

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Regulace měniče akumulátoru energie v tramvajovém vozidle**

**Jan Zdebor**

**2019**

---

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jan ZDEBOR**  
Osobní číslo: **E17N0058P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**  
Název tématu: **Regulace měniče akumulátoru energie v tramvajovém vozidle**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Tato práce se zabývá regulací měniče akumulátoru energie (s bateriemi či superkapacitory) umístěného v tramvajovém vozidle.

1. Vytvořte zjednodušený kinetický model tramvajového vozidla.
2. Vytvořte model výkonového obvodu tramvaje s akumulátorem energie (superkapacitory či bateriemi).
3. Navrhněte regulaci měniče akumulátoru energie s ohledem na odebíraný výkon tramvaje, napětí dc-linku apod.
4. Závěrem zhodnoťte možné energetické úspory

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

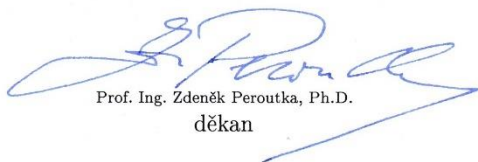
**Akumulační systém pro vozidla lehké trakce, dizertační práce Luboš Streit**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jakub Talla, Ph.D.**

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**

  
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá vhodnou regulací měniče akumulátoru v tramvajovém vozidle.

Pro získání řešení bylo zapotřebí vytvořit kinematický model tramvajového vozidla. Jeho výstupem byl průběh odebíraného výkonu z trakčního vedení. Dále bylo nutné zhotovit výkonový model tramvaje. Jeho vstupem byl odebíraný výkon z trakčního vedení. Pro regulaci toku energie akumulacním systémem ve výkonovém modelu tramvaje byly zvoleny tři strategie. Akumulační systém byl založený na reálném modulu ze superkondenzátorů. Každá strategie byla navíc simulována pro různou kapacitu akumulacního systému. Výstupem z výkonového modelu byly energie. Spotřebované energie se zvolenými strategiemi byly porovnány s referenční spotřebovanou energií tramvajového vozidla. Simulována byla trať s nízkou hustotou provozu, tedy pro ideální případ zakázané rekuperace, kdy mohla být veškerá energie získaná při brzdění akumulována do akumulacního systému.

Provedeným výzkumem bylo zjištěno, že metoda omezení špičkových proudů umožňuje úsporu spotřebované energie až 39 % při maximální kapacitě akumulacního systému. Proporční strategie dosahuje úspor až 49 % spotřebované energie při maximální kapacitě akumulacního systému. Na úspory strategie středního odebíraného výkonu se musí pohlížet ze dvou stran. Na jedné straně měla strategie stanoveny parametry takové, že se chovala jako čistě proporční a dosáhla tedy stejných úspor. Avšak při úpravě parametrů tak, aby se dosáhl účel této strategie, se úspora dramaticky snižovala.

Hlavním zjištěním je tedy značná úspora spotřebované energie s prvními dvěma testovanými strategiemi na tratích s nízkou hustotou provozu.

## **Klíčová slova**

Akumulační systém, superkondenzátor, kinematický model, tramvajové vozidlo, simulace

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on control of energy storage converter of tram vehicle.

It was necessary to create kinematic model of tram vehicle. Output of this model was required traction power. Next step was power model of tram. Input of power model was required traction power. For the control of the energy flow in power model, three different strategies were chosen. The storage system was based on a real supercapacitor module. Each of the strategy was simulated for different capacity of the storage system. Output of the power model were energies. Consumed energies with enabled strategy were then compared to the referential consumed energy of tram vehicle without a strategy. Simulated route was based on low traffic density, therefore ideal case of forbidden recuperation. In that case, all the energy created during braking was accumulated in storage system.

With this research done, it was found that peak shaving strategy saved up to 39 % of the consumed energy. The best result was of course achieved with maximum capacity of the storage system. Next strategy, the proportional strategy, saved up to 49% of the consumed energy with the maximum capacity of the storage system. Provided saves of the strategy called mean power are less or equal to the saves of proportional strategy. The reason is setting of the strategy. On one boundary of the setting, mean power strategy behaves as proportional strategy, therefore saves are equal. With changing that setting, saves are decreasing significantly.

Main discovery of this diploma thesis is considerable save of consumed energy with two strategies. However, they can be applicable only on route with low traffic density.

## **Key words**

Storage system, supercapacitor, kinematic model, tram, simulation

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 26.5.2019

Jan Zdebor

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>OBSAH</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>1 ÚVOD</b> .....   | <b>10</b> |
| 1.1 CÍLE PRÁCE .....  | 10        |
| <b>2 ENERGETICKÁ BILANCE VOZIDLA A TRATI</b> .....  | <b>11</b> |
| 2.1 POTENCIONÁLNÍ ENERGIE.....  | 11        |
| 2.2 KINETICKÁ ENERGIE.....  | 11        |
| 2.3 ZÁKLADNÍ POHYBOVÉ FÁZE KOLEJOVÝCH VOZIDEL [4] .....                                     | 11        |
| 2.4 REKUPERACE, PROBLÉMY A ŘEŠENÍ.....  | 12        |
| <b>3 TRAKČNÍ AKUMULAČNÍ PRVKY</b> .....   | <b>14</b> |
| 3.1 ELEKTROMECHANICKÉ AKUMULÁTORY .....   | 14        |
| 3.2 ELEKTROCHEMICKÉ AKUMULÁTORY [5] .....   | 15        |
| 3.3 SUPERKONDENZÁTORY ELDC [1].....   | 16        |
| 3.3.1 <i>Stacionární superkondenzátorový akumulátor</i> .....                               | 18        |
| 3.3.2 <i>Lokální akumulční systém z pohledu tramvajového vozidla</i> .....                  | 18        |
| <b>4 TOPOLOGIE AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ</b> .....   | <b>19</b> |
| 4.1 PARALELNÍ AKUMULAČNÍ SYSTÉM .....   | 19        |
| 4.1.1 <i>Napětí superkondenzátoru je vždy nižší</i> .....                                   | 19        |
| 4.1.2 <i>Napětí superkondenzátoru může být vyšší i nižší</i> .....                          | 20        |
| 4.2 SÉRIOVÝ AKUMULAČNÍ SYSTÉM .....   | 21        |
| 4.2.1 <i>Sériový akumulční systém na vstupu trakčního střídače</i> .....                    | 21        |
| 4.2.2 <i>Sériový akumulční člen na výstupu trakčního střídače</i> .....                     | 21        |
| <b>5 STRATEGIE ŘÍZENÍ TOKU ENERGIE AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ</b> .....                           | <b>23</b> |
| 5.1 OMEZENÍ ŠPIČKOVÝCH ODBĚRŮ .....   | 23        |
| 5.2 PROPORČNÍ STRATEGIE.....  | 23        |
| 5.3 STŘEDNÍ HODNOTA ODEBÍRANÉHO VÝKONU .....  | 23        |
| <b>6 ZJEDNODUŠENÝ KINEMATICKÝ MODEL TRAMVAJOVÉHO VOZIDLA</b> .....                          | <b>24</b> |
| 6.1 PARAMETRY PRO SIMULACI [1] .....  | 24        |
| 6.2 REGULAČNÍ ČÁST .....  | 24        |
| 6.3 ČÁST TRAKČNÍ MECHANIKY .....  | 26        |
| 6.4 VÝSTUPNÍ DATA ZE SIMULACE ZJEDNODUŠENÉHO KINEMATICKÉHO MODELU TRAMVAJOVÉHO VOZIDLA..... | 29        |
| <b>7 MODEL VÝKONOVÉHO OBVODU TRAMVAJE SE SUPERKAPACITOREM</b> .....                         | <b>32</b> |
| 7.1 ŘÍZENÍ MODELU.....  | 33        |
| 7.2 STABILIZACE LC FILTRU [9].....  | 34        |
| 7.3 BLOK POWER MANAGMENT.....   | 37        |
| 7.4 AKUMULAČNÍ PRVEK POUŽITÝ V SIMULACI.....  | 37        |
| 7.5 DETAILNÍ MODEL S DC/DC MĚNÍČEM .....  | 38        |
| 7.6 VÝKONY A ENERGIE .....  | 40        |
| 7.6.1 <i>Energie spotřebovaná <math>E_s</math></i> .....                                    | 40        |
| 7.6.2 <i>Energie mařena v brzdovém odporu <math>E_{CHOP}</math></i> .....                   | 41        |
| 7.6.3 <i>Energie akumulovaná do superkapacitoru <math>E_{ASC}</math></i> .....              | 41        |
| 7.6.4 <i>Energie dodaná superkapacitorem do DC linku <math>E_{PSC}</math></i> .....         | 41        |
| 7.6.5 <i>Energie ztrátová <math>E_j</math></i> .....  | 41        |
| <b>8 VÝSLEDKY SIMULOVANÝCH STRATEGIÍ</b> .....  | <b>43</b> |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 8.1      | OMEZENÍ ŠPIČKOVÝCH PROUDŮ .....                           | 44        |
| 8.2      | PROPORČNÍ STRATEGIE.....                                  | 45        |
| 8.3      | STŘEDNÍ HODNOTA ODEBÍRANÉHO VÝKONU .....                  | 47        |
| 8.4      | SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ DETAILNÍHO A ZJEDNODUŠENÉHO MODELU..... | 49        |
| <b>9</b> | <b>SHRnutí VÝSLEDKŮ.....</b>                              | <b>51</b> |
|          | <b>ZÁVĚR.....</b>   | <b>53</b> |
|          | <b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>       | <b>54</b> |
|          | <b>PŘÍLOHY .....</b>                                      | <b>1</b>  |



## Seznam symbolů a zkratek

|               |   |
|---------------|---|
| $e$           | rozchod trolejnic   |
| $E_S$         | Energie spotřebovaná                                      |
| $E_{CHOP}$    | Energie mařená v brzdovém doporníku                       |
| $E_{ASC}$     | Energie akumulovaná do superkapacitoru                    |
| $E_{PSC}$     | Energie poskytnutá superkapacitorem                       |
| $E_J$         | Ztráty na vnitřních odporech superkondenzátoru tlumivky   |
| $F_t$         | Tažná síla  |
| $I_{ESS}$     | Proud akumulacním systémem                                |
| $I_{SC}$      | Proud superkapacitorem                                    |
| $I_{OHL}$     | Proud trakčním vedením                                    |
| $I_{TI}$      | Proud trakčního invertoru                                 |
| $I_{CHOP}$    | Proud brzdovým odporníkem                                 |
| $l$           | Vzdálenost  |
| $m$           | Hmotnost  |
| $n$           | Počet náprav  |
| $n_{náprava}$ | Otáčky nápravy  |
| $n_{sc}$      | Počet modulů superkapacitorů                              |
| $p_a$         | Měrná zrychlující síla                                    |
| $p_o$         | Měrný jízdní odpor  |
| $p_r$         | Přídavný odpor oblouku                                    |
| $p_s$         | Měrný odpor sklonu  |
| $P_{ESS}$     | Výkon akumulacního systému                                |
| $P_{ESS FS}$  | Požadavek na výkon ze stabilizace LC filtru               |
| $P_{ESS PM}$  | Požadavek na výkon z power managementu v detailním modelu |
| $R_O$         | Poloměr oblouku   |
| $SC$          | Superkondenzátor/Superkapacitor                           |
| $U$           | Napětí  |
| $v$           | Rychlost vozidla  |
| $U_C$         | Napětí DC linku   |
| $U_{SC}$      | Napětí superondenzátoru                                   |
| $\varepsilon$ | Koeficient respektující účinnost tramvaje při rozjezdu    |
| $\eta$        | Jmenovitá účinnost tramvaje                               |
| $\xi$         | Součinitel rotujících hmot                                |
| $\omega_{el}$ | Elektrická úhlová rychlost                                |

# 1 Úvod

S ohledem na stále rostoucí spotřebu elektrické energie ve všech odvětvích je v dnešním světě každá myšlenka, jak spotřebu snížit, velice cenná. Důsledkem vyšších nároků jsou zvýšené ztráty, neboť výkon se z elektráren musí přenášet někdy i stovky km. Při tom vznikají na vedení podstatné ztráty. Výstavba nových elektráren je dlouhý, problematický a drahý proces. Přesto je zvýšení výroby elektrické jednou možností, jak pokrýt její narůstající potřebu. Jinou možností je spotřebu snížit na straně spotřebičů, zvýšením jejich efektivity.

Jedno z mnoha odvětví odebírající elektrickou energii je doprava. Na jedné straně se vylepšuje efektivita měničů a trakčních invertorů, přemýšlí se nad aerodynamickým designem, snižují se ztráty třením apod. Na druhé straně se větší efektivity dosáhne, pokud stroj dokáže energii jinak mařenou, přeměnit zpět na elektrickou energii. Takovým příkladem může být tramvajové vozidlo. To může brzdít elektrodynamicky a motor se začne chovat jako generátor.

Dnešní tramvajová vozidla umožňují rekuperovat energii jinak mařenou při brzdění zpět do troleje, ale pouze za určitých podmínek. Na tratích s nízkým počtem vozidel nebo v málo vytížených hodinách se takovým způsobem efektivita příliš nezvýší. Řešením může být lokální akumulací systém. Ten nesnižuje pouze spotřebu vozidla, ale i velikost ztrát, které vznikají na vedení při vzdálených přenosech výkonu. Má diplomová práce se zabývá problematikou regulace takového systému.

## 1.1 Cíle práce

Pro seznámení se s danou problematikou obsahují první kapitoly teoretický úvod. Prvním krokem práce pro zkoumání dané problematiky je vytvoření kinematického modelu tramvajového vozidla. Jde o zjednodušený model, jehož cílem je se co nejlépe přiblížit realitě. Výstupem modelu je, mimo jiné, průběh odebíraného trakčního výkonu, který poslouží pro další krok. Tím je vytvoření modelu výkonového obvodu tramvaje s akumulátorem energie, v tomto případě založeném na superkapacitorech. Tok energie akumulací systémem podléhá návrhu regulace měniče. Výstupem z výkonového modelu tramvaje jsou energie. Porovnáním výstupních energií pro různé strategie řízení a kapacitu akumulací systému poslouží k vyhodnocení možných energetických úspor.

## 2 Energetická bilance vozidla a trati

### 2.1 Potencionální energie

Za zjednodušeného předpokladu nulových ztrát při pohybu tělesa lze určit energii potřebnou k překonání převýšení  $h$  pomocí známého vztahu (2.1). Převýšení  $h$  je převýšení mezi nejnižším a nejvyšším bodem. Velikost energie tak může sloužit pro porovnání se simulovanou energií spotřebovanou  $E_s$ , ve které jsou již ztráty zahrnuty.

$$E_p = m \times h \times g \left[ J, kg, m, \frac{m}{s^2} \right] \quad (2.1)$$

$m$  ... hmotnost tělesa

$h$  ... výška tělesa

$g$  ... tíhové zrychlení (9,81 m/s)

### 2.2 Kinetická energie

Při pohybu získává těleso energii kinetickou. Vztah (2.2) uvažuje jako v minulém případě teoretickou hodnotu kinetické energie, bez uvažování ztrát.

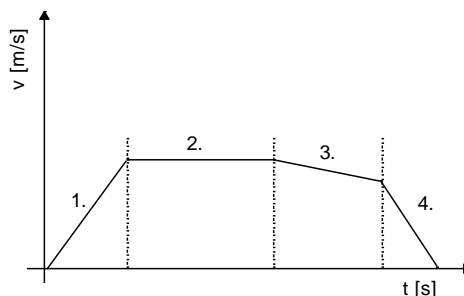
$$E_K = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \left[ J, kg, \frac{m}{s} \right] \quad (2.2)$$

$m$  ... hmotnost pohybujícího se tělesa

$v$  ... rychlost pohybujícího se tělesa

### 2.3 Základní pohybové fáze kolejových vozidel [4]

Na *Obr. 1* jsou znázorněny čtyři základní fáze pohybu kolejových vozidel. Stručně se jedná o rozjezd, jízdu rovnoměrnou rychlostí, výběh a brzdění.



*Obr. 1 Čtyři základní fáze pohybu kolejových vozidel [4]*

1. Rozjezd ... v první fázi se kolejové vozidlo uvede do pohybu. Při dostatečném výkonu vozidla a překonání jízdních odporů, dosáhne vozidlo

požadované rychlosti. Jednotlivé složky těchto odporů budou popsány v kapitole 6.3. V této fázi je odběr elektrické energie největší. Proto se strategie řízení akumulčních systémů, podrobněji popsané v kapitole 1, zaměřují na dodávku energie právě v této fázi. Použití účinnějších trakčních měničů, motorů a dalších prvků taktéž přinese největší úspory právě v této fázi.

2. Jízda rovnoměrnou rychlostí ... spotřeba energie kryje pouze jízdní odpory a je znatelně nižší než v první fázi.
3. Výběh ... spotřeba energie je nulová. Vozidlu klesá rychlost v závislosti na jízdních odporech.
4. Brzda ... Za předpokladu, že vozidlo umožňuje měnit kinetickou energii na elektrickou a že je kam vzniklou elektrickou energii uložit, je možné brzdit pomocí trakčního motoru. Pokud je splněna pouze první podmínka, stále je možné brzdit trakčním motorem a elektrickou energii zmařit v brzdovém odporníku. Pokud není splněna ani jedna z podmínek nebo je potřeba vyšší decelerace, je použito mechanické brzdy.

