Systém projektovaný pre jednotlivé motory a nie ako celok má viac výhod. Sú nimi napríklad ekonomické úspory na káblach, jednoduchšia diagnostika porúch či jednoduchší servis. Ako jednou z nevýhod je komplikované riadenie systému ako trakčného celku.

4.2. Mechanický model električky

Jadrom mechanického modelu električky je externý systém "TRAM" s kalkuláciami všetkých síl. Tento externý systém má vstup uhla α , spätno-väzobnú rýchlosť v , trakčnú silu F_p a brzdnú silu F_t .

V základe používam v podstate tú istú rovnicu ako som uvádzal na začiatku v rovnici 3 zároveň ju však ďalej upravujem.

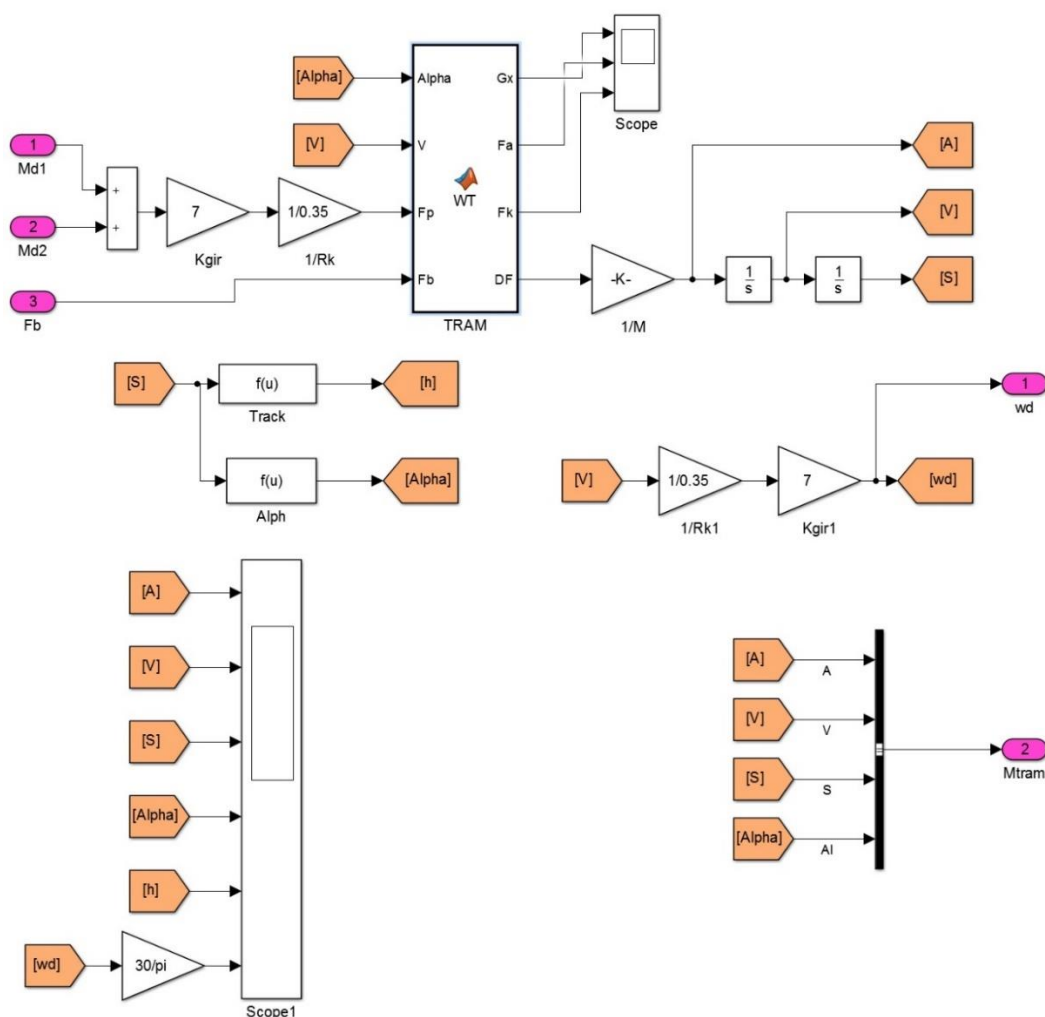
$$m\ddot{s} + F_x \sin \alpha + F_{suché_trenie} + F_{aerodynamický_odpor} - F_{mot} + F_{brzda} = 0 \quad [29]$$

$$\ddot{s} = \frac{1}{m} F_{mot} - F_x \sin \alpha - F_{suché_trenie} - F_{aerodynamický_odpor} + F_{brzda} \quad [30]$$

Pre jednoduchšiu interpretáciu v Simulinku som nahradil zrýchlenie a premennou \dot{s} . Táto premenná je výstupom z boxu „TRAM“ po násobení výstupu konštantou $\frac{1}{m}$. Aktuálne hodnoty rýchlosti a vzdialenosti sú výstupom po použití integrátora na premennú \dot{s} a po integrovaní $\frac{1}{s}$ získam hodnotu \dot{s} , ktorá reprezentuje rýchlosť. Po opätovnej integrácii získam premennú s , ktorá mi prezentuje vzdialenosť. Ako spätnú väzbu používam vzdialenosť, výšku a uhol alfa, ktoré mi poskytujú pre model aktuálnu polohu na výpočet potrebnej sily, na pôsobenie proti silám pôsobiacim proti pohybu.

Výstup systému obsahuje 4 hodnoty, ktoré sú podstatné pre elektrický model a to je zrýchlenie, rýchlosť, vzdialenosť a uhol. Zabalil som tieto 4 premenné do jedného zdroja a spojil ich priamo s elektrickou časťou. Druhý výstup je uhol ω , ktorý môžeme popísať ako uhlovú rýchlosť.

Mechanický model, na obrázku nižšie slúži ako základ pre použitie elektrického modelu a teda presne popisuje aké sily v daný moment pôsobia na vozidlo a teda koľko energie potrebujeme dodať aby sme tieto sily prekonali.



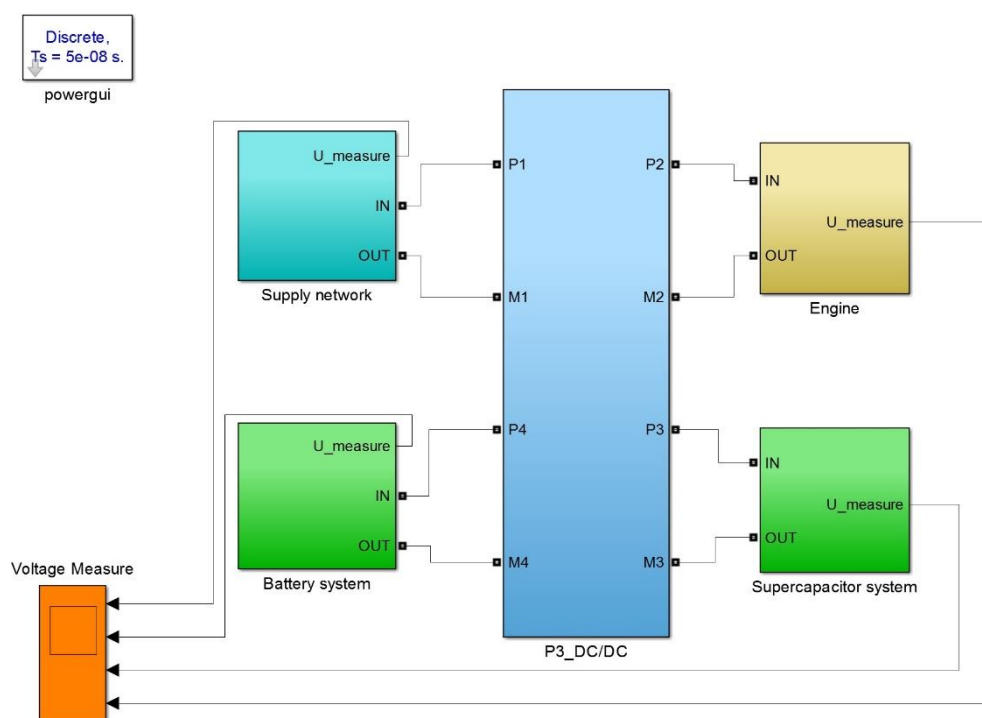
Obrázok 9 - Mechanický model električky s projekciou síl