Nejvyšších úspor se dá dosáhnout při hospodárném rozjezdu a při efektivní přeměně kinetické energie zpět na elektrickou a její zpětné využití.

## **2.4 Rekuperace, problémy a řešení**

Kolejové vozidlo s trakčním vedením může ve fázi brzdění rekuperovat energii pomocí elektrodynamického brzdění. Na městských drahách s vyšší hustotou vozidel v jednom napájecím úseku vozidla rekuperují téměř vždy. Takovým příkladem mohou být tramvajové linky v Plzni. Na železnici nebo na městských linkách s nízkou hustotou dopravy vozidlo rekuperuje pouze ve vybraných případech. Tramvajové spojení Most – Litvínov odpovídá druhému případu. Trakční motor při brzdění zastává funkci generátoru a vyrábí elektrickou energii. U starších typů vozidel byla přítomna pouze odporová regulace a elektrická energie nebyla skladována, nýbrž přeměněna na teplo. U vozidel moderní konstrukce je možnost vracet energii zpět do sítě.

Napětí trakční sítě městských tratí je většinou stejnosměrné. Trakční motor v režimu generátoru vyrábí třífázové napětí. Je tedy potřeba ho měničem usměrnit. Na výstupu měniče je DC link. Při napětí DC linku převyšující napětí trakční sítě lze vracet elektrickou energii zpět. Podle [4] je praktická úspora okolo 20 %.

Výše popsaná metoda má podstatné omezení. Rekuperovaná energie musí být ihned odebrána blízkým kolovým vozidlem. Pokud se tak nestane, napětí DC linku a trakčního vedení stoupne vysoko nad povolené limity a hrozí poškození izolace. Aby nenastal takový scénář, energie se mění v teplo v brzdovém odporu jako u starších konstrukcí. Dalšími možnostmi jsou lokální akumulční prvky, akumulční prvek připojený k trakčnímu vedení nebo měnič schopný vracet energii do rozvodné sítě.

Další problém s rekuperací může vzniknout v moment zkratu trakčního vedení. Pokud je takovýto stav vzdálený jak od vozidla, tak od měničky, rekuperující vozidlo po dobu brzdění dodává energii do zkratového vedení a může způsobit škody na majetku, ale i na zdraví osob. [4]

### 3 Trakční akumulční prvky

Z hlediska vhodnosti pro trakci se jeví jako nejlepší řešení pro uložení elektrické energie elektrochemický článek nebo superkondenzátor (EDLC). Existují však řešení založená na uložení elektrické energie ve formě kinetické energie (setrvačnick) nebo stlačeného plynu (CAES).

Důležitými parametry pro výběr jsou kapacita, výkon, dále nízký vnitřní odpor (ESR), energetická účinnost, hustota energie a měrný výkon. Tab. 1 obsahuje porovnání několika typů baterií, superkondenzátorů, setrvačnicků a systému CAES. Neméně důležitá je však také bezpečnost, výstupní napětí modulu a v neposlední řadě cena.

Tab. 1 Srovnání základních parametrů akumulčních prvků [5]

| Typ akumulčního prvku  | Účinnost [%] | Hustota energie [Wh/kg] | Měrný výkon [W/kg] | Počet cyklů [-] | Samovybíjení |
|------------------------|--------------|-------------------------|--------------------|-----------------|--------------|
| Olověné                | 70-80        | 20-35                   | 25                 | 200-2000        | Nízké        |
| Ni-Cd                  | 60-90        | 40-60                   | 140-180            | 500-2000        | Nízké        |
| Ni-MH                  | 50-80        | 60-80                   | 220                | <3000           | Vysoké       |
| Li-Ion                 | 70-85        | 100-200                 | 360                | 500-2000        | Střední      |
| Li-pol                 | 70           | 200                     | 250-1000           | >1200           | Střední      |
| NaS                    | 70           | 120                     | 120                | 2000            | -            |
| EDLC                   | 95           | <50                     | 4000               | >50000          | Velmi vysoké |
| CAES                   | 40-50        | 10-30                   | -                  | >20 let         | -            |
| Setrvačnick (kovový)   | 95           | 5-30                    | 1000               | >20000          | Velmi vysoké |
| Setrvačnick (kompozit) | 95           | >50                     | 5000               | >20000          | Velmi vysoké |

#### 3.1 Elektromechanické akumulátory

První pokusy s elektromechanickými akumulátory byly v minulosti použity v takzvaných Gyrobusech. V zastávce docházelo k akumulaci energie roztočením setrvačnicku a takto uložená energie byla poté použita pro jízdu do další stanice. Konstrukce setrvačnicku spočívala v rotačním válci uloženém v ložiscích. Bohužel, stěžejní charakteristikou setrvačnicku je odolnost proti změně osy rotace. To je však u autobusu nežádoucí. Vývoj elektromechanického řešení navíc zastavila nehoda. V posledních době díky novým technologiím pokračuje vývoj dále. Energie uložená v rotujícím tělese je dána vztahem (3.1). [4]

$$E_K = \frac{1}{2} \times J \times \omega^2 \left[ J, kg \times m^2, \frac{ot}{min} \right] \quad (3.1)$$

J ... moment setrvačnosti

$\omega$  ... úhlová rychlost

V současné době směřuje vývoj směrem k lehkým vysokootáčkovým setrvačnickům s minimálními ztrátami. Vhodným materiálem, jako je kevlar, karbon nebo grafit lze docílit uspořádání, které je schopné 100 000 ot/min. Rotor setrvačnicku je na *Obr. 2*. Cena těchto vysokootáčkových setrvačnicků je zatím tak vysoká, že se z ekonomického hlediska nevyplatí jeho nasazení do praxe. [4]



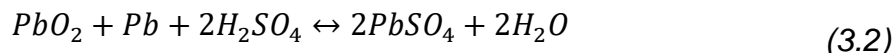
*Obr. 2 Vysokootáčkový setrvačnick [4]*

### 3.2 Elektrochemické akumulátory [5]

Elektrochemické akumulátory přeměňují elektrickou energii na chemickou energii. Název chemických akumulátorů odpovídá jejich složení. Jejich výhodou je vysoká hustota energie. Nevýhodou, která brání rozmachu v trakčních zařízeních, je nízký měrný výkon a počet nabíjecích cyklů.

Olověné akumulátory se využívají od poloviny 19. století. Negativní elektroda se skládá z olova, pozitivní elektroda je tvořena oxidem olovičitým. Elektrolytem je kyselina

sírová. Rovnice (3.2) popisuje sumárně nabíjení i vybíjení. Pro jejich nízkou cenu je jejich použití stále rozšířené i přes některé negativní vlastnosti.



V Lithium-iontovém akumulátoru vytváří proud přesun iontů lithia mezi anodou a katodou. Výhodou je vysoká hustota energie, žádný paměťový efekt a nízké samovybíjení. Nevýhodou je choulostivost na podpětí, teplo a přepětí. Ačkoliv proud článku může být několikanásobek kapacity, takto vysoké proudy mohou článek poškodit. Článek se může průchodem vysokého proudu kvůli vnitřnímu odporu zahřát natolik, až se zničí. Měl by tedy obsahovat protekční obvody, které článek před negativními vlivy ochrání. To prodražuje jejich už tak vysokou cenu.

Nikl-kadmiové a nikl-metalhydrátové baterie sloužili v 80. a 90. letech minulého století ve vysokovýkonostních aplikacích. NiCd obsahují toxické kadmium, trpí samovybíjením a dnes se na výjimky téměř nevyužívají. NiMH trpí na vyšší samovybíjení. V poslední době jsou vytlačovány Li-ion akumulátory.

Sodíkovo-sírový akumulátor (NaS) využívá tekuté síry jako pozitivní elektrodu, tekutý sodík jako negativní elektrodu. Elektrolyt je tvořený membránou z oxidu hlinitého. Operační teplota baterií je 300 °C – 360 °C a je nutné je externě zahřívat.

### 3.3 Superkondenzátory ELDC [1]

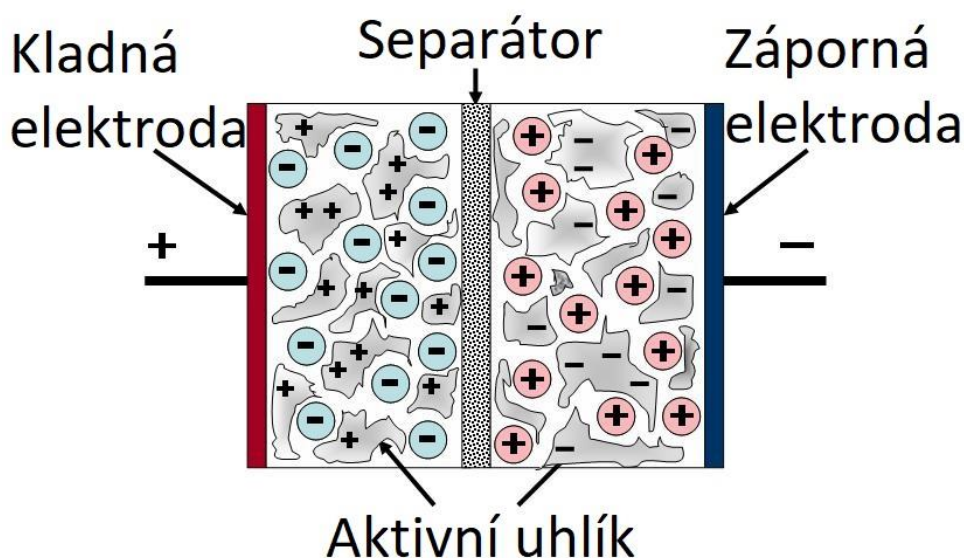
Superkondenzátor, také známý pod názvy ultrakapacitor nebo supercap, lze považovat za mezistupeň mezi klasickým kondenzátorem a akumulátorem. Oproti klasickému kondenzátoru je schopený pojmout až tisíckrát více energie. Toho je dosaženo pomocí jiného vnitřního uspořádání, které zvyšuje plochu elektrod a snižuje vzdálenost mezi nimi. Vzorec pro kapacitu se neliší.

$$C = \left| \frac{Q}{U} \right| [F, C, V] \quad (3.3)$$

Jako obyčejný kondenzátor jsou zde dvě oddělené elektrody. Elektrody superkondenzátoru jsou tvořeny hliníkovou fólií s aktivním uhlíkem, který má porézní charakter. Jeho povrchová plocha nabývá hodnot od 1000 do 3000 m<sup>2</sup>/g. V tomto porézním charakteru spočívá schopnost akumulace větší energie, jelikož zvyšuje povrch elektrod. Pro představu lze na moment elektrinu považovat za tekutinu – vodu. Běžná látka – kondenzátor není schopná pojmout takové množství vody jako houba – superkondenzátor.



Pro oddělení elektrod se u kondenzátoru používá relativně tlusté dielektrikum, například keramika, vzduch nebo papír. U superkondenzátoru jsou obě elektrody ponořeny do elektrolytu a odděleny velmi tenkým separátorem, který může být z materiálu jako je papír, plast nebo karbon. Při nabití se vytváří kladný i záporný náboj na obou stranách separátoru, vzniká tak dvojitá vrstva o tloušťce rovnající se jedné molekule (pro srovnání dielektrikum může mít tloušťku od pár mikronů po milimetry). Tato dvojitá vrstva je důvodem, proč se superkondenzátory v anglické literatuře nazývají Electrical Double-Layer Capacitor EDLC. Struktura na *Obr. 3*.



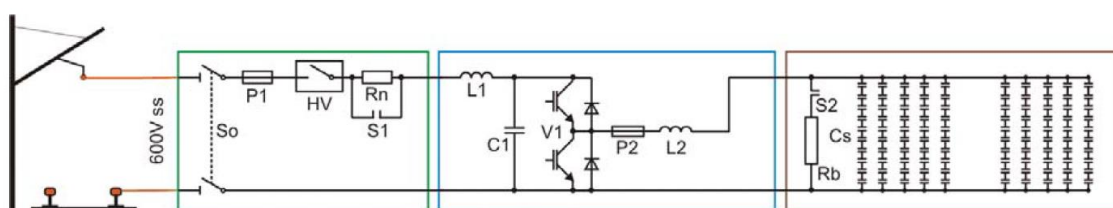
*Obr. 3 Struktura superkondenzátoru*

Mezi výhody superkondenzátorů, mimo jejich dobré akumulční vlastnosti, patří dále vysoká účinnost ( $\sim 98\%$ ), vysoký počet (až milion) nabíjecích cyklů, velmi nízký vnitřní odpor (přibližně  $10\text{ m}\Omega$ ) a velmi krátký čas potřebný pro jejich nabití (sekundy). Poslední dvě vyjmenované vlastnosti jsou výhodou i oproti akumulátorům. Nevýhodou je nízké napětí článků mezi  $1,2\text{ V} - 3\text{ V}$ . Pro využití v trakčních zařízeních je nutné dosáhnout vyššího napětí sériovým spojením. Další nevýhodou je značná závislost napětí na množství uloženého náboje a stále nízký poměr uložené energie na hmotnosti. Stárnutí se projevuje zvyšováním vnitřního odporu a snižováním kapacity.

První vyrobený superkondenzátor byl vyroben v roce 1950 pomocí aktivního uhlí na elektrodách. Od té doby materiály pokročily k ještě efektivnějšímu řešení v podobě karbonových nanotrubic, grafénu, aerogelu nebo bariem titanátu. Ceny dnešních superkondenzátorů se pohybují okolo  $33\,000\text{ Kč}$  za kapacitu  $83\text{ F}$  při napětí  $48\text{ V}$ .

### 3.3.1 Stacionární superkondenzátorový akumulátor

Stacionární systém je výhodný za předpokladu, že je na blízku rekuperující tramvaj, která nemá lokální akumulací systém nebo není v dosahu tramvaj, která by vytvořenou energii spotřebovala. Je tedy umístěn v blízkosti měřírny nebo trakčního vedení. Není ani nikterak omezen z hlediska maximální váhy a velikosti, může tedy dosahovat značných kapacit. Systém se skládá ze superkondenzátoru a polovodičového měniče, který musí být schopný přelévát energii na obě strany. Obvodové schéma přejaté z [4] je na Obr. 4. První zelený blok obsahuje vstupní obvody, modrý obsahuje měnič a filtr a hnědý akumulací systém založený na superkondenzátorech.



Obr. 4 Obvodové schéma stacionárního akumulací systému [4]

Důležitou otázkou je umístění akumulací systému. Zástavba do měřírny je jedním z řešení. Při rekuperaci dosahuje protékající proud hodnoty 300 A. Měřírna vzdálená od trakčního vedení 500 m a tramvajové vozidlo vzdálené od uzlu dalších 500 m způsobuje dle [4] ztráty na vedení 4,65 %. Pokud se v úseku nachází více rekuperujících tramvaj, ztráty rostou exponenciálně. Vysvětlení lze nalézt v následujícím vzorci pro Joulovy ztráty.

$$P_J = R \times I^2 [W, \Omega, A] \quad (3.4)$$

$P_J$  ... Joulovy ztráty

$R$  ... odpor

$I$  ... proud

Vhodnějším řešením je tedy umístění stacionárního akumulací systému do blízkosti tratě a nejlépe na místo, kde dochází k rekuperaci častěji.

### 3.3.2 Lokální akumulací systém z pohledu tramvajového vozidla

Pro minimalizaci ztrát na vedení je vhodné, aby byl akumulací systém součástí tramvajového vozidla. To s sebou nese požadavky na minimální velikost a hmotnost akumulací systému. Další kapitola je věnována topologiím lokálních akumulací systémů.