4.3. Elektrický model električky

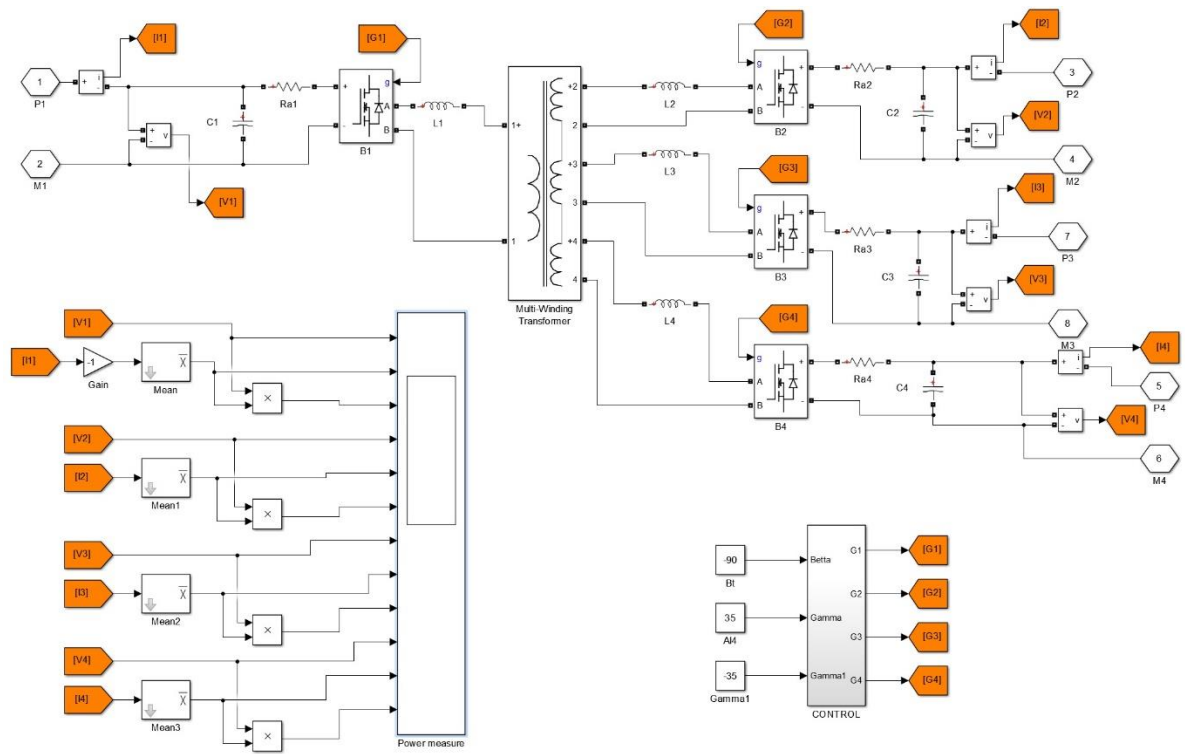
Elektrický model obsahuje základné časti ako trakčnú sieť, elektromotory (v tomto prípade je v modeli zahrnutý iba jeden), superkapacitný akumulčný systém a batériový akumulčný systém. Tieto časti sú reprezentované jednotlivými boxami na obrázku 10.

Všetky súčasti systému spolupracujú skrze štvor-vinuťový transformátor, ktorý je jadrom celého systému a skrze ktorý, prebiehajú všetky energetické zmeny a zároveň slúži ako bezpečné galvanické oddelenie vzájomne prepojených systémov. Každá z týchto štyroch častí je riadená zmenou uhlu radiaceho signálu. Vzhľadom k tomu, všetka energia, ktorá tečie medzi trakčnou sieťou a motorom, alebo motorom a hybridným systémom, ktorý obsahuje radiacu jednotku na báze hodinového signálu a niekoľko ďalších logických operácií. Na začiatku spájame hodinový signál s hodnotou aktuálneho radiaceho uhla v radiánoch. Následne použijeme funkciu „Reminder after division“ a vytvoríme 1-D interpoláciu dát. Následne je nutné odčítať hodnotu 1 a porovnávať či sa hodnota odchyľuje od nuly v pluse alebo v mínuse. Výstupný signál je multiplexovaný do „multikábla“ a odoslaný do radiacej jednotky.

Detailnejšiu schému pripojení P3_DC/DC meniča môžeme vidieť na obrázku 11. Po zásahu riadenia sú všetky aktuálne hodnoty prúdu a napätia merané, pričom je z nich následne počítaný výkon, ktorý môže byť zobrazený na grafe.



Obrázok 10 - Model elektrického systému električky



Obrázok 11 - Model P3_DC/DC meniča

Na rozdiel od mechanického modelu je ten elektrický elementárnejší. Je to z dôvodu, že na výpočet potrebných dát a ich overenie postačí model, ktorý je nasimulovaný avšak vo svojej budúcej praxi by som sa rád zamerlal na jeho rozšírenie do reálnejších kontúr včítane automatického riadenia, keďže súčasný model vyžaduje manuálne zadanie uhlov riadenia.

5. Ekonomická časť

5.1 Úvod do ekonomickej časti

V rámci celkovej analýzy prípadovej štúdie ľubovoľného projektu je nutné okrem technickej časti uviesť aj celkové zhodnotenie projektu, ktoré sa nezaobíde bez ekonomickej analýzy, ktorá dá projektu jasné stanovisko a teda, či je projekt pre daný subjekt ekonomicky výhodný alebo nie. Preto aj v rámci tejto práce bude na riadkoch nižšie bude uvedená kalkulácia efektivity daného projektu z pohľadu porovnania vstupnej investície s jej návratnosťou pri rešpektovaní časovej ceny peňazí. Táto analýza sa snaží verne priblížiť reálnym súčasným podmienkam (t.j. koniec roka 2016, začiatok roka 2017) z hľadiska cien elektrickej energie a cien ostatných vstupov, potrebných na výpočet tejto prestavby. Ekonomickú analýzu je možné v ďalšej nadväznosti tejto práce ďalej upravovať pre konkrétne typy vozidiel, nakoľko každé vozidlo má inú trakčnú charakteristiku, iné výkonové požiadavky a teda aj inú schopnosť ukladať a využívať energiu v rámci hybridného systému.

5.1.1. Základné kritéria pre porovnanie ekonomickej efektívnosti projektu

Ekonomickú stránku projektu môžem porovnávať z viacerých uhlov pohľadu a využiť pri tom viaceré kritériá.

Medzi základné patrí prostá návratnosť. Ide o koncept, ktorý uvažuje investíciu v nultom roku a následné toky hotovosti (ďalej len cash-flow) pre roky ďalšie, ktoré sú k tejto investícii prečítané a jednoducho povedané znižujú stratu, pokiaľ sa nedostanem na nulu. V tomto momente moja práca končí, pretože cash-flow, ktorý mi projekt priniesol pokrýva moju investíciu a mňa teda zaujíma len konkrétny čas, kedy sa tak stane. Nevýhodou tohto kritéria je, že neuvažujem ďalšie hotovostné toky po dobe návratnosti a že neuvažujem časovú cenu peňazí a teda tvrdím, že: „Sto korún investovaných dnes, je rovnakých ako sto korún investovaných zajtra, o rok, či o 10 rokov.“ Podľa rovnice 31, ktorá platí však zároveň hľadáme také „T“ – čiže čas, v ktorom sa mi investované prostriedky vrátia takú aby bola čo najmenšia.

$$\sum_{t=1}^T CF_t - INV = 0 \quad [31]$$

kde CF_t – tok hotovosti v roku t , INV – investícia

Sofistikovanejším kritériom možného porovnania výhodnosti, či nevýhodnosti investície je čistá súčasná hodnota (ďalej len NPV). Ide o koncept, kde všetky hotovostné toky počas všetkých rokov upravujem o časovú hodnotu ceny ušlej príležitosti, v tomto prípade nazvanej diskont. Po tejto úprave môžem tieto hotovostné toky sčítať a následne ich znížiť o investíciu, čím docielim finálnej hodnoty mojej investície v prítomnom čase. V prípade, že je záporná, táto investícia sa mi neoplatí, v prípade, že je kladná, mal by som túto investíciu realizovať.

$$NPV = -INV + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad [32]$$

kde: CF_t – tok hotovosti v roku t , r – diskotná sadzba, INV – investícia

Pričom vzhľadom na rovnicu musí platiť, že sa v rámci investičného projektu snažíme aby NPV bolo čo najväčšie a zároveň v rámci každoročných CF aby náklady projektu boli čo najmenšie.

S kritériom čistej súčasnej hodnoty úzko súvisí aj kritérium vnútorného výnosového percenta. Jedná sa o variáciu využitia kritéria NPV, kedy položíme kritérium čistej súčasnej hodnoty rovno nule, a hľadáme pre určité časové obdobie výnosové percento. Pokiaľ je toto výnosové percento nižšie, než diskont inej možnosti investovať naše finančné prostriedky, je to dôvodom na zamietnutie investície, prípadne nad hodnotením iným kritériom.

$$0 = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} \quad [33]$$

5.1.2. Konkrétne zvolené kritérium a jeho špecifikácia pre konkrétne podmienky

V rámci tejto práce som sa rozhodol využiť kritérium čistej súčasnej hodnoty, pretože má podľa môjho názoru najširšie použitie a zároveň mu rozumie každý finančný manažér. Nejde však o klasické využitie čistej súčasnej hodnoty, kde je cash-flow tvorený bežnými prevádzkovými operáciami združenými do výnosov a nákladov. V tomto prípade je tok hotovosti tvorený iba rozdielom odoberanej energie zo siete a energie zo siete, pričom v tomto prípade časť energie pochádza z úložky v hybridnom systéme ako druhotná energia využívaná pri rozjazde súpravy.

Ekonomická analýza bude hodnotená pre výslednú technickú variantu s konceptom hybridného ukladania energie so spojením technológií batérií a superkapacitorov, nakoľko z technického pohľadu mi vyšiel tento variant ako kompromis medzi dvoma hlavnými parametrami a to energetickou hustotou a teda ako rýchlo sa systém dokáže nabiť a energetickou kapacitou, ktorú môže daný akumulčný systém pojať a taktiež z dôvodu, že tento koncept je pomerne málo rozvinutý a rozhodol som sa ho v rámci svojej diplomovej práce rozvinúť do roviny polemiky, či má zmysel vôbec touto cestou pokračovať vo vývoji akumulčných systémov pre dopravu.

Práca bude doplnená aj o citlivostné analýzy zmeny najzásadnejších parametrov. V tomto prípade sa jedná o cenu najdrahších komponentov, diskont či cenu kupovanej elektrickej energie.

5.2. Distribúcia a dodávky elektrickej energie

Vzhľadom k tomu, že Dopravní podnik hl. města Prahy, a.s. nedisponuje vlastnými výrobnými prostriedkami na výrobu elektrickej energie je v súčasnosti tento druh energie dodávaný do elektrickej siete cez distribútora PRE distribuce a.s. Dodávka je zjednávaná vždy na určité časové obdobie, pričom v určitých intervaloch, kratších ako samotné obdobie na ktoré je zjednaná dodávka, prebieha rekalkulácia a korekcia vstupných dát. Systém funguje na princípe predikcie budúcich odberov a podľa toho zákazník platí za rezervovaný príkon.

5.3. Konštrukcia ceny pre VN odberateľa

Konkrétna cena, ktorú by bolo možné použiť pre presné výpočty ekonomickej efektívnosti mnou navrhovaného riešenia je predmetom obchodného tajomstva, avšak, pre účely tejto práce je dostatočné túto cenu približne odhadnúť na základe odborných konzultácií jednak s technickým riaditeľom dopravného podniku pánom Ing. Janom Šurovským, Ph.D a jednak s členom managementu Power and gas tradingu Ing. Antonínom Neubergom. A následne k tejto odhadnutej cene spraviť citlivostnú analýzu na jej zmeny, podľa čoho sa bude možné na technicko-ekonomickú štúdiu využiteľnosti návrhu použitia hybridného riešenia ukladania energie v elektrickej pozrieť o niečo komplexnejšie a vyvodíť určité výsledky a predikcie do budúcnosti.

Pre aproximáciu môjho cenového odhadu k realite som využil aktuálne cenové rozhodnutie z Energetického regulačného úradu Českej republiky (ďalej len ERÚ). V dobe písania tejto práce sa jedná o Cenové rozhodnutie Energetického regulačného úradu č.7/2016 zo dňa 25. novembra 2016, ktorým sa stanovujú regulované ceny za súvisiace služby v elektroenergetike a ďalšie regulované ceny.

Aby bolo možné urobiť kalkuláciu efektívnosti je do ceny za MWh energie nutné uvažovať:

- **Cenu za rezervovanú kapacitu**
V tomto prípade uvažujem podľa daného cenového rozhodnutia čiastku 176 037 Kč/MW v rámci jedného mesiaca, čo je čiastka zodpovedajúca rezervovanej kapacite 1 MW v distribučnej sieti PRE distribuce a.s. na napäťovej úrovni VN pre jednorôčné rezervácie. V prípade mesačných rezervácií kapacít je táto čiastka 194 043Kč/MW. Samozrejme platí, že táto zjednaná rezervovaná kapacita nesmie byť prekročená a v prípade jej prekročenia sa účtujú penále vo výške 791Kč/KWh
- **Cenu za použitie siete prenosovej sústavy**
Jedná sa o cenu, ktorú účtuje prevádzkovateľ prenosovej sústavy, v prípade ČR je to ČEPS prevádzkovateľovi distribučnej sústavy, resp. následne zákazníkovi, pričom sa jedná o cenu 25.52 Kč/MWh
- **Cena za systémové služby**
Je pevná cena, ktorú účtuje prevádzkovateľ prenosovej sústavy účastníkom trhu, ktorí sú pripojení k prenosovej sústave Českej republiky. Cena je stanovená vždy na odobraný MWh energie v konkrétnej čiastke 93.94 Kč/MWh
- **Cena za činnosť operátora trhu (ďalej len OTE)**
Obsahuje tri zložky a to: cenu za činnosť organizovania trhu v hodnote 1.28 Kč/MWh, cena za činnosť v súvislosti s OZE 0.89Kč a cena za služby zúčtovania odchýlok 1.62 Kč/odberné miesto
- **Cena za podporu obnoviteľných zdrojov energie (ďalej len OZE)**
Pre odberné miesta na území Českej republiky pripojené k prenosovej či distribučnej sieti na napäťovej hladine VVN a VN je použitá cena 495Kč/MW/mesiac odvíjajúca sa od zjednaného príkonu

Horeuvedené ceny sú teda ceny, ktoré sú každoročne regulované a je možné ich dohľadať. Inak je to však s cenou za spotrebovanú energiu, ktorú som zámerne vo výpise cien neuvádzal, nakoľko sa v tomto prípade bude jednáť o odhad. Vzhľadom na fakt, že práve táto časť ceny, je predmetom jednaní medzi DPP a.s. a PRE distribuce a.s. a je teda obchodným tajomstvom som na základe približného odhadu a odborných komentárov od mojich konzultantov nastavil čiastku za 1MWh spotrebovanej energie na hodnotu 1000 Kč/MWh.