## 4 Topologie akumulčních systémů

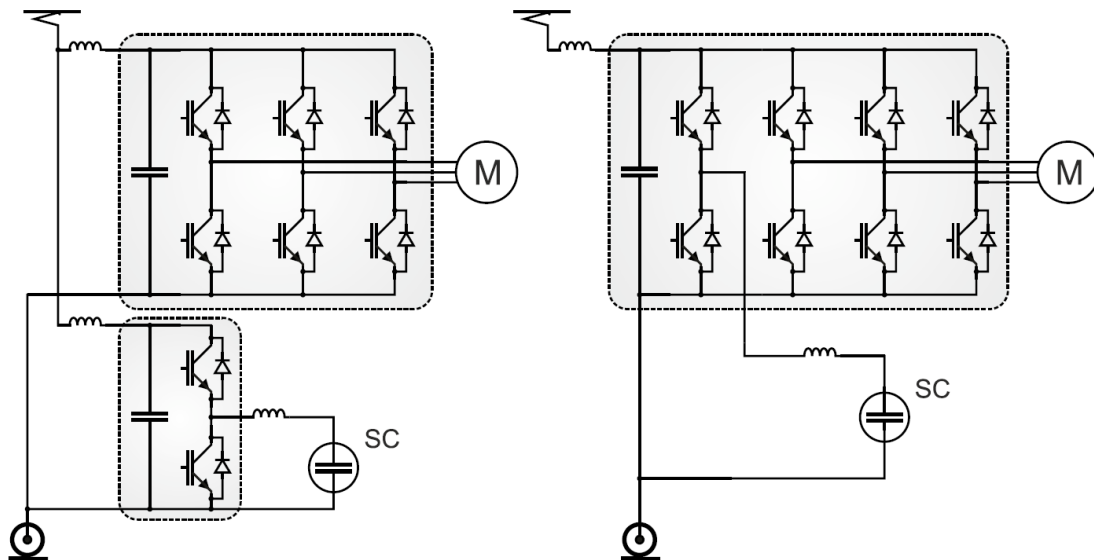
V kapitole topologie akumulčních systémů jsou popsána různá zapojení superkondenzátorů a měničů. Topologií zapojení je několik. Dělit se dají dle toho, jestli jsou sériové či paralelní, nebo podle topologie samotných měničů. Jedno z jednodušších zapojení je dvoukvadrantový pulzní DC/DC měnič. Účinnost těchto měničů má vliv na účinnost celého akumulčního systému. Uplatnění tedy nachází i měniče rezonanční. Existují také měniče, které slouží ke galvanickému oddělení a měniče, které jsou schopny sloučit výkon z několika akumulčních médií různých typů. Tím je myšleno ze superkondenzátorů, palivových článků a baterií. [1]

### 4.1 Paralelní akumulční systém

Jak bylo uvedeno v předchozím textu, nejjednodušší způsob připojení akumulčního systému se superkondenzátorem je pulzní DC/DC měnič. Jeho hlavní funkcí je přizpůsobit nestabilní napětí superkondenzátoru na vstupní napětí trakčního střídače. Z pohledu velikosti napětí na superkondenzátoru ku napětí DC linku se rozlišuje několik typů. [1]

#### 4.1.1 Napětí superkondenzátoru je vždy nižší

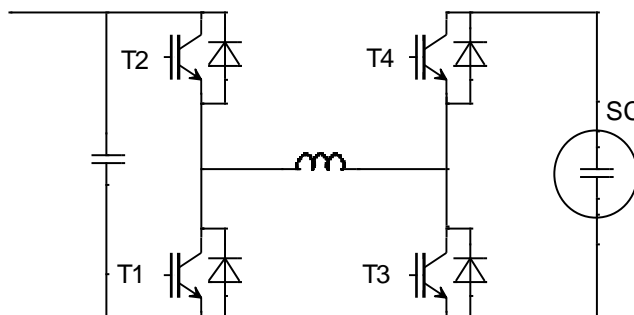
Pulzní DC/DC měnič je složen ze dvou tranzistorů. Zapojení funguje jako snižovací a zvyšovací měnič. To umožňuje, aby proud tekla oběma směry. DC/DC měnič může být integrovaný nebo nezávislý. Obě dvě možnosti lze nalézt na *Obr. 5*. Integrovaný měnič je čtvrtou fází v trakčním střídači. Nezávislé zapojení má výhodu modularity a snadnějšího řízení energií. Nevýhodou obou je nemožnost řízení proudu, pokud stejnosměrné napětí střídače klesne pod napětí superkondenzátoru. [1]



Obr. 5 Nezávislý a integrovaný pulzní DC/DC měnič [1]

#### 4.1.2 Napětí superkondenzátoru může být vyšší i nižší

Vyšší jmenovité napětí superkondenzátoru má bezesporu výhodu ve snížení protékajícího proudu skrze měnič i tlumivku při zachování stejného výstupního výkonu. Při nabití superkondenzátoru je  $U_{SCmax}$  vyšší než napětí střídače. Při vybití se zase předpokládá napětí  $U_{SCmin}$  menší, než je napětí střídače. Nároky na měnič tedy rostou. Je zapotřebí zvládnout obě polaroty proudu s různými poměry napětí na vstupu a výstupu střídače. Pro takový případ se hodí dvojitý snižovací/zvyšovací pulzní měnič. Výhodou oproti variantě v 4.1.1 je tedy možnost vyššího napětí  $U_{SC}$ , ale i možnost blokování přenosu výkonu v obou směrech. Nejvyšší účinnosti je dosaženo rovností vstupního i výstupního napětí, kdy jsou minimalizovány spínací ztráty. Zjednodušené schéma na Obr. 6. [1]



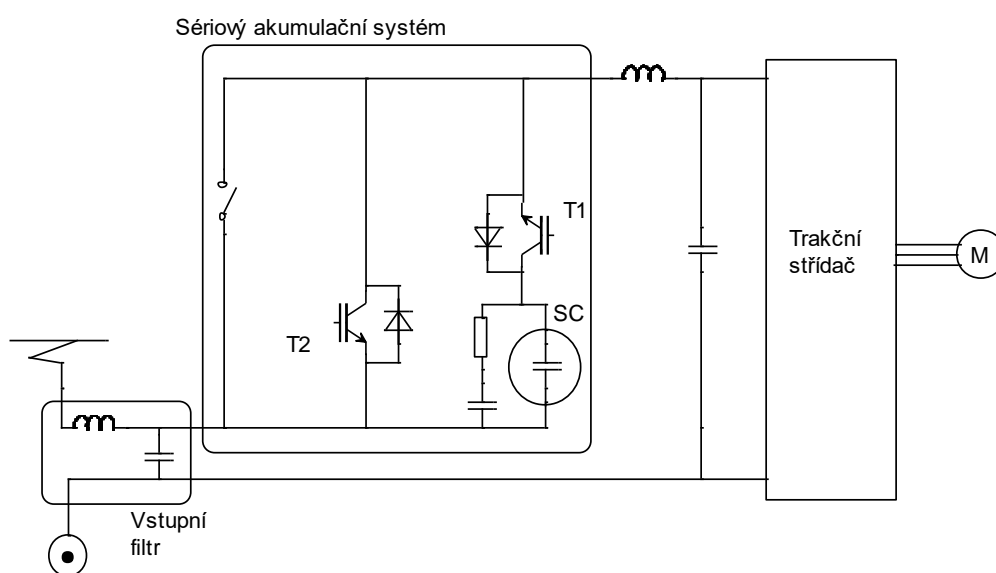
Obr. 6 Dvojitý snižovací/zvyšovací měnič

## 4.2 Sériový akumulční systém

Úkol sériového akumulčního systému je superponování napětí z troleje spolu s napětím akumulčního prvku. Rozlišuje se více typů sériových systémů, podle umístění.

### 4.2.1 Sériový akumulční systém na vstupu trakčního střídače

Tento typ se hodí zejména pro vozidla, která mají zvyšovací pulzní měnič pro zvýšení vstupního napětí střídače. Zvýšením tohoto napětí lze dosáhnout vyššího momentu motoru, tudíž i tažné síly. Pro brzdný moment platí to samé. Na Obr. 7 je znázorněné zjednodušené schéma. [6][1]

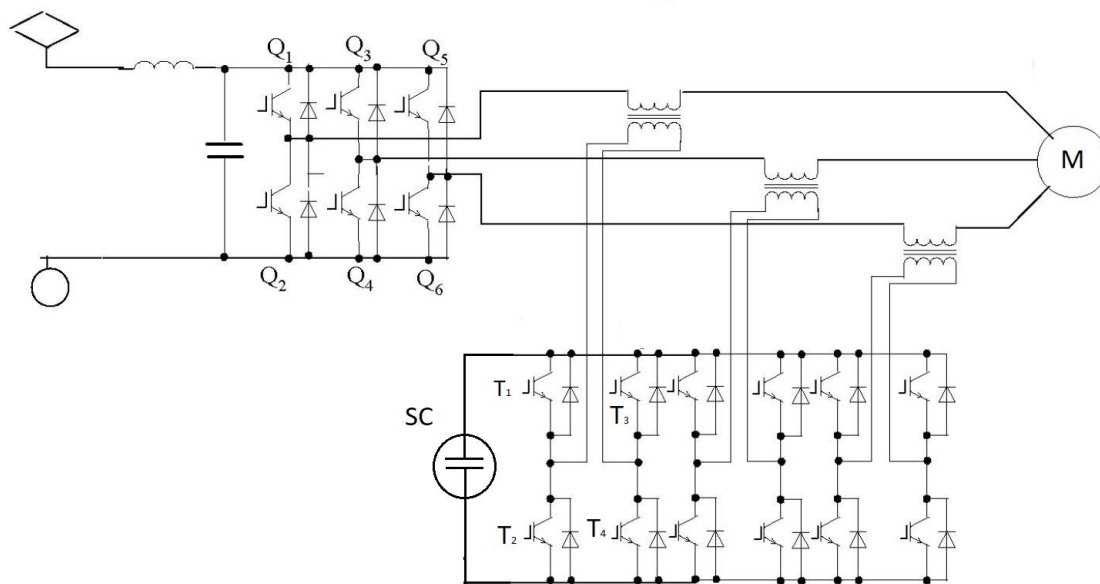


Obr. 7 Zjednodušené schéma sériového akumulčního systému [6]

Při rozjezdu, a tedy při spotřebě energie, je spínán tranzistor  $T_1$  a akumulční prvek je vybíjen. Změnou středy spínání  $T_1$  dochází k regulaci výsledného napětí. Při brzdění je akumulční prvek nabíjen proudem z trakčního střídače přes diodu v  $T_1$ . Pro omezení proudu a napětí superkondenzátorem je spínán  $T_2$ .

### 4.2.2 Sériový akumulční člen na výstupu trakčního střídače.

Další možností je sériové připojení transformátorů s trakčním motorem. Pro spínání superkondenzátoru a přenášení výkonu je nutný druhý střídač. Na Obr. 8 je zjednodušené schéma. [7]



Obr. 8 Sériový akumulční systém s transformátory ve vinutí motoru [7]

Při nevyužití superkondenzátoru coby akumulčního systému, je nutné zkratovat sekundární vinutí transformátorů. Výhoda této topologie tkví ve schopnosti uložit energii ve vyšších rychlostech, kdy je vyšší napětí trakčního motoru.

## **5 Strategie řízení toku energie akumulčních systémů**

### **5.1 Omezení špičkových odběrů**

Tato strategie cílí na snížení maximálního odebíraného proudu z troleje. S vyšším proudem rostou ztráty exponenciálně a tomu se snaží tato strategie předejít. Při odběru výkonu přesahujícího danou výkonovou mez se do práce zapojí akumulční systém. Všechn potřebný výkon nad danou mez pak hradí akumulční systém. Za předpokladu dostatečné kapacity a stupně nabití. Změnou meze se mění účinek strategie. V režimu trakčního motoru jako generátor se akumuluje do akumulčního systému veškerý vzniklý výkon. [1][11]

### **5.2 Proporční strategie**

Proporcionální řízení proporčně pokrývá potřebný výkon. Při generátorickém režimu jde veškerý výkon opět do akumulčního systému. Změnou proporční konstanty se mění vliv strategie. [11]

### **5.3 Střední hodnota odebíraného výkonu**

Tato strategie je založená na myšlence konstantního odběru výkonu rovného střednímu výkonu za celou jízdu. Předpokladem je však nereálně velký superkondenzátor. Průběh odebíraného výkonu se podobá odebíranému výkonu při omezení špičkových odběrů, avšak odebíraný výkon z troleje trvá i v režimu brzda. [11]

## 6 Zjednodušený kinematický model tramvajového vozidla

Cílem vytvoření kinematického modelu je získání průběhu potřebného výkonu. Taková data dále poslouží při hledání optimální regulace akumulárního prvku v tramvajovém vozidle. Vytvořený model má za cíl přiblížit se naměřeným datům tramvaje LTM 10.08 na trati č.4 v Plzni dle [10]. Zároveň model další naměřená data využívá k reálnějším výsledkům. Mezi tato data patří převýšení trati, vzdálenost zastávek a parametry tramvaje.

Kinematický model se dá rozdělit na dvě základní části. První část se věnuje regulaci polohy, zrychlení a momentu. Druhá část se zabývá výpočtem mechanických ztrát. Oběma částem se věnuje vlastní podkapitola. Pro vytvoření modelu je použit program Matlab/Simulink.

### 6.1 Parametry pro simulaci [1]

Naměřená data pro věrohodnější simulační model pochází z tramvajové linky č.4 v Plzni. Měření probíhalo na tramvaji Škoda LTM 10.08 a pro tuto tramvaj je tedy simulován i kinematický model. Data vychází z [10]. Tab. 2 obsahuje základní parametry tramvaje, lidově označované Astra.

Tab. 2 Parametry tramvaje Škoda LTM 10.08

|   |            |
|---|------------|
| Uspořádání dvojkolí                     | Bo Bo      |
| Maximální provozní rychlost             | 70 km/h    |
| Převod dvoustupňové převodovky          | 6,8406     |
| Průměr kol (nové/opotřebené)            | 610/530 mm |
| Hmotnost prázdného vozu                 | 24 200 kg  |
| Hmotnost max. obsazeného vozu s řidičem | 39 740 kg  |
| Trvalý výkon                            | 4x85 kW    |
| Rozjezdový výkon                        | 500 kW     |
| Maximální brzdový výkon                 | 750 kW     |

### 6.2 Regulační část

Vstupním parametrem je look-up tabulka vzdáleností zastávek na trati, uvedená v Tab. 3. Po ujetí vzdálenosti do první zastávky se změní výstup tabulky na vzdálenost druhé zastávky atd. Tramvajové vozidlo však musí na zastávce zastavit po určitou dobu a bez přidané logiky by se rozjelo ihned po zastavení. Aby se tak nedělo, je ve zpětné vazbě ujeté vzdálenosti zařazen blok stop systém. Pokud je skutečná ujetá vzdálenost



téměř rovna požadované vzdálenosti, výstup look-up tabulky zůstane na poslední hodnotě po dobu dalších 15 s. Tím se dosáhne toho, že tramvaj opravdu na zastávce stojí po určité době.

Výstupem z look-up tabulky je tedy požadovaná vzdálenost do další zastávky, kterou musí tramvajové vozidlo ujet. Od vzdálenosti požadované zastávky je odečtena skutečná ujetá vzdálenost. Rozdíl je použit v bloku tzv. S-křivky, jejíž výstupem je požadovaná rychlost tramvaje. S křivka v simulaci funguje následujícím způsobem. Pokud je rozdíl vzdáleností větší než 100 m, požadovaná rychlost je 13,8 m/s (přibližně 50 km/h). V momentě, kdy je rozdíl menší než 100 m, se požadovaná rychlost zmenšuje po křivce, připomínající písmeno S. Například při rozdílu 50 m je požadovaná rychlost 12,1 m/s, při 25 m je to 6,3 m/s a při 5 m je to už jen 0,3 m/s.

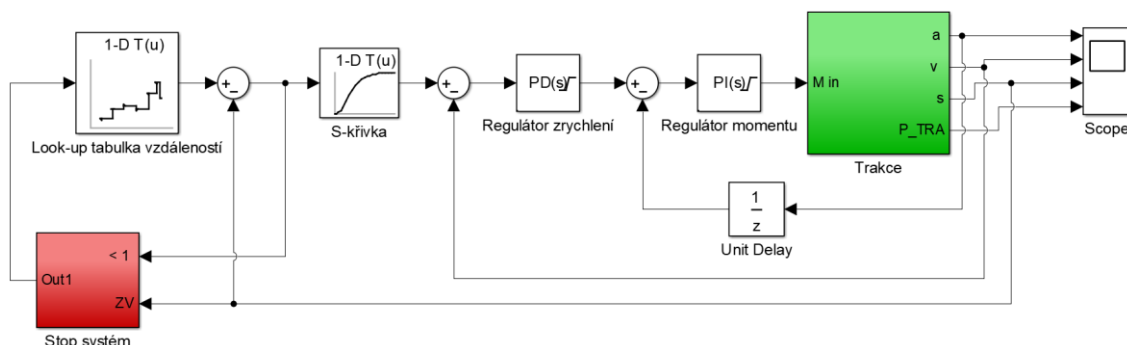
Rozdíl požadované rychlosti a skutečné rychlosti jde do vstupu PD regulátoru. Výstupem je požadované zrychlení. Maximální zrychlení nebo decelerace je omezena na 1,5 G.

Vstupem posledního PI regulátoru je rozdíl požadovaného zrychlení a skutečného zrychlení. Výstupem je požadovaný moment, který vstupuje do bloku trakční mechaniky.