Podľa verejne dostupných informácií je ročná spotreba divízie električky 131 GWh a celková platba za energiu 526 mil. českých korún ročne (pri celkovej spotrebe 370GWh). Pri jednoduchom využití trojčlenky je možné sa dostať približne na hodnotu 1400 Kč/MWh, čo môžeme brať ako jednu zo spodných hraníc pri výpočte citlivostných analýz. Z hodnôt, ktoré sú stanovené ERÚ z rozhodnutia 7/2016 by sa dala vypočítať hodnota približne okolo 1800 Kč/MWh energie, ktorú som sa pre svoj výpočet rozhodol použiť ako jednotnú cenu za energiu a z nej následne vypočítať možné ekonomické dopady inštalácie hybridného zariadenia do električky.

5.4. Investičné náklady

Investičné náklady sú uvažované ako konkrétny údaj, ktorý pozostáva cien jednotlivých komponent systému, úpravy meničov pohonu a úpravy sumy týchto údajov o montážne a dopravné náklady, pričom tieto náklady činia, podľa konzultácie cca 2-3% z celkovej ceny. Výsledný suma je teda tvorená podľa Tabuľky 4. Investičné náklady sú počítané ako hrubý odhad pri cenách, ktoré boli aktuálne v roku 2016 pre jednotlivé základné komponenty ako sú superkapacity, či batérie. V prípade položky úpravy meniča sa jedná cenu približnú, získanú na základe odbornej konzultácie, pričom táto bola stanovená od približnej ceny trakčného meniča cca 1 milión českých korún, upravením na zhruba 20% sumy, nakoľko v prípade tejto rekonštrukcie by namiesto kúpy nového meniča postačila úprava toho súčasného (v prípade tohto tvrdenia sa opieram tak isto o odbornú konzultáciu s viacerými odborníkmi na trakčné meniče nielen z ČR či Ruskej federácie). Náklady na montáž a dopravu počítam fixne ako 2% z ceny celkového zariadenia, podľa rád mojich konzultantov, nakoľko obdobné údaje je takmer nemožné zistiť z dôvodu neexistencie konkrétneho zadania montážnych prác, objednávky dopravy jednotlivých komponentov atď, rovnako ako nie je stanovené ani to, či sa bude zariadenie montovať interne v rámci Dopravného podniku a bude sa teda jednať o vnútro podnikovú fakturáciu alebo bude zariadenie montované externe.

Názov položky	Počet ks	Cena za kus [CZK]	Celková cena [CZK]
Superkapacity BCAP3000	1400	120	168000
Batérie LT-LFP300	84	9035,511	758982,92
Úprava Meniča	4	200 000	800000
Cena za komponenty + úpravy	1	1 726 983	1726982,9
Náklady na montáž a dopravu (2%)	1	2% z ceny komponentov	1761522,6

Tabuľka 4 - Skladba investičných nákladov

5.5. Kalkulácia prevádzkového Cash-flow a stanovenie diskontu

V rámci prevádzkového cash-flow som narazil na jeden základný problém a tým bola rozdielna doba životnosti rôznych technických celkov daného zariadenia. V prípade batérii sa životnosť pohybuje okolo 10 rokov, v prípade ostatných komponentov som ju stanovil na základe odborných konzultácií na 20 rokov. Na ošetrovanie problémov čistej súčasnej hodnoty pre všetky komponenty som využil teórie, že pri opakovaní investície sa ekonomické efekty opakujú taktiež a v desiatom roku som batérie nahradil novými, pričom pri tomto opakovaní sa výsledná životnosť zariadenia rovná dobe porovania využitej vo výpočte, ktorá je 20 rokov. Vzhľadom na fakt, že sú vybrané bezúdržbové batérie, nie sú uvažované nijaké dodatočné náklady pre prevádzku v rámci doby životnosti ako batérii tak aj zvyšku systému. Bežné prevádzkové ošetrovanie je nezávislé na existencii hybridného systému a vzhľadom na konzultáciu bežných údržbových praktík ju nezahrňam do výpočtu.

Prevádzkový cash flow je teda tvorený rozdielom finančného ekvivalentu využitej energie zo siete pri jazde bez hybridného systému a pri jazde s hybridným systémom. Vzhľadom na nastavenie mierneho úbytku kapacity a na nevyužívanie plnej kapacity systému pri jazde po konkrétnej trati je zahrnuté

znižovanie kapacity už do výpočtu konkrétnych energetických dát v technickej časti a nie je teda ďalej nutné tento úbytok na kapacite zariadenia premietnuť do znižovania hodnoty ročného cash-flow. Rovnako vzhľadom na zasadenie konkrétneho investičného návrhu do prostredia veľkej firmy je pre kalkuláciu cash-flow irelevantné počítať s daňovým zaťažením.

V prípade diskontu je na prvý pohľad situácia o niečo zložitejšia. Nakoľko sa jedná o prípadovú štúdiu zasadenú do mikroekonomického prostredia väčšej firmy, ktorej jediný akcionár je mesto Praha apropo štát, je takmer nemožné presne určiť diskont. Existuje však niekoľko možností ako je možné diskont odhadnúť tak, aby bolo možné na jeho základe obdržať pomerne relevantné výsledky ekonomickej analýzy. Medzi tie menej presné metódy môže patriť napríklad určenie diskontu, teda ceny ušlej príležitosti napríklad podľa porovnania aktuálnej miery zisku očisteného od dane voči celkovým aktívam spoločnosti. Táto metóda sa mi však javila pomerne nepresná, keďže na základe informácií z účtovnej uzávierky aj z médií je Dopravný podnik Praha firma, ktorej hospodárenie je pravidelne finančne podporované zo strany mesta Praha a takýto údaj teda nevytvára o skutočnej aktuálnej a hlavne relevantnej finančnej situácii vo firme. V prípade druhej možnosti stanoviť diskont podľa obdobných projektov som bohužiaľ opäť musel zaujať záporné stanovisko, nakoľko v prípade tejto varianty je komplikované určiť určitú mieru diskontu podobných projektov, nakoľko sa nejedná ani o čisto energetický projekt ani o projekt nejakej modernizácie či konkrétnej úpravy u ktorej vieme výsledky predpovedať s takmer určitou. Vybral som si teda možnosť diskont stanoviť podľa úrokovej miery, na ktorú si dopravný podnik Praha požičiaval a dlhodobo požičiava peniaze u bánk, či už sa jedná o peniaze na nové súpravy metra alebo nákup nových električiek. Obvyklé úroky z úverov Dopravného podniku Praha približne v rozmedzí 3,85%-5,5%, pričom marža navyše tvorí 1,35%. Môj diskont využívaný v primárnom výpočte som teda stanovil na úroveň 5%, pričom sa jedná len o odhad. Keďže však nedokážem stanoviť diskont projektu presne bude do ekonomickej analýzy zahrnutá aj citlivostná analýza v ktorej bude rozsah diskontu upravený ako smerom k nižším, tak i k vyšším hodnotám.

5.6. Výsledná ekonomická kalkulácia hodnoty projektu a zhodnotenie ekonomickej analýzy pri daných parametroch

Vzhľadom na to, že všetky údaje pre vypočítanie hodnoty mnou navrhovanej investície v súčasnosti za pomoci výpočtu čistej súčasnej hodnoty už mám k dispozícii, mohol som pokračiť k samotnému výpočtu. Jedná sa teda o diskontnú sadzbu 5%, ktorú som stanovil v kapitole 5.5 spolu s princípom výpočtu cash-flow. Pre prvých 9 rokov je hotovostný tok konštantný, pričom jeho výška sa rovná rozdielu hodnôt priemetu spotrebovanej elektrickej energie v ekonomickej hodnote, čiže usporenej energii, za použitia hybridného systému pozostávajúceho z superkapacitorov a batérii. Nakoľko životnosť trakčných batérii som stanovil pri aktívnom používaní na 10 rokov, je nutné v deviatom roku roku v výkaze cash-flow zahrnúť rovnako aj re-investíciu do nových batérii (pričom životnosť ostatných komponentov som vzhľadom na odborné rady môjho technického konzultanta navrhol na 20 rokov).