Tab. 3 Zastávky pro simulaci kinematického modelu tramvaje [1]

| č. | Zastávka            | Vzdálenost [m] | Nadmořská výška [m n. m.] |
|----|---------------------|----------------|---------------------------|
| 0  | Bory                | 0              | 350                       |
| 1  | Dvořákova           | 319            | 347                       |
| 2  | Náměstí Míru        | 685            | 343                       |
| 3  | Dobrovského         | 1154           | 335                       |
| 4  | Chodské náměstí     | 1426           | 330                       |
| 5  | Masarykovo náměstí  | 1833           | 327                       |
| 6  | U Práce             | 2120           | 323                       |
| 7  | Sady Pětatřicátníků | 2576           | 313                       |
| 8  | Pod Záhorskem       | 3776           | 312                       |
| 9  | Zoologická zahrada  | 4335           | 329                       |
| 10 | Boženy Němcové      | 4626           | 339                       |
| 11 | U Družby            | 5117           | 365                       |
| 12 | Sokolovská          | 5579           | 379                       |
| 13 | Severka             | 6112           | 379                       |
| 14 | Plzeňka             | 6406           | 376                       |
| 15 | Košutka             | 6900           | 365                       |

Blokové schéma z programu Matlab/Simulink je na Obr. 9. Bloku trakce se věnuje další kapitola.



Obr. 9 Blokové schéma regulační části simulace

### 6.3 Část trakční mechaniky

Vstupem do části trakční mechaniky je požadovaný moment  $M$ . Dle (6.1) je vypočtena tažná síla  $F_t$ . Potřebnými parametry pro tuto operaci jsou převod převodovky a poloměr kola. Pro simulaci byl zvolen poloměr roven 305 mm, což odpovídá poloměru nového kola.

$$F_t = \frac{M \times p}{r_k} [N, Nm, -, m] \quad (6.1)$$

$M$  ... moment trakčního motoru [Nm]

$p$  ... převod převodovky 6,8406 [-]

$r_k$  ... poloměr nového kola 0,305 [m]

Mechanické ztráty vycházejí z pohybové rovnice (6.2), detailněji popsané v [2].

$$\frac{F_t}{m \times \xi} \pm p_a - (p_o + p_r \pm p_s) \times 9,80665 = 0 \left[ N, t, \frac{N}{t}, \frac{N}{kN} \right] \quad (6.2)$$

$F_t$  ... tažná síla [N]

$m$  ... hmotnost vozidla [t]

$\xi$  ... součinitel rotujících hmot [-] (pro tramvaj 1,2)

$p_a$  ... měrná zrychlující síla [N/t]

$p_o$  ... měrný jízdní odpor [N/kN]

$p_r$  ... přídatný odpor oblouku [N/kN]

$p_s$  ... měrný odpor sklonu [N/kN]

Z rovnice (6.3) lze odvodit měrný jízdní odpor tramvaje  $p_o$ . Ten se skládá z několika částí. Smykového tření, valivého tření a odporu vzduchu. Smykové tření je závislé na

hmotnosti, valivé tření je závislé na rychlosti a odpor vzduchu je závislý na druhé mocnině rychlosti, hmotnosti a čelní plochy. Více k rovnici lze najít v [3].

$$p_o = 3,65 + \frac{14,4}{m} + 0,045 \times v + \frac{44 \times S}{m \times n} \times v^2 \times 10^{-4} \left[ \frac{N}{kN}, t, \frac{km}{h}, m^2, - \right] \quad (6.3)$$

m ... hmotnost jedné nápravy [t]

v ... rychlost tramvajového vozidla [km/h]

S ... čelní plocha tramvajového vozidla [m<sup>2</sup>]

n ... počet náprav tramvajového vozidla [-]

Počet oblouků na simulované dráze je nízký. Měrný odpor oblouku zásadně neovlivní výsledek simulace a jeho interpretace není zcela přesná. Vztah (6.4), který byl použit pro jeho výpočet, vychází z [4]. V Tab. 4 se nachází přibližná velikost odporu sklonu, poloměr oblouku a jeho vzdálenost.

$$p_r = 350 \times \frac{e}{R_o} \left[ \frac{n}{kN}, m, m \right] \quad (6.4)$$

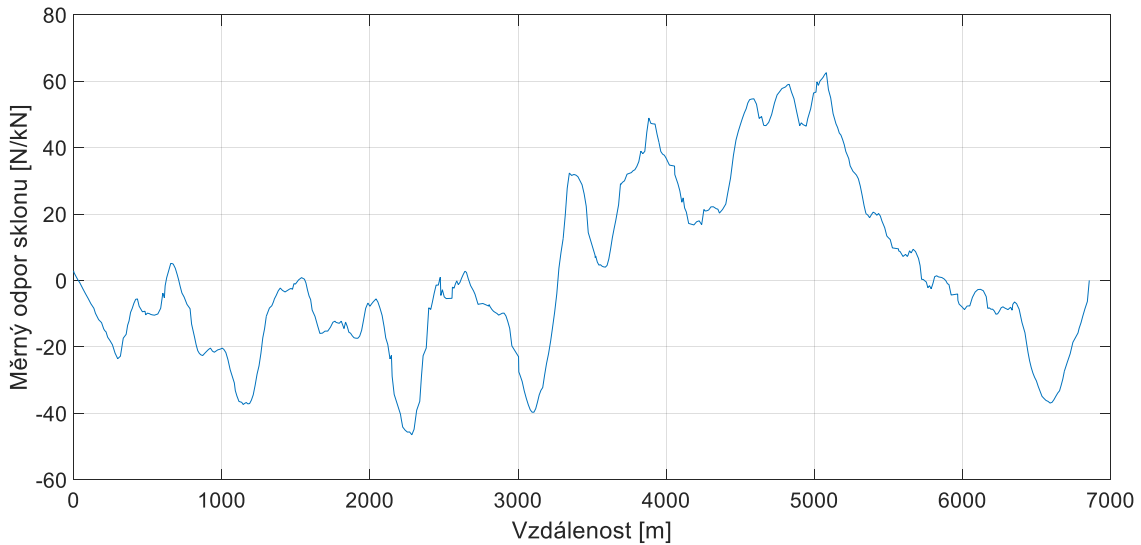
e ... rozchod kolejnic 1,435 [m]

R<sub>o</sub> ... poloměr oblouku [m]

Tab. 4 Seznam oblouků použitých v simulaci

| Vzdálenost [m] |      | Poloměr oblouku [m] | pr [N/kN] |
|----------------|------|---------------------|-----------|
| od             | do   |                     |           |
| 412            | 544  | 160                 | 3,14      |
| 3100           | 3538 | 290                 | 1,73      |
| 4384           | 4512 | 260                 | 1,93      |
| 5035           | 5211 | 200                 | 2,51      |

Měrný odpor sklonu p<sub>s</sub>, vyobrazený na Obr. 10, je spočten z výškového profilu linky, uvedeného v Tab. 3. Ten byl filtrován klouzavým průměrem a derivován dle vzdálenosti.



Obr. 10 Měrný odpor sklonu

Integrací měrné zrychlující síly  $p_a$  se získá rychlost  $v$ . Integrací rychlosti se získá ujetá vzdálenost. Výpočty jsou v rovnicích (6.5) a (6.6). Protože je měrná zrychlující síla v N/t, je nutno ji převést na N/kg.

$$v = \int \frac{p_a}{1000} \times dt \left[ \frac{m}{s}, \frac{N}{t} \right] \quad (6.5)$$

$v$  ... rychlost tramvajového vozidla [m/s]

$p_a$  ... měrná zrychlující síla [N/t]

$$l = \int v \times dt \left[ m, \frac{m}{s} \right] \quad (6.6)$$

$l$  ... ujetá vzdálenost [m]

$v$  ... rychlost tramvajového vozidla [m/s]

Jak bylo uvedeno v úvodu kapitoly, výstupem z kinematického modelu je průběh trakčního výkonu  $P_{TRA}$  pro použití v dalším kroku. K tomu, aby bylo možné  $P_{TRA}$  získat, je potřeba znát úhlovou elektrickou rychlost  $\omega_{el}$ . Pro výpočet  $\omega_{el}$  je třeba znát otáčky nápravy  $n_{náprava}$ . K výpočtu  $n_{náprava}$  a  $\omega_{el}$  slouží rovnice (6.7) a (6.8).  $P_{TRA}$  je pak spočten pomocí rovnice (6.9).

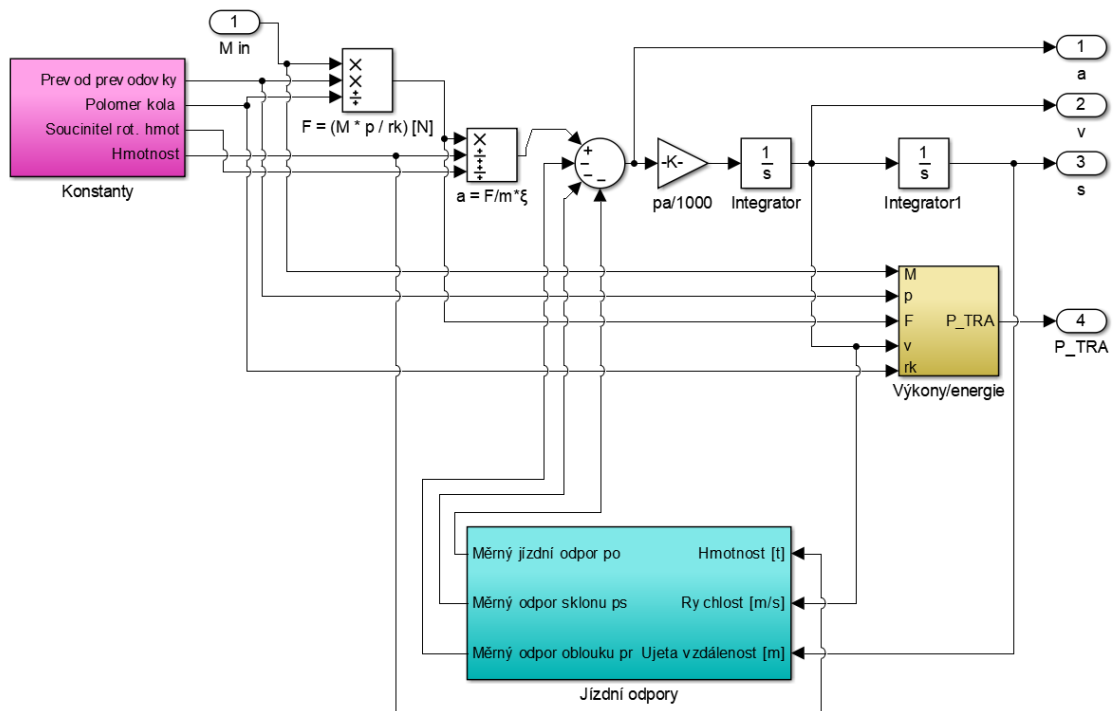
$$n_{náprava} = \frac{1000 \times v}{2 \times \pi \times 60 \times r_k} \left[ \frac{ot}{min}, \frac{km}{h}, m \right] \quad (6.7)$$

$$\omega_{el} = n_{náprava} \times p \times \frac{2 \times \pi}{60} \times p_p \left[ \frac{rad}{s}, \frac{ot}{min}, -, - \right] \quad (6.8)$$

$n_{\text{náprava}}$  ... otáčky nápravy [ot/min]  
 $v$  ... rychlost tramvaje [km/h]  
 $\omega_{el}$  ... elektrická úhlová rychlost [rad/s]  
 $p$  ... převod převodovky 6,8406 [-]  
 $p_p$  ... počet pólpárů 2 [-]

$$P_{TRA} = \frac{\omega_{el}}{p_p} \times M \left[ W, \frac{rad}{s}, Nm, - \right] \quad (6.9)$$

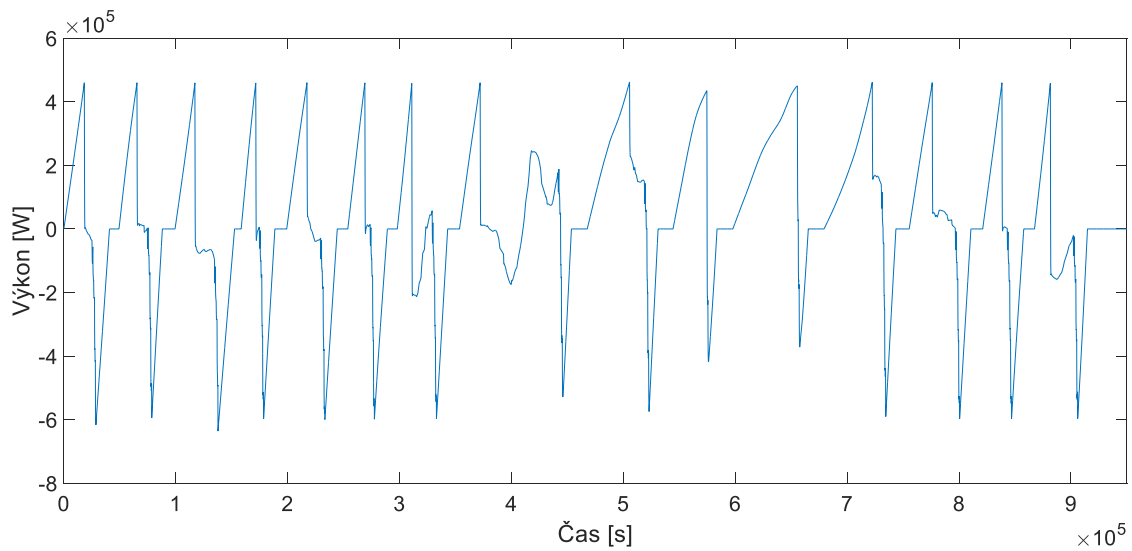
Na následujícím Obr. 11 je blokové schéma části trakční mechaniky.



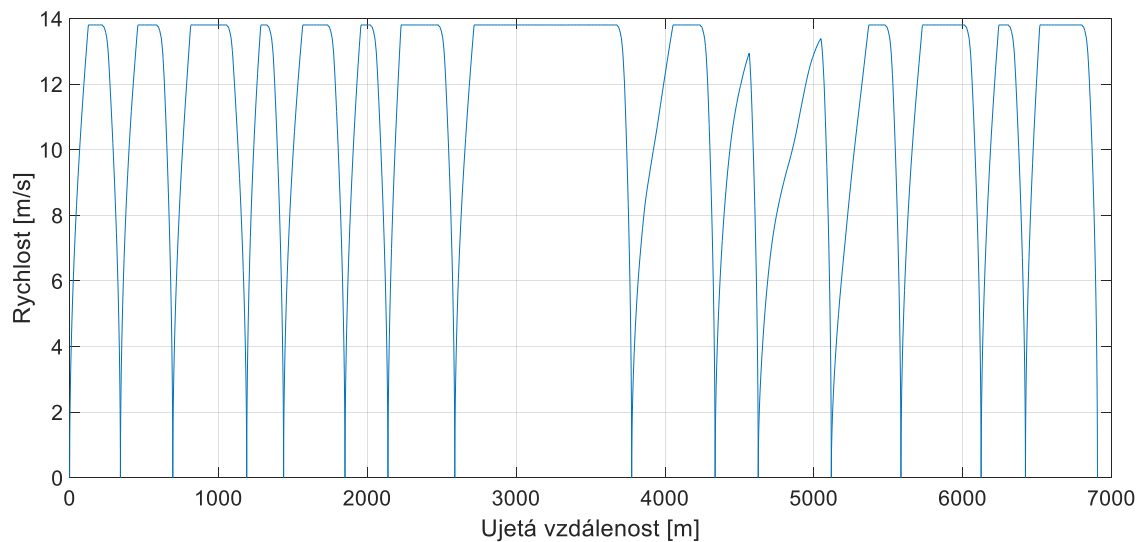
Obr. 11 Blokové schéma části trakční mechaniky

## 6.4 Výstupní data ze simulace zjednodušeného kinematického modelu tramvajového vozidla

V této části práce jsou uvedeny nejdůležitější výstupní průběhy z výše popsané simulace. Hmotnosti tramvaje činí 35,05 t, což odpovídá 154 cestujících osob a řidiči. Hmotnost osob se uvažuje 70 kg. Zvolené hodnoty odpovídají střednímu zaplnění tramvaje 5 osob/m<sup>2</sup>. Na Obr. 12 je průběh  $P_{TRA}$  v závislosti na čase. Na Obr. 13 je průběh rychlosti v závislosti na dráze.

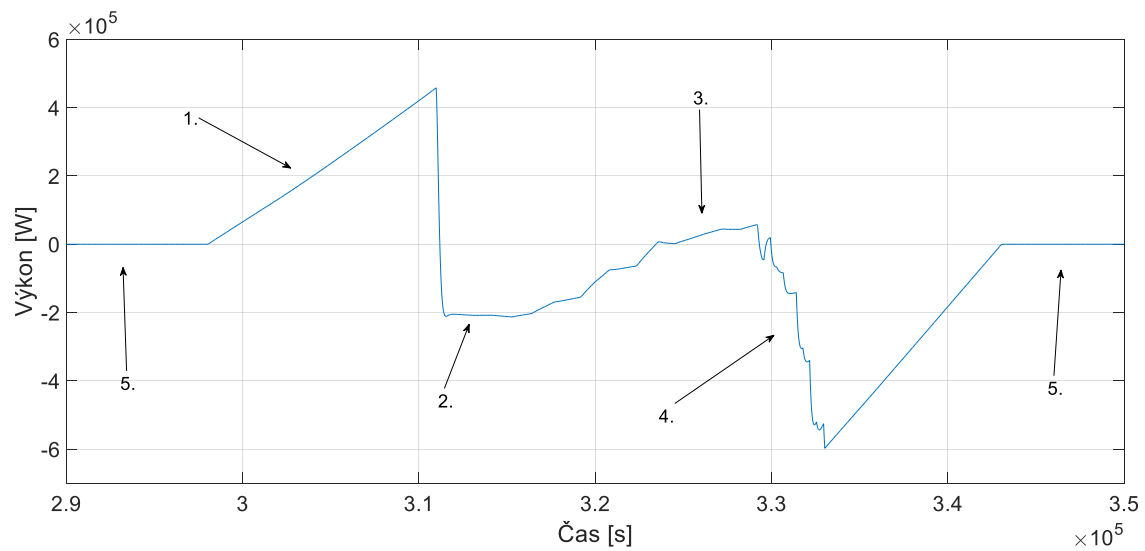


Obr. 12 Průběh výkonu na čase



Obr. 13 Průběh rychlosti na ujeté vzdálenosti

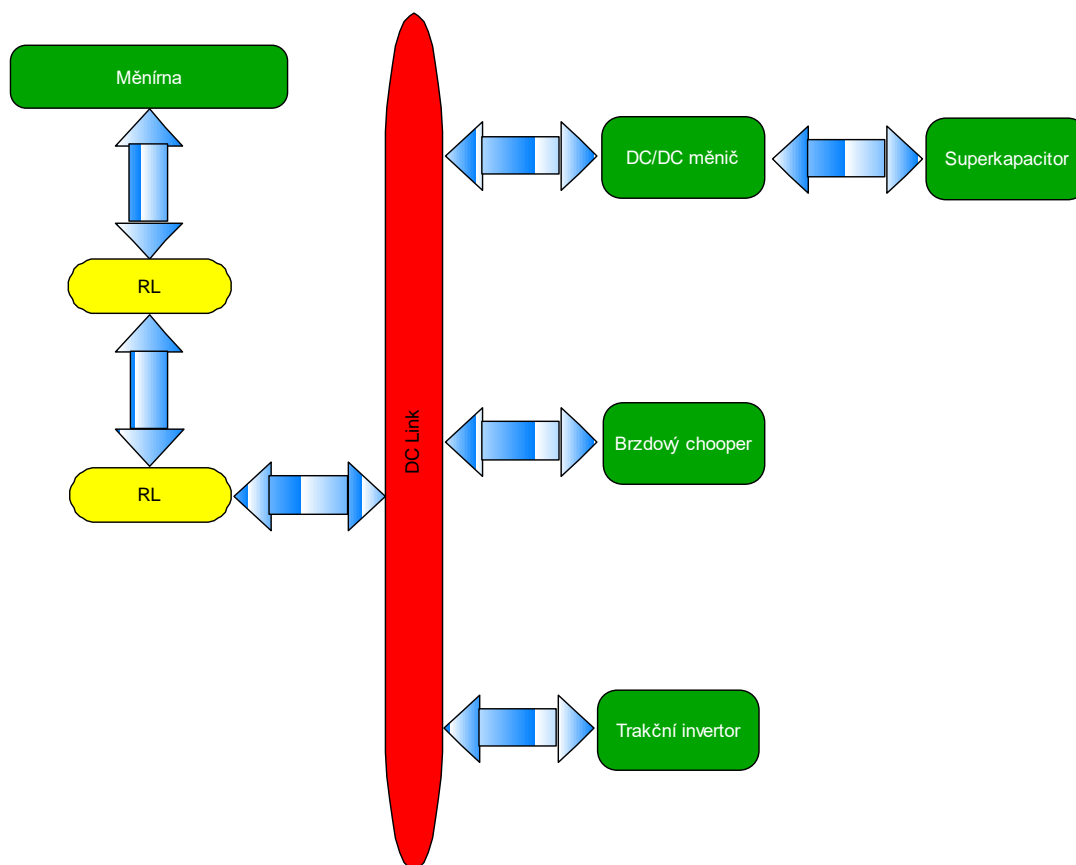
Pro detailnější pohled na průběhy je na *Obr. 14* detailní výřez průběhu výkonu v závislosti na čase mezi zastávkou U Práce a Sady Pětařicátníků. Šipka č. 1 směřuje na část, kdy tramvaj zrychluje. Č. 2 je část, kdy jede tramvaj s takovým sklonem, kdy sama generuje energii. V 3. části jede tramvaj stále se sklonem, ale ten již nestačí na udržení rychlosti 13,8 m/s, a proto je třeba znovu čerpat energii z troleje. Ve 4. části je požadavek na brzdou. Tramvaj zpomaluje a opět generuje energii. Šipky č. 5 směřují na oblast, kdy tramvaj vyčká na zastávce.



Obr. 14 Výřez průběhu výkonu na čase mezi zastávkou U Práce, Klatovská a V sadech Pětatřicátníků

## 7 Model výkonového obvodu tramvaje se superkapacitorem

Výkonový obvod tramvaje se skládá z několika částí. Blokové schéma je na *Obr. 15*. Výkonový obvod byl vytvořen v programu Matlab/PLECS.



*Obr. 15* Blokové schéma výkonového obvodu

Pro každý elektrický stroj je důležitý zdroj elektrické energie. V blokovém schématu označován pod názvem měnírna. Napětí měřírny je 600 V. První RL blok zastupuje impedanci vedení a v případě simulace je pro zjednodušení vzdálenost tramvajového vozidla od měřírny konstantně 1 km. Měrný odpor vedení je 0,08  $\Omega$ /km (podle [4]) a měrná indukčnost vedení je 1 mH/km. Druhý RL blok je vstupní filtr samotné tramvaje. Důležitým blokem z hlediska akumulárního systému je DC/DC měnič. Slouží k přelévání energií ze superkondenzátoru do DC linku a naopak, podle situace. Tím je na mysli, zda se má rekuperovat nebo pokrýt potřeba energie. Blok brzdový chopper funguje následovně. Pokud tramvaj rekuperuje, např. při jízdě z kopce, vytvořená energie se může uložit v akumulárním systému anebo ji může využít tramvaj blížká ve stejném napájecím úseku. V situaci, kdy akumulární systém není přítomný nebo nemůže pojmout více



energie a v napájecím úseku není tramvaj, která by energii využila, začne se zvedat napětí na DC linku. Při překročení určité hranice, v případě simulace je hranice rovna 800 V, uvede se ve funkci právě zmíněný brzdový chopper a energie se začne mařit v odporníku. Chopper je sepnutý do doby, dokud napětí neklesne pod určitou úroveň, v simulaci 760 V. Posledním blokem je trakční invertor, který simuluje odběr trakčního ústrojí.

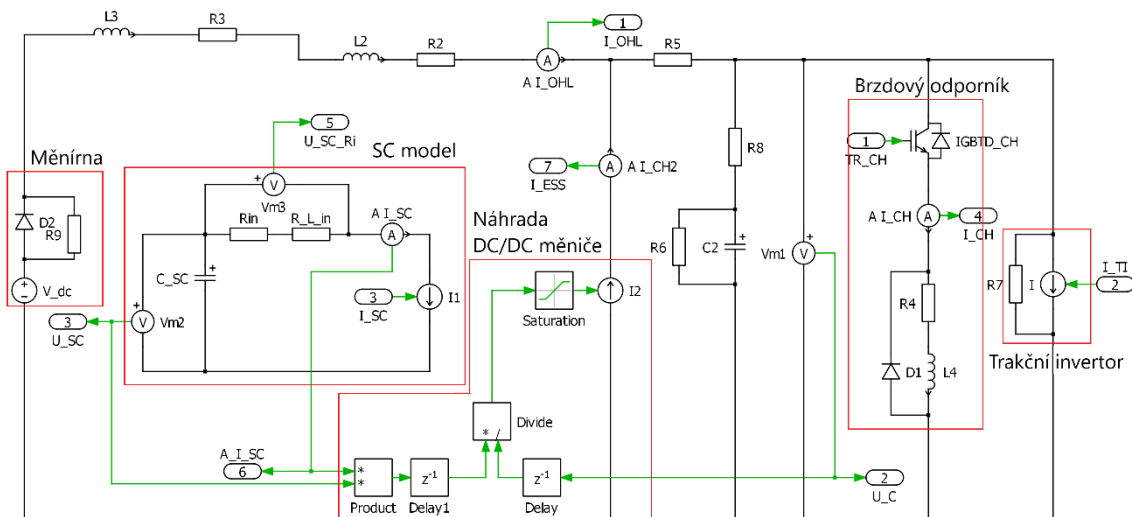
## 7.1 Řízení modelu

Samotný model by samozřejmě nefungoval bez odpovídajících vstupů a výstupů. Blok měniřna je v modelu zastoupen zdrojem stejnosměrného napětí o hodnotě 600 V. Proud odebíraný z troleje se značí  $I_{OHL}$ . DC link je simulován kondenzátorem s počáteční podmínkou, kdy je napětí na DC linku rovné 600 V.

Z předešlého modelu se používají data průběhu výkonu odebíraného motorem. Blok trakční invertor je simulován pomocí řízeného proudového zdroje. Pro získání průběhu odebíraného proudu trakčním invertorem  $I_{TI}$  je nutné výkon  $P_{TRA}$  získaný z kinematického modelu, dělit napětím DC linku. Dělení konstantními 600 V by bylo chybou, protože napětí na DC linku se vzrůstajícím zatížením klesá. S tím roste odebíraný proud z troleje a rovněž rostou i ztráty. Výsledkem je tedy požadovaný proud trakčního invertoru  $I_{TI}$ .

Akumulační prvek, použitý v této simulaci, bude popsán v kapitole 7.4. O řízení toku energie akumulacího systému rozhoduje blok „Power managment“, popsáný v kapitole 7.3. Strategie, jak řídit tok energie, byly popsány v kapitole 1.

Blok měniče je řešen dvěma způsoby. Detailní model je založen na topologii paralelního nezávislého DC/DC měniče. Je mu věnována vlastní kapitola. Z důvodu časové náročnosti simulací detailního modelu byl vytvořen i zjednodušený model. Elektrické schéma je na obr *Obr. 16*.



Obr. 16 Elektrické schéma zjednodušeného modelu

S tímto modelem je odsimulován průběh celé trati pro různý počet modulů superkondenzátoru a pro různé strategie řízení. Měnič je ve zjednodušeném modelu nahrazen proudovým zdrojem, požadavek na proud akumulčního systému  $I_{ESS}$  je získán matematicky z rovnosti výkonů dle vztahu (7.1). Požadavek na proud superkondenzátorem  $I_{SC}$  je součet požadovaných proudů z bloku „Power managment“ a bloku „stabilizace LC filtru“.

Blok „stabilizace LC filtru“ je nutný ke stabilizaci vstupního filtru a využívá k tomu akumulční systém. Detailnější popis principu je v následující kapitole 7.2.

$$I_{SC} \times U_{SC} = I_{ESS} \times U_C \quad (7.1)$$

$$I_{ESS} = \frac{I_{SC} \times U_{SC}}{U_C}$$

$I_{ESS}$  ... proud akumulčního systému

$I_{SC}$  ... proud superkapacitorem

$U_{SC}$  ... napětí na superkapacitoru

$U_C$  ... napětí DC linku

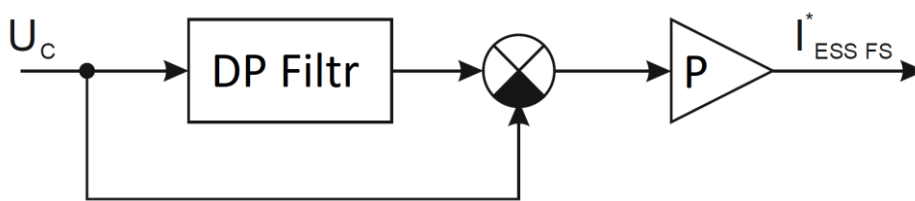
## 7.2 Stabilizace LC filtru [9]

Vstupní filtr je v trakčních vozidlech z důvodu problematiky EMC a správné funkce napěťového střídače. Jeho přítomnost zajišťuje ochranu před poškozením elektrických nebo mechanických částí. Pokud nedojde k útlumu kmitů, vzniklé napětí může poškodit DC link nebo spínací zařízení. Z toho důvodu používají tramvaje předpěťovou a podpěťovou ochranu. Stabilizace může být pasivní i aktivní. K pasivní stabilizaci může

docházet i pomocí brzdového odporu. Nevýhodou těchto pasivních řešení je jejich nižší účinnost v porovnání s aktivním řešením.

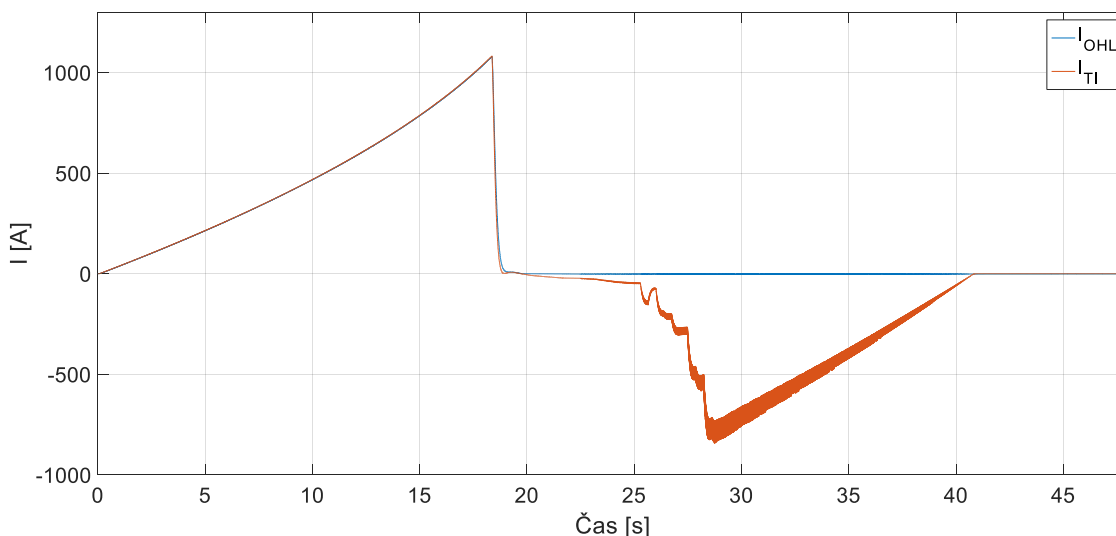
Mezi tato aktivní řešení spadá tlumení kmitů pomocí proudu akumulčního systému  $I_{ESS}$ . Pokud není přítomný žádný „Power management“, požadavek na proud z akumulčního systému  $I_{ESS}$  se rovná požadavku proudu z bloku „Stabilizace LC filtru“  $I_{ESS FS}$ . Naopak, pokud „Power management“ přítomný je a vychází z něj požadavek na proud  $I_{ESS PM}$ , pak je  $I_{ESS}$  součet proudu  $I_{ESS FS}$  a  $I_{ESS PM}$ .

Blokové schéma na Obr. 17 obsahuje filtr typu dolní propust. Filtrem prochází změny napětí na troleji, způsobené proudovým zatížením. Zlomová frekvence filtru je optimalizována na rezonanční frekvenci vstupního LC filtru. Výstupní napětí filtru má opačnou polaritu, protože se od něj odečítá původní napětí  $U_C$ . Pak je násobeno proporčním regulátorem. Výsledkem je požadovaný proud opačné polarity, než jsou oscilace.

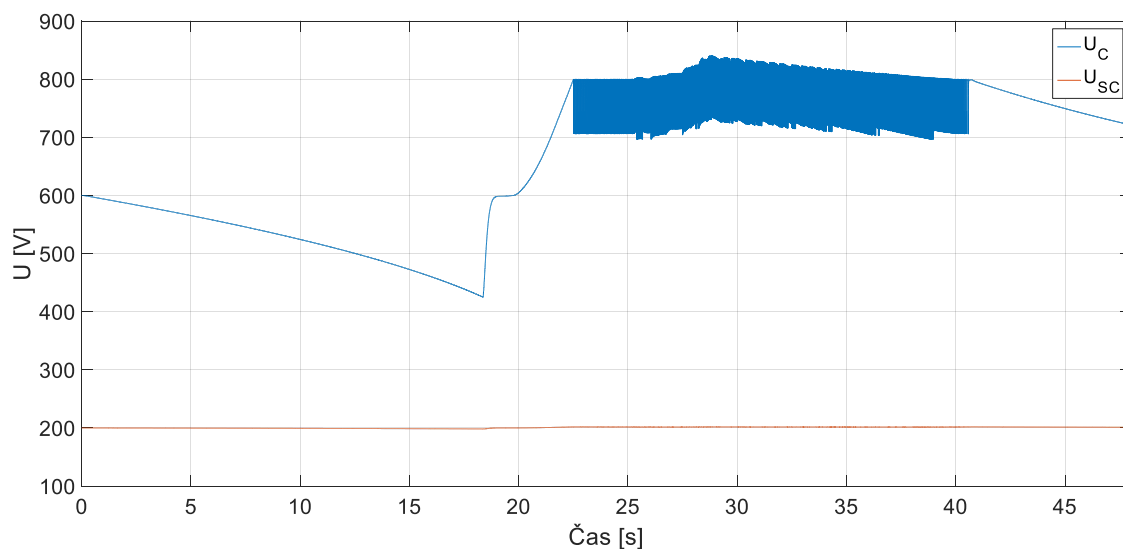


Obr. 17 Blokové schéma stabilizace LC filtru

Na Obr. 18 a Obr. 19 je v simulaci stabilizace povolena a stabilizační proud  $I_{ESS FS}$  ovládá akumulční systém pro potlačení kmitů. Na Obr. 20 a Obr. 21 je stabilizace vypnuta. Uvedené průběhy jsou získány ze zjednodušeného modelu, kdy je namísto DC/DC měniče použit proudový zdroj.