Bolo teda nutné stanoviť pre výpočet čistej súčasnej hodnoty varianty rovnakú dobu životnosti pre všetky komponenty. Toto som vyriešil na základe teórie, že ekonomické efekty opakovaných investícií sa opakujú a teda pri dobe porovnaní 20 rokov som využil možnosť reinvestície len do batérii, pričom doba porovnania mohla byť stanovená pre všetky komponenty už zhodne. Cenu batérii v desiatom roku, pri re-investícii do zariadenia, som ponechal pre zjednodušenie na úrovni súčasných cien batérii (okrem citlivostných analýz, kde s túto cenu upravujem pre potreby analýzy), nakoľko si myslím, že

nie je možné túto cenu s určitou predvídať na tak dlhé obdobie a rovnako ako existuje možnosť masového zlacnenia technológie, existuje aj možnosť, že technológia bude nahradená novou technológiou, ktorá bude drahšia avšak efektívnejšia.

Od desiateho roku je tok hotovosti pre jednotlivé roky opäť konštantný na úrovni rozdielu energií varianty bez využitia hybridného systému a s jeho využitím až do 20. roku života, kedy sa predpokladá koniec životnosti všetkých komponentov celého systému a výsledkom tejto analýzy je teda, či je systém schopný generovať čistú súčasnú hodnotu kladnú pre týchto dvadsať rokov a má teda zmysel uvažovať o jeho prípadnej celkovej obnove vo vozidle. Výška investície je rozobratá v kapitole 5.4.

Je však nutné uvažovať hodnotu hotovostného toku v roku komplexnejšie, nakoľko je cena elektrickej energie dvojzložková a teda je nutné oceniť aj úsporu na rezervovanom výkone. Keďže však nemám presný typický denný diagram k dispozícii uvažoval som množstvo rezervovaného výkonu ako maximálny možný vyvinuteľný výkon na všetkých trakčných motoroch ($P_{mot_max} = 8 * 45kW$) vynásobený koeficientom účasti tohto trakčného výkonu na maxime rezervovaného výkonu, ktorý som podľa odbornej konzultácie stanovil na $k_{TP} = 0.8$. Pričom uvažujem úsporu na výkone podľa obdobne koncipovaných projektov na úrovni $k_{uhs} = 40\%$. Jedná sa teda o využitie vzorca:

$$P_{ušetrený} = P_{mot_max} * k_{TP} * k_{uhs} \quad [34]$$

P_{mot_max} – maximálny dosiahnuteľný výkon na trakčných motoroch

k_{TP} – koeficient maxima trakčného výkonu na maxime odberu

k_{uhs} – koeficient úspory hybridného systému

Táto hodnota je následne vynásobená konkrétnou hodnotou v českých korunách pre 1 kW rezervovaného výkonu podľa cenového rozhodnutia ERÚ č.7/2016. Výsledná hodnota mi tvorí ročnú úsporu na rezervovanom výkone, ktorú je nutné pripočítať k hodnote cash-flow v danom roku.

Z týchto hodnôt mi pre spomínanú dobu porovnania pre zariadenie stanovenú na 20 rokov (pri rešpektovaní re-investície na obnovenie batérii v desiatom roku) vyšla čistá súčasná hodnota (viď. Priložený súbor programu Excel: Ekonomické výpočty.xlsx, záložka: NPV_závislosť cena energie, var1):

$$NPV_{20 rokov} = 1\,181\,384,35 \text{ CZK}$$

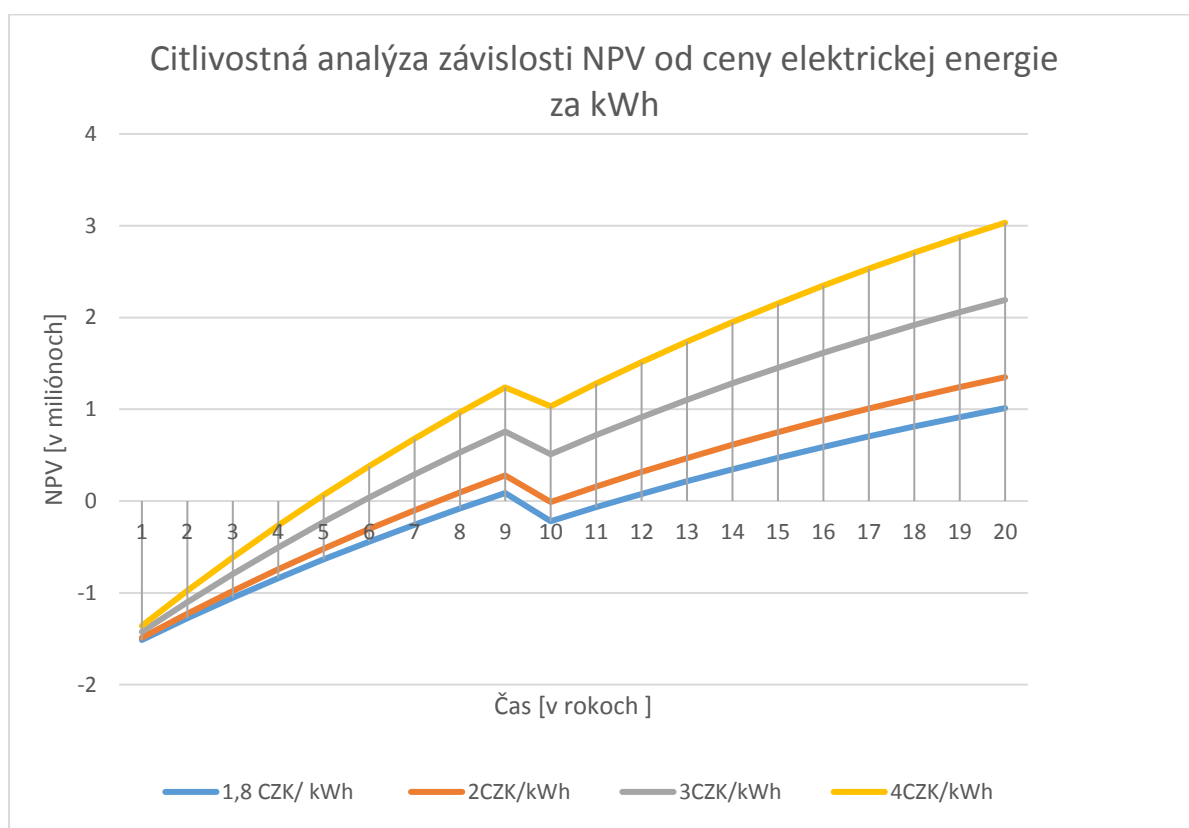
Záverom ekonomického hodnotenia pri tejto variante teda je, že sa pri súčasných parametroch, cenách energií a investičných nákladoch oplatí tento projekt realizovať, nakoľko čistá súčasná hodnota projektu, je pri súčasných parametroch vysoko v kladných číslach.

5.7. Konfigurácia parametrov ekonomického hodnotenia a citlivostné analýzy

Vzhľadom na fakt, že zariadenie dokáže produkovať stabilný hotovostný tok (znižovanie účinnosti zariadenia je zahrnuté v úrovni efektívnosti, už pri výpočte technickom a to pri stanovení miery využitia zariadenia, ktorá je stanovená od nultého roku na 80%, čím som si ošetril postupné znižovanie účinnosti a v podstate zastabilizoval hotovostný tok pre jednotlivé roky), ktorý z technického i ekonomického pohľadu dokáže šetriť prostriedky, je dané zariadenie výhodné realizovať už pri súčasných podmienkach. Keďže však ako ceny vstupov, tak i ceny energií nie sú konštantne definované a bolo by teda chybou uvažovať ich pre nekonečne dlhé obdobie konštantné, obsahuje práca v rámci ekonomickej analýzy aj časť, kde porovnávam efektívnosť projektu v prípade

zmeny cien nakupovanej elektrickej energie (podrobné výpočty v súbore Excel: Ekonomické výpočty, záložka NPV_závislosť cena energie) , ďalej variability diskontu a vo výsledku je uvedená aj dvojparametrická citlivostná analýza z pohľadu zmeny cien vstupov a zmeny cien nakupovanej elektrickej energie za jednu kWh.