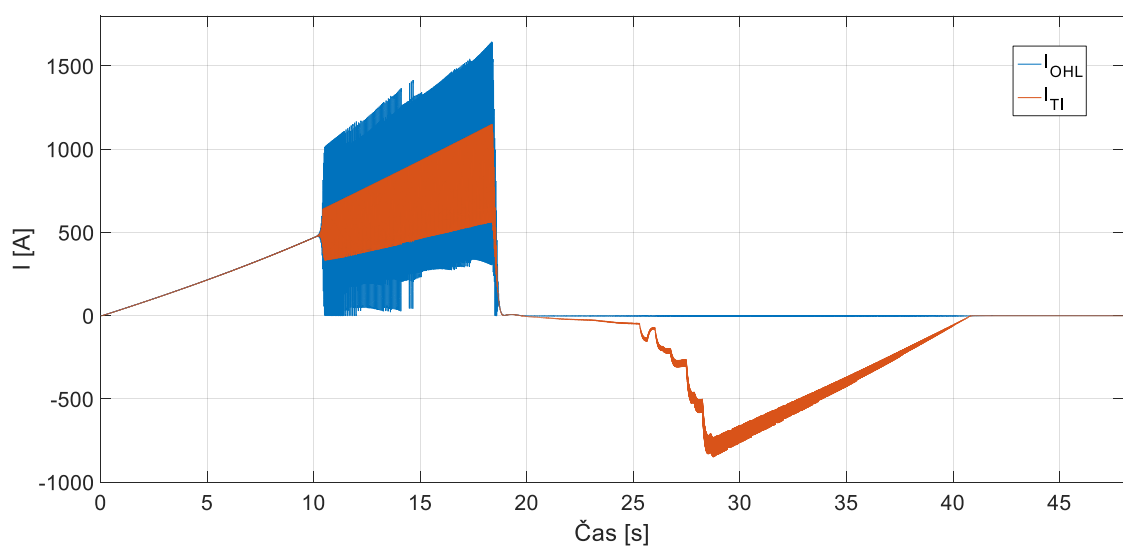


Obr. 18 Průběh proudu troleje a proudu trakčního invertoru s aktivní stabilizací

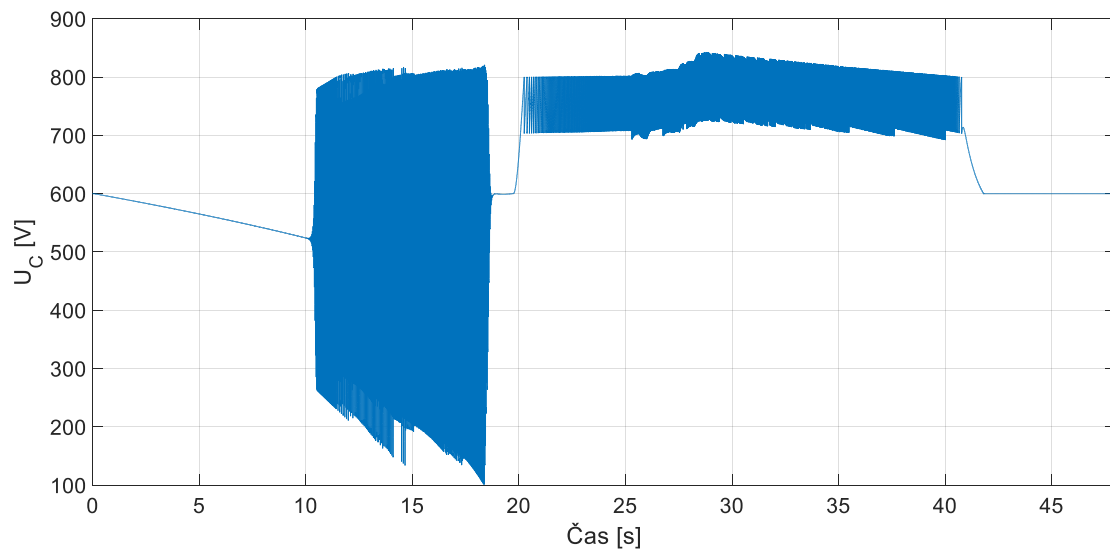


Obr. 19 Napětí DC Linku a napětí superkondenzátor při aktivní stabilizaci

Při aktivní stabilizaci odebíraný proud z troleje  $I_{OHL}$  kopíruje potřebný proud trakčního invertoru  $I_{TI}$ . V čase 20 s začne stoupat napětí DC linku z důvodu otočení toku energie. Rekuperace je zakázána,  $I_{OHL}$  je tedy rovno nule. Pokud napětí dosáhne meze 800 V, energie je mařena v brzdovém odporníku. Napětí na superkondenzátoru nepatrně kolísá vlivem jeho stabilizační funkce.



Obr. 20 Průběh proudu troleje a proudu trakčního invertoru s neaktivní stabilizací



Obr. 21 Napětí DC Linku při neaktivní stabilizaci

Při neaktivní stabilizaci dochází po uplynutí 10 s k netlumeným kmitům. Napětí DC linku se v tyto momenty nachází mezi 100 V a 830 V.

### 7.3 Blok Power management

Hlavní funkcí bloku je řízení toku energie akumulčního systému. Vstupem je požadovaný trakční výkon. Výstup se odvíjí od zvolené strategie řízení.

U strategie omezení špičkových proudů se nejdříve zjišťuje, zda je odebíraný trakční výkon  $P_{TR}$  nad mezí odebíraného výkonu  $P_{MEZ}$ . Při splnění podmínky je požadavek na hrazení výkonu akumulčním systémem  $P_{ESS}$  roven rozdílu  $P_{TR}$  a  $P_{MEZ}$ . Výkon  $P_{ESS}$  je poté dělen napětím  $U_{SC}$  a výstupem je požadovaný proud superkondenzátorem  $I_{SC}$ .

Proporční strategie je velmi jednoduchá. Potřebný výkon  $P_{ESS}$  je získán součinem  $P_{TR}$  a zvolené proporční konstanty  $k_P$ .

Strategie průměrného výkonu je podobná proporční strategii. Rozdíl je v činitelích součinu. Figuruje zde opět proporční konstanta  $k_{PAVG}$ . Druhým členem je průměrný výkon potřebný k absolvování celé tratě  $P_{AVG}$ .  $P_{ESS}$  je pak roven rozdílu  $P_{TR}$  a součinu.

### 7.4 Akumulační prvek použitý v simulaci



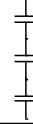

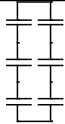
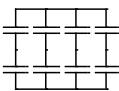
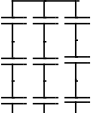
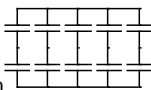
Akumulační prvek je tvořen superkondenzátory. Parametry jsou založeny na reálném modulu BMOD0063 P125 od firmy Maxwell Technologies. Detailní informace jsou obsaženy v [8]. Tab. 5 obsahuje základní parametry jednoho modulu, se kterými pracoval i výkonový model. Modul je určen přímo pro použití v trakci a je pro ni i certifikován.

Tab. 5 Základní parametry modulu Maxwell BMOD0063 P125

| Maxwell BMOD0063 P125 |             |    |
|-----------------------|-------------|----|
| Jmenovitá kapacita    | 63          | F  |
| Jmenovité napětí      | 125         | V  |
| ESR                   | 18          | mΩ |
| Délka x Šířka x Výška | 619x425x266 | mm |
| Hmotnost              | 60,5        | kg |

Celkem se modul skládá ze 48 článků. Pro co nejdělsí životnost je důležité udržovat napětí modulu v určitých mezích. Horní hranice je určena maximálním možným napětím článků. Spodní hranice je polovina maximálního napětí. Pro jeden modul je tedy rozmezí provozního napětí od 63 V do 125 V. V simulaci je tato kontrola dodržena.

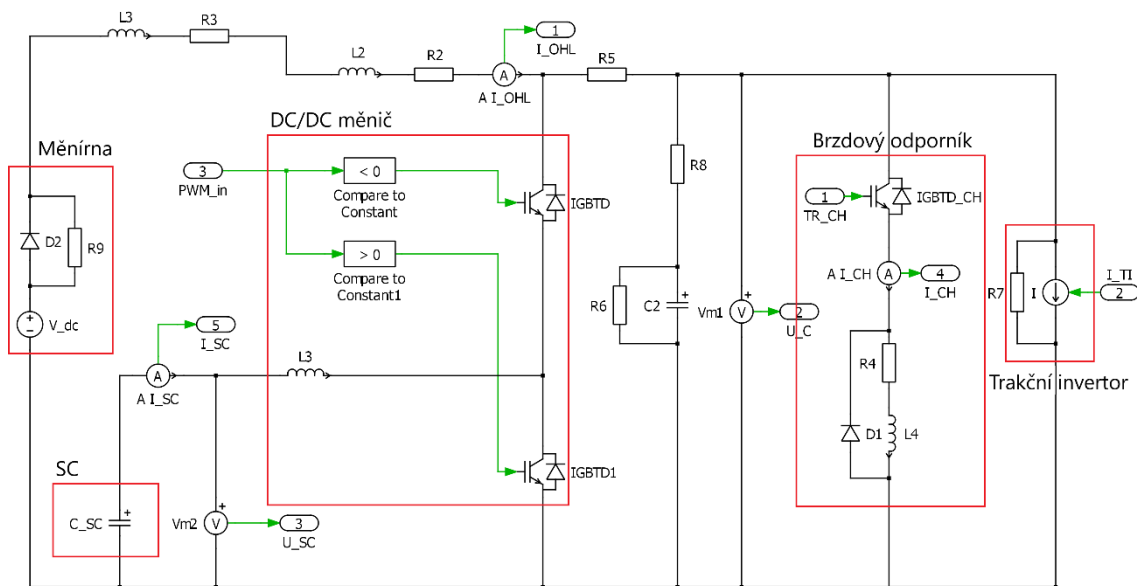
Pro zvolenou strategii řízení akumulčního systému byl vždy různý počet  $n$  modulů. Jejich sérioparalelní řazení se základními parametry je na *Obr. 22*. Maximální počet modulů v sérii je 3 z důvodu napětí DC linku. Při dalším modulu by mohlo napětí DC linku klesnout pod napětí akumulčního systému a topologie použitého měniče to neumožňuje.

|   |  |   |
|---|--|---|
| $n = 1$<br>$U = 125 \text{ V}$<br>$C = 63 \text{ F}$<br>$R_{in} = 18 \text{ m}\Omega$  | $n = 2$<br>$U = 250$<br>$C = 31.5 \text{ F}$<br>$R_{in} = 36 \text{ m}\Omega$     | $n = 3$<br>$U = 375$<br>$C = 21 \text{ F}$<br>$R_{in} = 54 \text{ m}\Omega$  |
| $n = 4$<br>$U = 250$<br>$C = 63 \text{ F}$<br>$R_{in} = 18 \text{ m}\Omega$            | $n = 6$<br>$U = 375$<br>$C = 42 \text{ F}$<br>$R_{in} = 27 \text{ m}\Omega$       | $n = 8$<br>$U = 250$<br>$C = 126 \text{ F}$<br>$R_{in} = 9 \text{ m}\Omega$  |
| $n = 9$<br>$U = 375$<br>$C = 63 \text{ F}$<br>$R_{in} = 18 \text{ m}\Omega$            | $n = 10$<br>$U = 250$<br>$C = 157.5 \text{ F}$<br>$R_{in} = 7.2 \text{ m}\Omega$  |   |

*Obr. 22* Sérioparalelní řazení SC s parametry

## 7.5 Detailní model s DC/DC měničem

Detailní model zahrnuje všechny bloky jako model zjednodušený. Jeho odlišnost je v reálnějším pojetí přesunu energie z akumulčního systému do DC linku a naopak. Pro spínání tranzistorů je nutný velmi malý krok simulace a z toho plyne i časová náročnost jedné takové simulace. Elektrické schéma na obr *Obr. 23*.



Obr. 23 Elektrické schéma detailního modelu

Vstupním parametrem pro generátor PWM k ovládní DC/DC měniče je požadovaný proud akumulčního systému  $I_{ESS}$ . Podobně jako v předchozím případě se  $I_{ESS}$  skládá ze stabilizačního proudu  $I_{ESS FS}$  a proudu z bloku „Power managment“  $I_{ESS PM}$ . Z (7.2) popisující rovnost výkonu na obou stranách měniče lze odvodit požadovaný proud superkondenzátorem  $I_{SC}^*$ . [9]

$$I_{SC} \times U_{SC} = I_{ESS} \times U_C \quad (7.2)$$

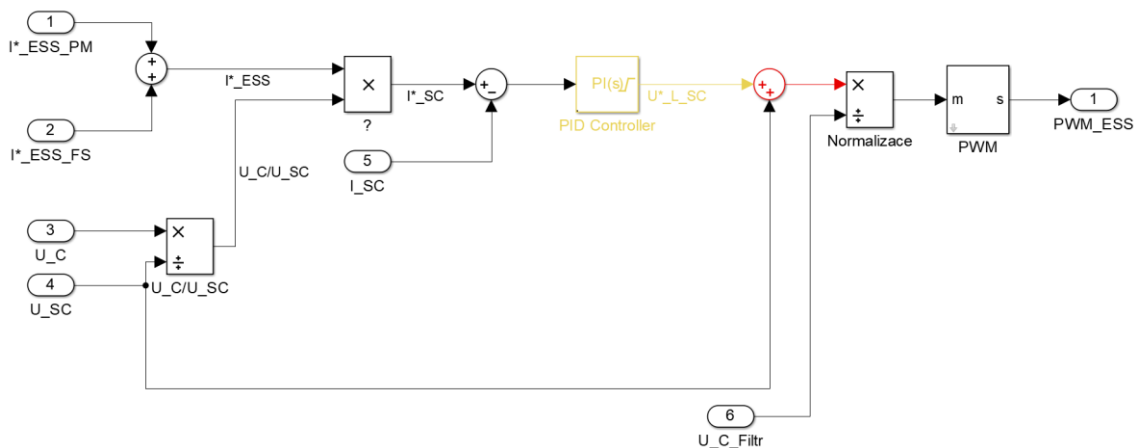
$I_{SC}$  ... proud superkapacitorem

$U_{SC}$  ... napětí superkapacitoru

$I_{ESS}$  ... proud akumulčního systému

$U_C$  ... napětí DC linku

Požadovaný proud  $I_{SC}^*$  je poté v rozdílovém bloku porovnán se skutečným proudem  $I_{SC}$ . Následně je použit PI regulátor, jehož výstupem je požadované napětí na indukčnosti měniče  $U_{LSC}$ . Pro správnou funkci je zapotřebí k tomuto napětí přičíst napětí  $U_{SC}$ . Tak vznikne správné napětí na straně měniče s akumulčním systémem. Předposledním krokem je normalizace tohoto napětí pomocí napětí  $U_{C Filt}$  z bloku „Stabilizace LC“. Takto normalizované napětí je použito pro generaci PWM signálů. Signál je použit k ovládní spínání tranzistorů v DC/DC měniči. Pro přehlednost je na Obr. 24 zobrazeno blokové schéma výše popsané funkce. [9]



Obr. 24 Generátor PWM pro DC/DC měnič

## 7.6 Výkony a energie

Konečné vyhodnocení se bude zakládat na bilanci energií. Tato kapitola slouží k jejich popisu a rozboru jejich složek. Simulace se zaměřuje na případ, kdy je četnost tramvajových vozidel na trati velmi nízká, tudíž pro zakázanou rekuperaci.

### 7.6.1 Energie spotřebovaná Es

Energie spotřebovaná je integrací spotřebovávaného výkonu z troleje. Výkon je součin napětí DC linku  $U_C$  a proudu troleje  $I_{OHL}$ . Takto získaný výkon je nutno podělit jmenovitou účinností tramvaje  $\eta$  a vynásobit koeficientem respektujícím účinnost tramvaje při rozjezdu a brzdění  $\varepsilon$ , viz vztah (7.3) a (7.4). Koeficient  $\varepsilon$  vychází z [2] a liší se podle místa provozu nebo druhu trakčního motoru. K výkonu se přičítá ještě střední výkon pomocných motorů 4 kW. Jeho velikost je odvozena z [10]. Jmenovitá účinnost  $\eta$  zahrnuje účinnost převodovky, trakčního motoru a trakčního střídače.

$$P_S = \frac{U_C \times I_{OHL} \times \varepsilon}{\eta} + P_P [W, V, A -] \quad (7.3)$$

$P_S$  ... spotřebovaný výkon z troleje [W]

$U_C$  ... napětí DC linku [V]

$I_{OHL}$  ... proud trolejí [A]

$\varepsilon$  ... koeficient respektující účinnost tramvaje při rozjezdu a brzdění

(1,3)

$\eta$  ... jmenovitá účinnost tramvaje (0,8)

$$E_S = \int P_S dt [Ws, W] \quad (7.4)$$

$E_S$  ... energie spotřebovaná z troleje [W]



### 7.6.2 Energie mařena v brzdovm odporníku $E_{CHOP}$

Energie mařena v odporníku  $E_{CHOP}$  je integrací vykonu na brzdovm odporu. Vykon se získá součinům napětí DC linku  $U_C$  a proudem skrze brzdov odporník  $I_{CHOP}$ , viz vztah (7.5).

$$E_{CHOP} = \int U_C \times I_{CHOP} dt [Ws, V, A] \quad (7.5)$$

$E_{CHOP}$  ... energie splen v brzdovm odporníku [Ws]

$U_C$  ... napětí DC linku [V]

$I_{CHOP}$  ... proud brzdovm odporníkem [A]

### 7.6.3 Energie akumulovan do superkapacitoru $E_{ASC}$

Energie akumulovan do superkondenzátoru  $E_{ASC}$  je integrací vykonu, kter nabíjí superkondenzátory. V simulaci je vypočten součinům proudu superkondenzátorem  $I_{SC}$  a napětím na superkapacitoru  $U_{SC}$ . Nejsou zde zahrnuty ztráty, kter vznikají prchodu proudu, ty jsou potny samostatn. Vztah pro vypoet je (7.6).

$$E_{EAS} = \int U_{SC} \times I_{SC} dt [Ws, V, A] \quad (7.6)$$

$E_{EAS}$  ... energie akumulovan do superkapacitoru [Ws]

$U_{SC}$  ... napětí superkapacitoru [V]

$I_{SC}$  ... proud superkapacitorem [A]

### 7.6.4 Energie dodan superkapacitorem do DC linku $E_{PSC}$

K této energii se dopravuje podobn jako v předchozí kapitole s rozdílem opačného znaménka. Pot se zvlst s ohledem na poaten nabit superkondenzátoru. Jejich rozdíl je  $\Delta E_{SC}$ .

### 7.6.5 Energie ztrtov $E_J$

Energie ztrtov  $E_J$  je energie zahrnující tepeln ztráty a vychází z vykonu vznikajícím na vnitrnm odporu superkondenzátoru a indukčnosti v mni. Vykon je součinů odporu superkondenzátoru v srii s indukčností a kvadrátu proudu jimi protékajícím  $I_{SC}$ . Vypoet je obsažen v (7.7). Přestože je ve zjednodušenm modelu mni nahrazen proudovm zdrojem, vnitrn odpor indukčnosti byl zahrnut pro realistitj

výsledky. Zatímco ESR superkapacitorů se mění v závislosti na zapojení a počtu modulů,  $R_{L\_IN}$  byl teoreticky určen podle maximální tepelné ztráty.

$$E_J = \int R \times I_{SC}^2 dt [Ws, V, A] \quad (7.7)$$

$E_J$  ... Joulova energie [Ws]

$R$  ... vnitřní odpor superkapacitoru a indukčnosti [ $\Omega$ ]

$I_{SC}$  ... proud superkapacitorem [A]

## 8 Výsledky simulovaných strategií

Simulace byly prováděny s n moduly superkondenzátorů pro různé typy popsaných strategií. Kvůli kroku simulace byla zvolena náhrada za DC/DC měnič ve formě řízeného proudového zdroje. Následující kapitoly prezentují výsledky úspor v grafické i tabulkové formě se slovním komentářem pro dané strategie.

Hlavním ukazatel úspory je poměr spotřebované energie  $E_S$  s akumulacním prvkem ku spotřebované energii  $E_S$  bez akumulacního prvku, vyjádřený v procentech. Spotřebovaná energie s akumulacním systémem v sobě zahrnuje  $\Delta E_{SC}$ . Pro narůstající počet modulů byl také upravován potřebný trakční výkon z kinematického modelu. Úprava spočívala v navýšení hmotnosti tramvaje právě o hmotnost použitých modulů.

Všechny strategie byly odsimulovány pro zakázanou rekuperaci. Výsledky simulací tedy cílí na tratě s nízkou hustotou provozu. V Tab. 6 jsou uvedeny referenční hodnoty simulace s akumulacním systémem sloužícím pouze ke stabilizaci se zakázanou rekuperací pro střední obsazení 5 osob/m<sup>2</sup>.

Vnitřní odpor superkondenzátoru byl dopočítán dle zvolené topologie řazení a k tomu byl přičten vnitřní odpor tlumivky v měniči.

Všechny výstupní energie pro zmíněné strategie jsou uvedeny v příloze 1.

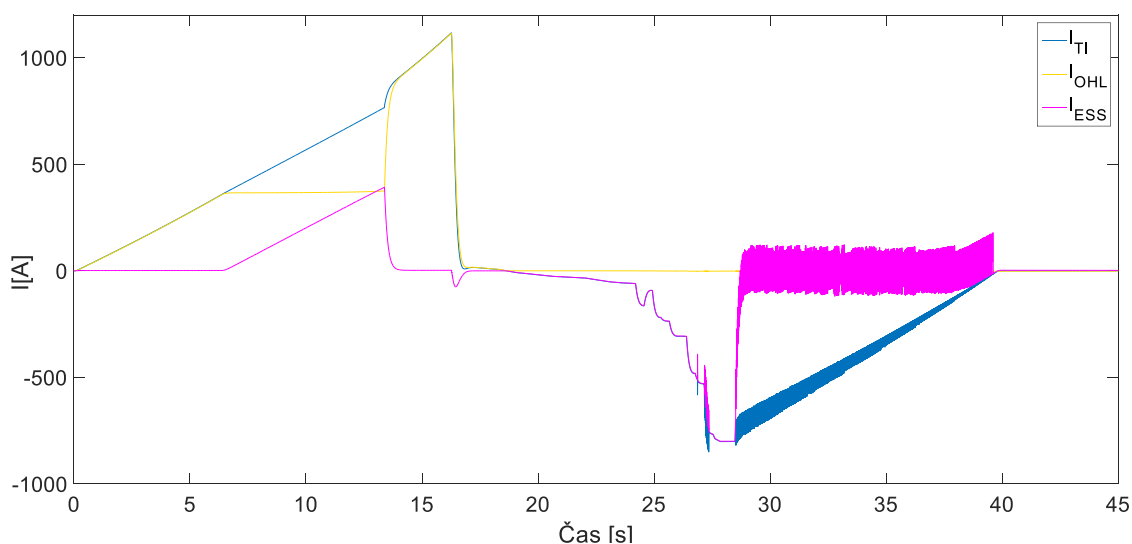
Ztráty na vedení počítány nejsou, pro jejich vysokou závislost na počtu tramvajů v napájecím úseku a proměnném odporu trolejí v závislosti na vzdálenosti tramvaje od měničny. Měničny navíc mohou být vzdálené od trakčního vedení, na kterém tedy také vznikají další ztráty. Úseky napájené z měničny jsou často různě rozmístěné a dlouhé. Závislost na všech těchto proměnných je příliš vysoká a nevyplatí se je ani odhadovat. Proto je důležité výsledky simulace vnímat s vědomím výše uvedeného.

Tab. 6 Hodnoty simulace s akumulacním systémem sloužícím pouze ke stabilizaci se zakázanou rekuperací

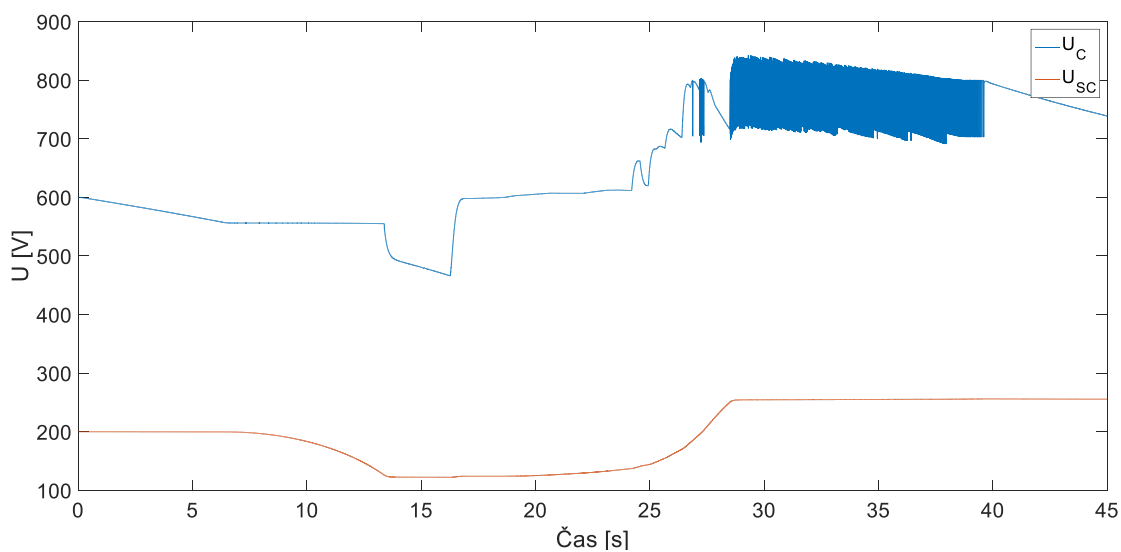
| Rekuperace zakázána bez ESS            |       |
|--|-------|
| Energie spotřebovaná $E_S$ [kW]        | 43,34 |
| Energie mařena $E_{CHOP}$ [kW]         | 16,57 |
| Energie dodána SC $E_{ASC}$ [kW]       | 1,77  |
| Energie spotřebována SC $E_{PSC}$ [kW] | 1,94  |
| Energie ztrátová $E_J$ [kW]            | 0,21  |
| $\Delta E_{SC}$ [%]                    | 0,17  |

## 8.1 Omezení špičkových proudů

Na *Obr. 25* je výřez simulace pro lepší představu o průběhu proudu trakčního vedení  $I_{OHL}$ , proudu trakčního invertoru  $I_{TI}$  a proud akumulčního systému  $I_{ESS}$ . Na *Obr. 26* je zobrazené napětí kondenzátoru  $U_{SC}$  a napětí DC linku  $U_C$ . Výkonová mez je v tomto případě nastavena na 200 kW a počet modulů je 4. Při poklesu napětí superkondenzátoru na polovinu nominální hodnoty je patrný skokový pokles napětí DC linku. V tomto případě kapacita modulu s takto nastavenou výkonovou mezí nestačí na pokrytí celé proudové špičky. Naopak při dosažení maximální jmenovité kapacity superkondenzátoru při brzdění se uvede v chod brzdový odporník a je patrné kmitání napětí DC linku. Výsledné energie se zvolenou strategií mají v dolním indexu příponu PS pro lepší rozlišení, např.  $E_{SPS}$ .



*Obr. 25 Omezení špičkových proudů – zobrazení  $I_{TI}$ ,  $I_{OHL}$ ,  $I_{ESS}$*

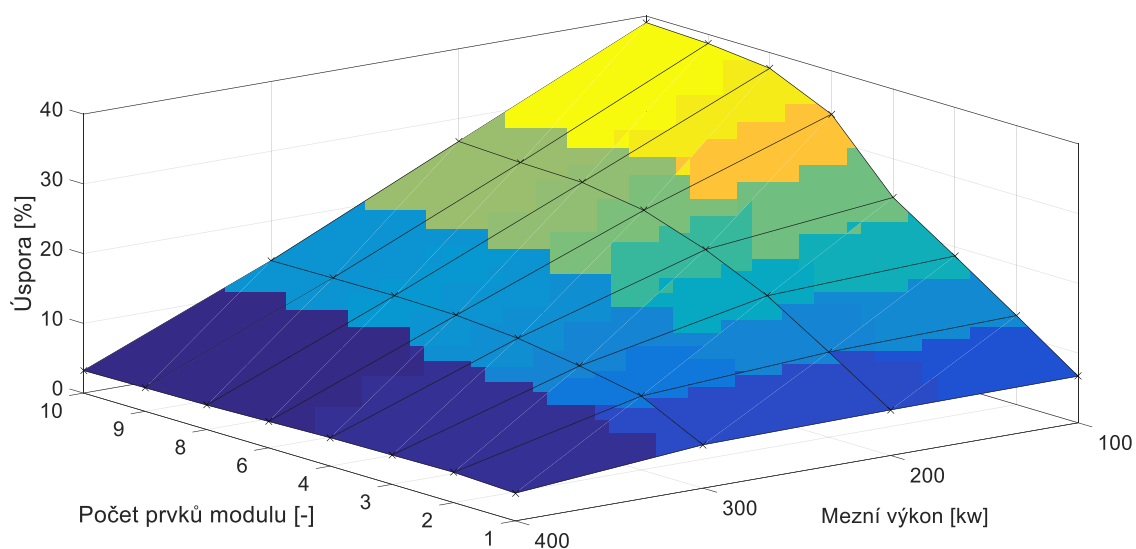


*Obr. 26 Omezení špičkových proudů – zobrazení  $U_C$ ,  $U_{SC}$*

V Tab. 7 je spočtena úspora z poměru spotřebovaných energií  $E_{SPS}/E_S$  vyjádřená v procentech. To je pak vyneseno do grafu na Obr. 27. Z tabulky je patrná úspora až 39,06 % při nastavení meze špičkového odběru 100 kW a 10 modulů. Tak vysoký počet modulů však naráží na ekonomickou stránku věci. Při ceně přibližně 141 000 Kč dle [12] za jeden modul by bylo nasazení do více tramvajových vozidel v počtu 10 kusů značně nevýhodné a návratnost této investice je s ohledem na životnost modulů nulová.

Tab. 7 Úspora proti systému bez akumulčního systému se zakázanou rekuperací

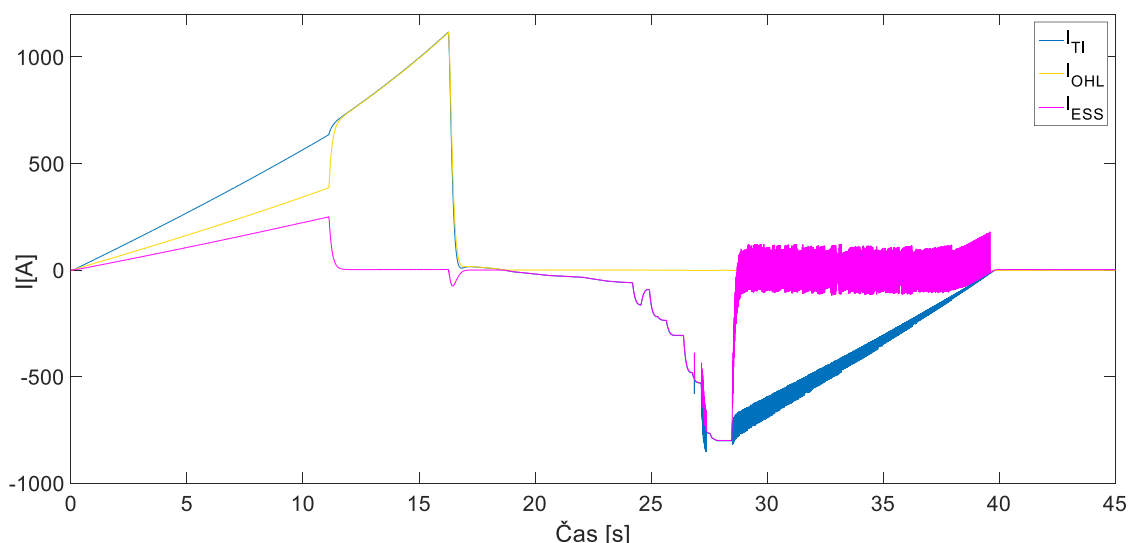
| Poměr $E_{SPS}/E_S$ [%] | Hodnota meze [kW] |       |       |      |
|-------------------------|-------------------|-------|-------|------|
| Počet modulů SC [n]     | 100               | 200   | 300   | 400  |
| 1                       | 6,69              | 6,53  | 6,21  | 3,97 |
| 2                       | 12,76             | 12,21 | 10,59 | 4,34 |
| 3                       | 18,69             | 17,67 | 12,30 | 4,20 |
| 4                       | 24,46             | 21,67 | 13,64 | 4,06 |
| 6                       | 33,78             | 24,69 | 14,33 | 3,78 |
| 8                       | 37,75             | 26,07 | 14,51 | 3,51 |
| 9                       | 38,69             | 26,30 | 14,42 | 3,37 |
| 10                      | 39,06             | 26,72 | 14,31 | 3,23 |