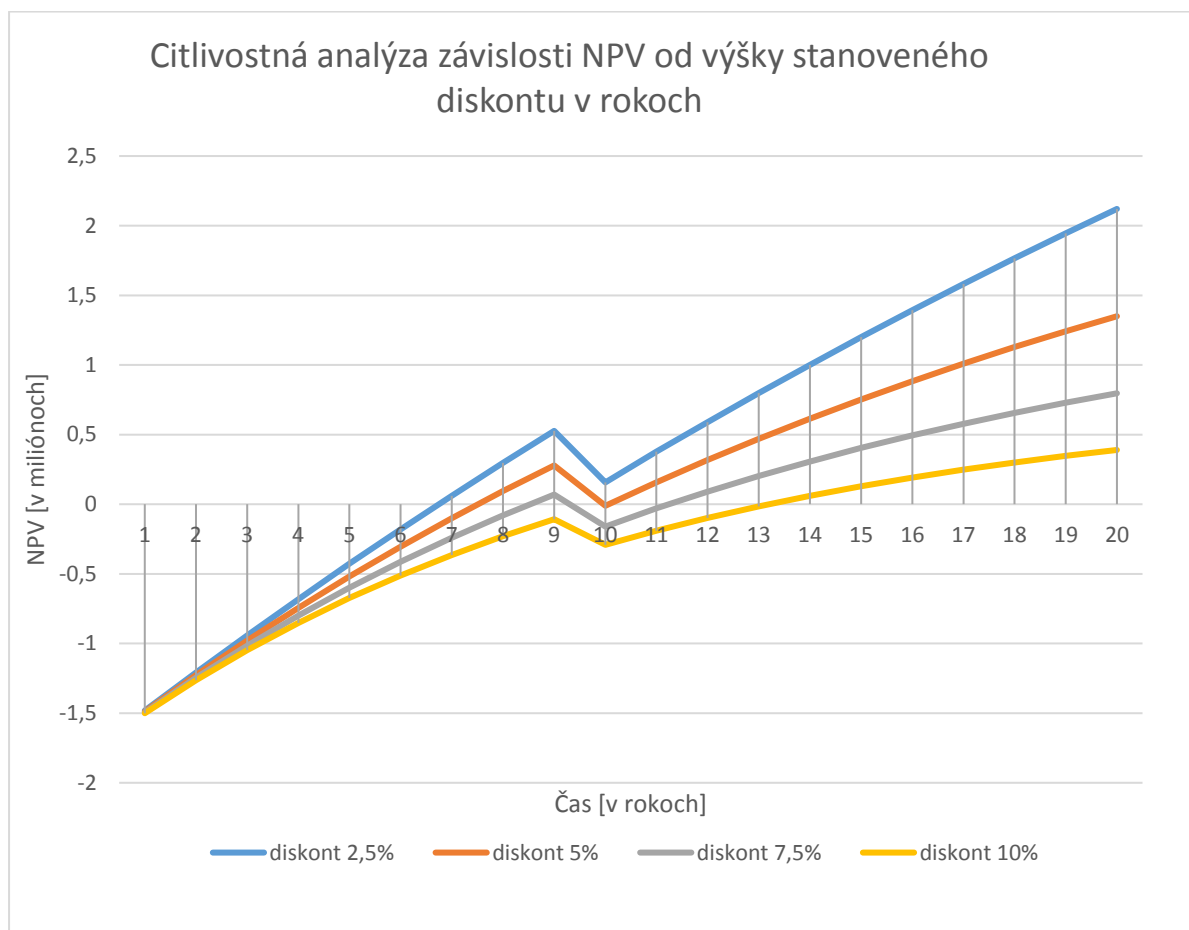
Ako prvá je v Grafe 19 citlivostná analýza zmeny cien nakupovanej elektrickej energie za kWh voči celkovému efektu odzrkadlenom vo výslednej čistej súčasnej hodnote. Nakoľko existuje mnoho externalít, ktoré priamo či nepriamo pôsobia na zmenu cien energií, bolo by riešenie možných pohybov a zmien ceny za kWh energie hodné ďalšej práce väčšieho rozsahu a preto spomeniem len niektoré zo základných. Z ekonomických to môžu byť napríklad cena uhlia na svetových trhoch, cena a množstvo emisných povoleniek, alebo zmena cien plynu. Z politických sa môže napríklad jednať o politickú stabilitu v zemi, alebo ekologická politika v krajine až po tie technické ako je napríklad rozloženie využitia zdrojov v sústave. Detailnejší pohľad na výpočet je možné získať v Excelovom súbore Ekonomické výpočty priloženom k tejto práci.



Graf 19 – Závislosť čistej súčasnej hodnoty od zmeny ceny elektrickej energie v jednotlivých rokoch

Z grafu 19 je dobre vidieť, že rozdiel v cene nakupovanej elektrickej energie je pomerne markantný už v 5 roku, kedy v ideálnej variante ceny 4Kč/KWh sa tento projekt dostáva do „zelených čísel“ na rozdiel od súčasnej varianty, ktorá sa trvale (vzhľadom na reinvestíciu do batérii) do plusových čísel dostáva až v dvanástom roku svojej prevádzky. V prípade tejto jednoparametrickej citlivostnej analýzy je možné z grafu vyčítať, že zariadenia je schopné ušetriť finančné prostriedky a byť skutočne efektívnym, v zmysle šetrenia prostriedkov včítane obnovy batéριοvej časti, už pri súčasnej cene elektrickej energie, pričom pri vyšších cenách za kWh elektrickej energie je tento rozdiel ešte väčší.

Nasledujúca citlivostná analýza je zameraná na zmenu cenu diskontu. Keďže ani investičné prostredie nie je stabilné, nemôžem si dovoliť tvrdiť, že pokiaľ si stanovím diskont dnes na úrovni 5% bude tento diskont správny, prípadne ako bude vyzeráť v rámci analýzy mnou navrhovaný projekt ak je stanovený diskont pre 20 rokov iný. Práve pre tento dôvod som sa rozhodol urobiť aj citlivostnú analýzu na zmenu diskontu, pričom v tejto citlivostnej analýze počítam ako s diskontom menším tak i väčším v rozsahu 0-10% vždy s krokom 2,5%. Výsledné hodnotenie je opäť grafické.

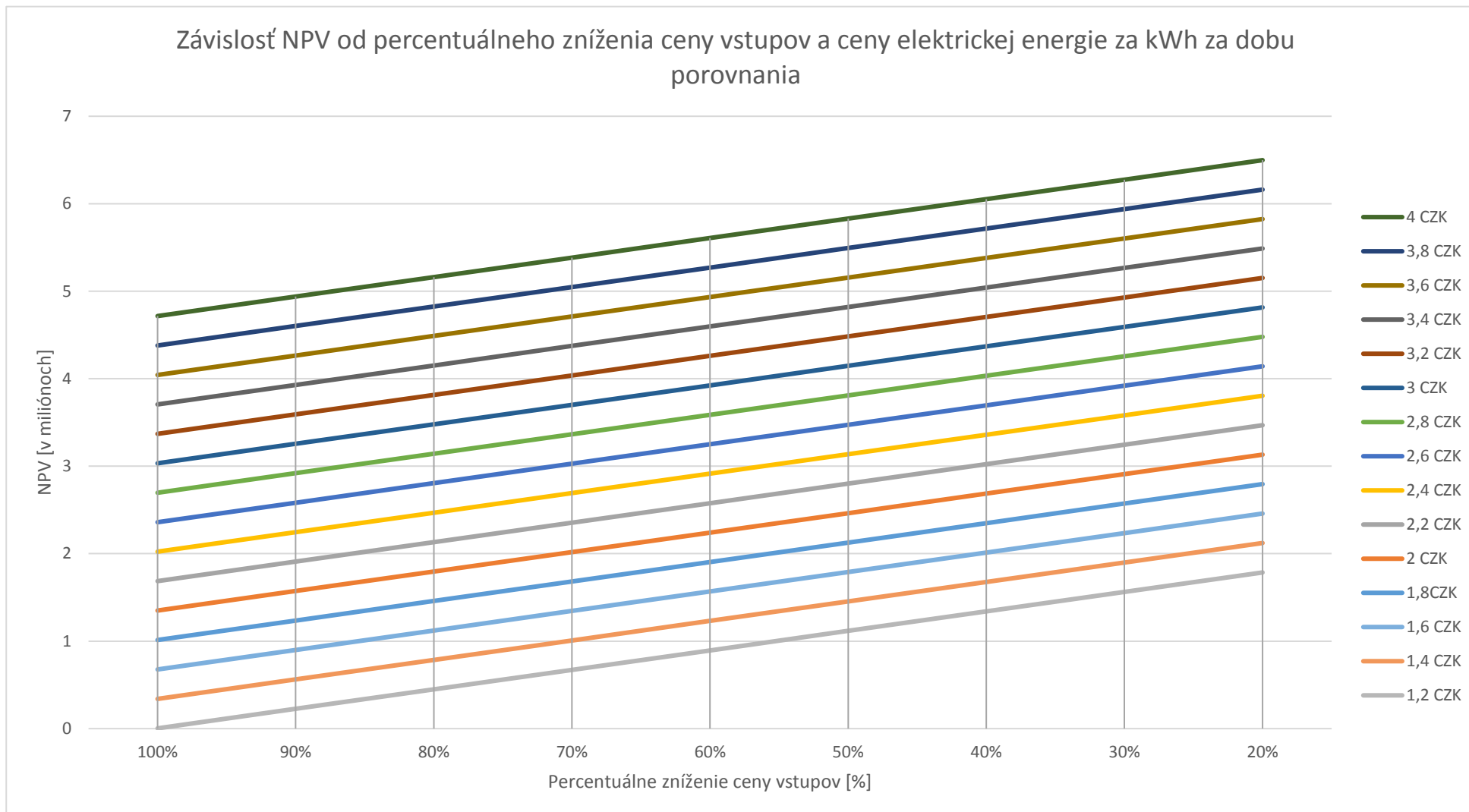


Graf 20 - Závislosť čistej súčasnej hodnoty od výšky diskontu v jednotlivých rokoch

Podľa grafického riešenia v grafe 20 je možné vidieť, že na rozdiel od prvej citlivostnej analýzy, ktorá bola zameraná na zmenu cien elektrickej energie nie je závislosť čistej súčasnej hodnoty v prvých rokoch tak veľká a rozdiel tak markantný. Zreteľnejší je rozdiel nastáva až cca od siedmeho roku, kedy sa hodnota investičného celku dostáva do zelených čísel pri diskonte 2,5%. Najhorší variant s diskontom 10% má tento moment, až približne v trinástom roku, avšak podľa analýzy je znateľné, že aj pri vyšších hodnotách diskontu je projekt v horizonte doby porovnania 20 rokov výhodný.

Bohužiaľ, ako už bolo vyššie spomenuté, nie je možné pre tento projekt stanoviť diskont, ktorý by bol natoľko presný aby poskytoval údaje pre 20 rokov dopredu a práve z tohto dôvodu bola vypracovaná aj citlivostná analýza na možné dopady na mnou navrhované investičné rozhodnutie v súčasnosti.

Závislosť NPV od percentuálneho zníženia ceny vstupov a ceny elektrickej energie za kWh za dobu porovnania



Graf 21 - Dvoj-parametrická citlivostná analýza zmeny cien vstupov a ceny nakupovanej el. energie voči NPV

Ako poslednú citlivostnú analýzu som sa rozhodol urobiť dvojparametrickú analýzu závislosti zmeny cien vstupov, teda investičných nákladov, so zmenou cien nákupu kWh elektrickej energie. Ako základ ostala doba porovnania stanovená na 20 rokov, výpočet hodnoty hotovostného toku zostal zachovaný spolu s reinvestíciou do batérovej časti v desiatom roku (pričom metodika výpočtu je založená na výpočte čistej súčasnej hodnoty pre danú cenu za kWh elektrickej energie, pričom vždy v desiatom roku odčítam hodnotu ceny batérii (uvažujem nákup v deviatom roku ale platbu až v roku desiatom) zníženú na percento zníženia celkových investičných nákladov, od ktorej je následne odčítaná vstupná investícia vždy v danej hodnote), pričom jednotlivé hodnoty hotovostného toku pre jednotlivé roky sú odvodené vzhľadom na cenu elektrickej energie za kWh, ktorá sa pohybuje od 1,2 CZK/kWh po 4 CZK/kWh vždy s krokom po 20 halierov. V tejto citlivostnej analýze teda počítam aj s variantom, že cena za elektrickú energiu ešte poklesne.

Táto dvojparametrická citlivostná analýza je skonštruovaná hlavne z dôvodu, že nie je možné na 20 rokov rozumne predikovať, ako sa budú vyvíjať náklady, či už investičné alebo náklady na elektrickú energiu. Z môjho pohľadu som vylúčil variantu, kde by investičné sanáklady na tento systém ešte navýšili, pretože z hľadiska vývoja ceny existuje skôr trend postupného znižovania, nakoľko podobné systémy sú čoraz populárnejšie. V prípade elektrickej energie, ako už bolo spomenuté vyššie, je veľmi nereálne, že by sa cena za elektrickú energiu držala počas 20 rokov na rovnakej úrovni, pričom túto ideu som zapracoval do zadania tejto dvojparametrickej citlivostnej analýzy ako možnosť posunu ceny elektrickej energie jednak nahor do vyšších čísel a zároveň nadol v prípade, že by cena ešte poklesla. Je teda možné, sa v prípade aktuálnej zmeny v niektorom z rokov aj pružne pohybovať, nakoľko rozpätie cien je stanovené pomerne široko.

5.8. Celkové zhodnotenie ekonomických aspektov a vyvodenie záverov

Celkovým záverom, aký dáva nielen samotný výpočet efektívnosti, ale aj citlivostné analýzy je, že projekt sa vyplatí, zvlášť však musím spomenúť fakt, že projekt je v tomto prípade pri modelovaní mierne podhodnotený vzhľadom napríklad na výpočet s nižším zrýchlením, ktoré koniec koncov ovplyvňuje aj množstvo energie spotrebovanej a využitej. Existuje teda širšie prostredie pre ďalšie modifikácie tohto projektu.

Napriek tomu, že presnosť ekonomických ukazateľov môže byť v danom diele predmetom sporu, keďže reálne dáta pre konkrétny výpočet má k dispozícii iba dopravný podnik mesta Praha a pre odbornú či širšiu verejnosť sú predmetom obchodného tajomstva, je táto práca jasným dôkazom toho, že možnosti na väčšiu ekologizáciu a ekonomizáciu, už i tak ekologickej a ekonomickej prevádzky električiek v meste a že má zmysel uvažovať o vybavení novších typov vozidiel konkrétnymi prvkami akumulácie elektrickej energie využiteľnej na trakciu, prípadne uvažovať v horizonte budúcich nákupov o kúpe vozidiel umožňujúcich práve ukladanie energie pre znižovanie konečnej spotreby elektrickej energie.

6. Záver

Táto práca si kládla za cieľ overiť ako technické tak aj ekonomické parametre využitia hybridného systému ukladania rekuperovanej energie v mestskej koľajovej doprave. V reálnej praxi existujú už vozidlá, ktoré sú vybavené batériovým systémom, či systémom so superkapacitormi, avšak ich kombinácia pre potreby ukladania trakčnej energie sa zatiaľ v praxi vo väčšej miere neobjavila. Oba systémy majú ako svoje výhody, tak i nevýhody. Jedná sa hlavne o energetickú hustotu a energetickú kapacitu. Hybridný systém, ktorý som sa pokúsil v tejto práci navrhnúť a spočítať je vybavený ako superkapacitormi tak i batériami a využíva teda kladné stránky oboch technológií.

Model je založený na výpočte na konkrétnej trati. Vzhľadom na to, že Praha nie je rovinaté územie bolo možné si vybrať z niekoľkých variant. Keďže som však chcel dosiahnuť čo najlepšie výsledky vybral som si trať, ktorá je čo najviac exponovaná. Ako prvé bolo teda treba zistiť sklonové pomery a vzdialenosti jednotlivých zastávok, na čo dokonale postačili špeciálne výškovo upravené Google Maps, kde sa dalo zaokrúhlene na celé metre získať konkrétnu výškovú polohu zastávok. Na približný odpočet vzdialeností som rovnako využil Google maps, kde dráhu som aproximoval v niekoľkých bodoch čo najpresnejšie k dráhe koľají. Následný mechanický model vychádza z princípu, že súčet všetkých mechanických síl musí byť rovný nule, podľa rovnice 3 a práve z tejto rovnice sa ďalej odvíjali úvahy o potrebnej sile a výkone na rozbeh vozidla a prekonanie síl, ktoré na električku pôsobia. Na tento mechanický model nadväzuje model elektrický, ktorý pozostáva z meniča, ktorý tvorí jadro celého systému. V tomto meniči sú galvanicky oddelené štyri časti energetického systému električky. Jedná sa o elektrické motory, v tomto prípade je v modeli navrhnutý menič vždy na jeden podvozok, tzn. na dva v sérii zapojené motory, ďalej každý podvozok má vlastne napočítané ako množstvo batérii, tak i superkapacitorov, ktoré pre jednotlivé meniče v rámci úspory na rozvodoch tvoria 4 nezávislé avšak centrálné riadené hybridné zdroje energie a posledný vstup meniča je prívod z trakčnej sústavy. Riadenie modelu je pre zjednodušenie modelu udané len na základe konštant uhlov riadenia jednotlivých meničov.

V druhej časti práce som na základe dát získaných z mechanicko-elektrického modelu zostavil ekonomický model, ktorý využíva hodnoty získané z technického modelu. Vzhľadom na citlivosť údajov ako je cena trakčnej energie bolo nutné k tejto hodnote dospieť určitým spôsobom empiricky a odhadom. Podľa posledného cenového rozhodnutia Energetického regulačného úradu a na základe odborných konzultácií som odhadol cenu približne na úroveň 1,8 Kč/kWh elektrickej energie na úrovni VN pre DP Praha a.s. Na základe tohto údaju som ročný tok hotovosti vedel odhadnúť princípom rozdielu pôvodnej varianty bez ďalšieho využitia rekuperačnej energie a navrhovanej varianty, čiže v podstate ušetrenou energiou. Ďalšou zložkou ušetrenou bolo ušetrenie na výkone, ktoré som tak isto aproximoval k maximálnemu výkonu násobenému konštantou účasti na maxime rezervovaného výkonu, z čoho zhruba 40% tvorí celková úspora pri využití hybridného systému.

Výsledkom ekonomických úvah sú výsledky, ktoré stoja za úvahu v záujme ako šetrenia elektrickou energiou, tak i šetrenia finančných prostriedkov. Aj citlivostná analýza ukázala, že v prípade ďalšieho zvyšovania cien elektrickej energie, ktoré sa predpokladá, či znižovania cien vstupov, ktoré budú pravdepodobne klesať masovým nasadením technológie, je portfólio možností ako na základe tejto technológie ušetriť širšie. Napriek týmto silným dôvodom je však dôvodov pre zamietnutie tohto projektu viac. Jedná sa hlavne o technický problém z pohľadu infraštruktúry. Podľa odborných konzultácií je hlavným problémom hlavne váha, s ktorou majú problém už aj vozy, ktoré nie sú týmto systémom vybavené. Samotný systém bez úpravy meniča a ďalšej kabeláže by navýšil hmotnosť električky približne o 700 kilogramov, čo tvorí problém, ktorý môže byť riešiteľný finančne omnoho nákladnejšie v porovnaní s finančným ekvivalentom možného zisku z využitia technológie. Štúdia realizovateľnosti možností riešenia tejto situácie už však nie je z pohľadu technického zamerania autora tejto štúdie možná a môže byť predmetom štúdie ďalších autorov.

Literatúra

1. Fojtik, P. Linert, S. Prosek, Fr.: *Historie mestské hromadné dopravy v Praze*, 3.vydani, Dopravní podnik hl. M. Prahy, 2005 ISBN 80-239-5013-4
2. Rozsypal, Josef. (Publikované: 2015). *Historická tramvaj Ringhoffer*, Získané 03.03.2016 z URL: http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2015/sbornik_2015/0801.pdf
3. Gangi, Jennifer (Publikované: 24.06.2004). *Fuel cells in transportation applications*. Získané 16.03.2016 z URL:<http://www.fuelcells.org/uploads/hydrogentechnologyforum.pdf>
4. Dvorak, Petr. (Publikované: 9.5.2011). *Akumulace elektriny*. Získané 16.03.2016 z URL: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
5. Buchmann, Isidor. (Publikované: 21.12.2010). *The high-power Lithium-ion*, Získané 17.03.2016 z URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/the_high_power_lithium_ion
6. Buchmann, Isidor. (Published: 19.04.2011). *BU-205 Types of Lithium-ion*, Získané 17.03.2016 z URL:http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
7. Buchmann, Isidor. (Published: 15.12.2010). *BU-209 How does the supercapacitor works*, Získané 20.03.2016 z URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
8. Bombardier advertising materials. (Publikované: 2012). *MITRAC energy saver*, Získané 22.03.2016 z URL: http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transport-ECO4-MITRAC_Energy_Saver-EN.pdf
9. Panteleev, V.I. Prof, Sizyanova, E.Yu. Prof. *Osnovy elektrického transporta*. Výukový materiál pre študentov programu Elektroenergetika a Elektrotechnika, Krasnoyarsk, 2008
10. Maher, Bobby. (Publikované: December 2006). *Ultracapacitors Provide Cost and Energy Savings for Public Transportation Applications*, Získané 03.04.2016 z URL: http://www.batterypoweronline.com/images/PDFs_articles_whitepaper_appros/Maxwell%20Technologies.pdf
11. Barrero, Ricardo. Tackoen Xavier. (Publikované: September 2008). *New technologies (Supercapacitors) for energy storage and energy recuperation for a higher energy efficiency of the Brussels public transportation company vehicles*, Získané 03.04.2016 z URL: http://ciem.ulb.ac.be/Everest/Documents_files/EVEREST%20full%20report.pdf
12. Krasenska, Tereza. (Publikované: 25.09.2012). *Dopravní podnik nakoupil elektrinu na rok 2014, oproti letosnímu roku ušetří 65 milionu korun*, Získané 02.05.2016 z URL: <http://www.dpp.cz/dopravni-podnik-nakoupil-elektrinu-na-rok-2014-oproti-letosnimu-roku-usetri-65-milionu-korun/>
13. Krejcirikova, H., Spackova H.: *Dopravní stavby – Cast: Kolejova doprava*. Praha, Vydavatelství ČVUT, 2003. 75 s. ISBN 80-01-02444-X.
14. Breasley, Richard. A., Myers, Stewart.: *Principles of corporate finance*, 7th edition, Boston, mass McGraw-Hill/Irwin, 2003