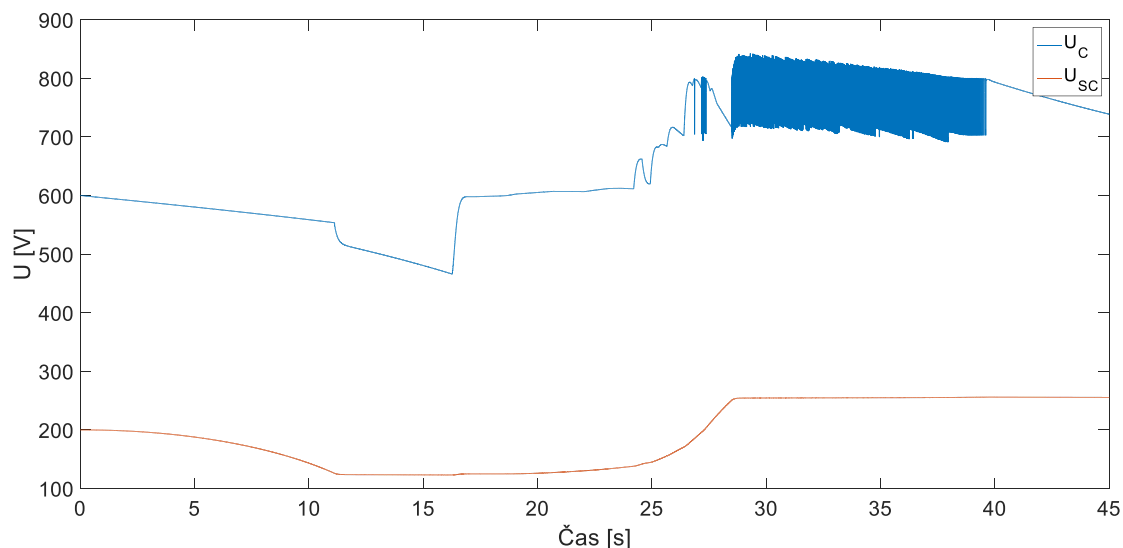
Obr. 27 Úspora při omezení špičkových odběrů – poměr  $E_{SPS}/E_S$  v procentech

## 8.2 Proporční strategie

Na Obr. 28 a Obr. 29 je pro ukázkou kratší časový úsek zobrazující princip popisované strategie podobně jako v přechodí kapitole. Tento případ je pro 4 akumulční moduly a proporční konstantu rovnou 0,4. Akumulční systém tedy hraje nula celá čtyřnásobek požadovaného výkonu  $P_{TRA}$ . Opět se ukazuje, že kapacita akumulčního systému není dostatečná. Výsledné energie se zvolenou strategií mají v dolním indexu příponu PR pro lepší rozlišení, např.  $E_{SPR}$ .



Obr. 28 Proporční strategie – zobrazení  $I_{Tl}$ ,  $I_{OHL}$ ,  $I_{ESS}$

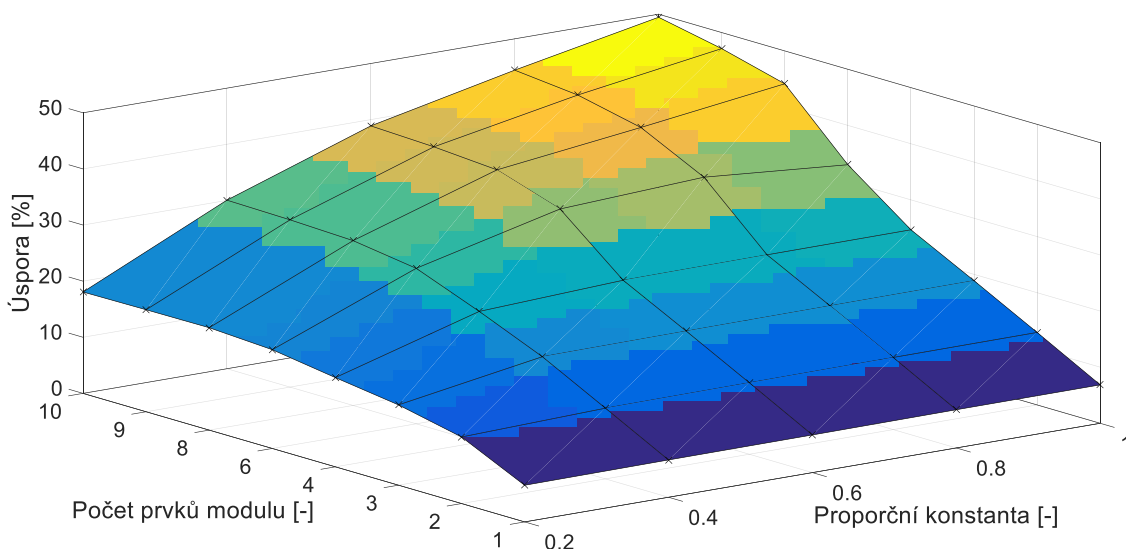


Obr. 29 Proporční strategie – zobrazení  $U_C$ ,  $U_{SC}$

V Tab. 8 je spočtena úspora z poměru spotřebovaných energií  $E_{SPR}/E_S$  vyjádřená v procentech. To je pak vyneseno do grafu na Obr. 30. Pro proporční strategii vychází úspora až 49,45 %. Tak vysokých hodnot se opět dosáhne pouze s vysokým počtem modulů, které nejsou ekonomicky výhodné.

Tab. 8 Úspora proti systému bez akumulčního systému se zakázanou rekuperací

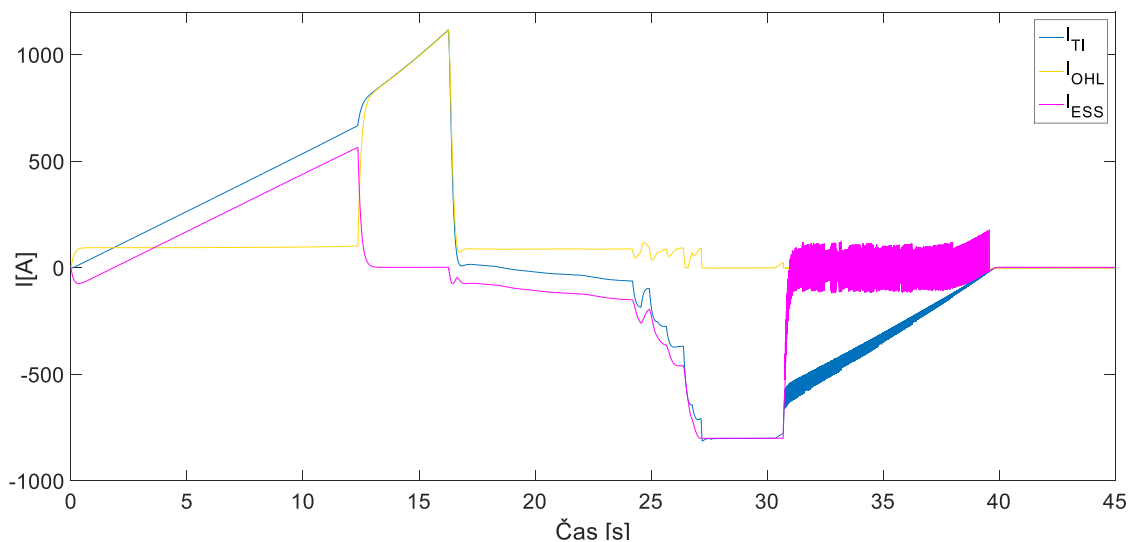
| Poměr $E_{SPR}/E_s$ [%] | Proporční konstanta [-] |       |       |       |       |
|-------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Počet modulů SC [n]     | 1                       | 0,8   | 0,6   | 0,4   | 0,2   |
| 1                       | 6,85                    | 6,81  | 6,71  | 6,65  | 6,53  |
| 2                       | 12,92                   | 12,85 | 12,74 | 12,60 | 11,86 |
| 3                       | 18,87                   | 18,78 | 18,67 | 18,50 | 14,31 |
| 4                       | 24,67                   | 24,60 | 24,46 | 23,30 | 15,90 |
| 6                       | 32,99                   | 35,16 | 33,89 | 27,71 | 17,60 |
| 8                       | 44,14                   | 40,75 | 37,59 | 29,37 | 18,25 |
| 9                       | 47,14                   | 43,26 | 38,42 | 29,81 | 18,18 |
| 10                      | 49,45                   | 44,42 | 38,88 | 30,04 | 18,07 |



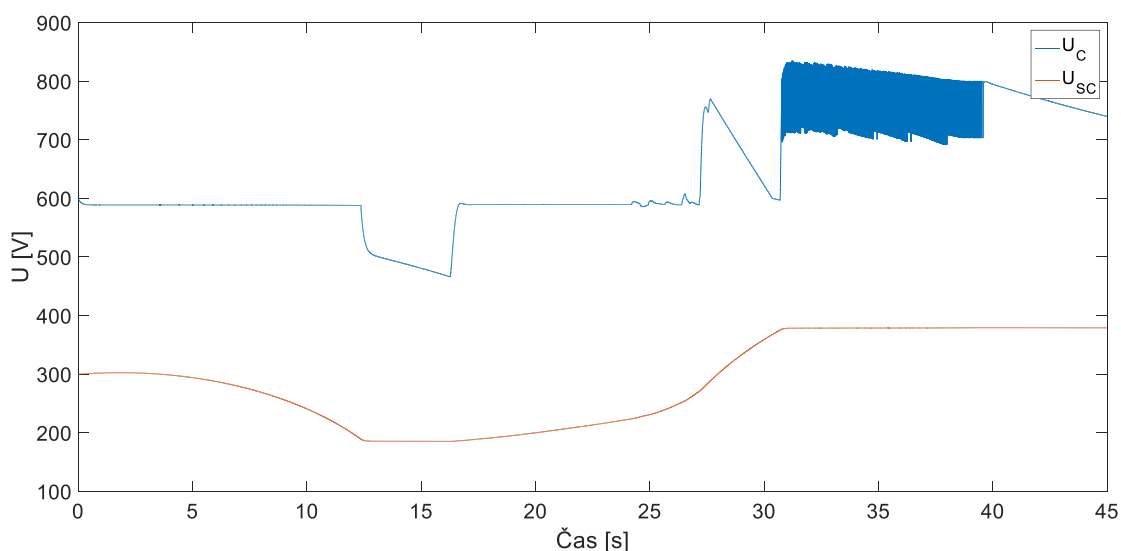
Obr. 30 Úspora proporční strategie – poměr  $E_{SPR}/E_s$  v procentech

### 8.3 Střední hodnota odebíraného výkonu

Opět je pro ukázkou kratší časový úsek na Obr. 31 a Obr. 32 zobrazující princip strategie střední hodnoty odebíraného výkonu. Tento případ je pro 9 akumulčních modulů a proporční konstantu rovnou 0,3. Akumulační systém tedy hradí třetinu průměrného výkonu potřebného na ujetí celé tratě  $P_{AVG}$ . Ani pro vysoký počet modulů a nízký hrazený výkon není kapacita modulu dostatečná. Další negativní vlastností je nabíjení superkondenzátoru ještě přes brzdění. Z toho plyne menší efektivita této strategie, která se prokázala i na následujících výsledcích. Výsledné energie se zvolenou strategií mají v dolním indexu příponu AVG pro lepší rozlišení, např.  $E_{SAVG}$ .



Obr. 31 Střední odebíraný výkon – zobrazení  $I_{Tl}$ ,  $I_{OHL}$ ,  $I_{ESS}$



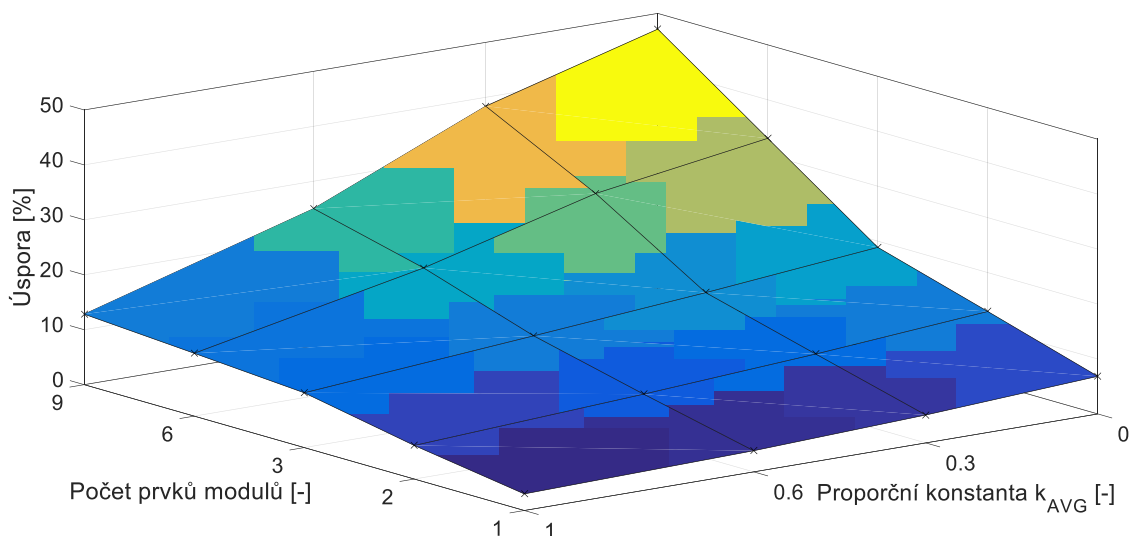
Obr. 32 Střední odebíraný výkon – zobrazení  $U_C$ ,  $U_{SC}$

V Tab. 9 je spočtena úspora z poměru spotřebovaných energií  $E_{SAVG}/E_S$  vyjádřena v procentech. To je pak vyneseno do grafu na Obr. 33. Nejvyšší úspora vychází při proporční konstantě  $k_{AVG}$  rovno nule. V takovém případě se ale jedná o čistě proporční strategii s proporční konstantou  $k_P$  rovno jedné. Tato strategie se tedy nejví jako příliš výhodná. Z toho důvodu nebyly simulovány některé počty modulů jako v předchozích případech.



Tab. 9 Úspora proti systému bez akumulčního systému se zakázanou rekuperací

| Poměr $E_{SAVG}/E_s$ [%] | Proporční konstanta $k_{AVG}$ |       |       |       |
|--------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| Počet modulů SC [n]      | 1                             | 0,6   | 0,3   | 0     |
| 1                        | 3,02                          | 3,85  | 5,08  | 6,85  |
| 2                        | 6,11                          | 8,42  | 10,45 | 12,92 |
| 3                        | 9,97                          | 13,31 | 15,90 | 18,87 |
| 6                        | 11,44                         | 19,94 | 28,22 | 32,99 |
| 9                        | 12,83                         | 25,01 | 38,39 | 47,14 |



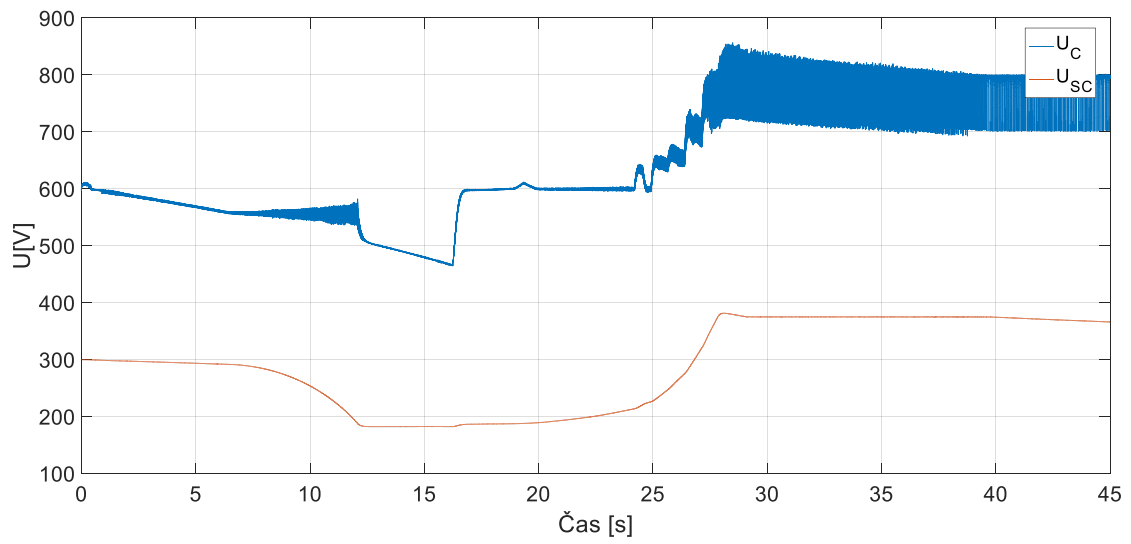
Obr. 33 Úspora střední hodnoty odebíraného výkonu – poměr  $E_{SAVG}/E_s$  v procentech

#### 8.4 Srovnání výsledků detailního a zjednodušeného modelu

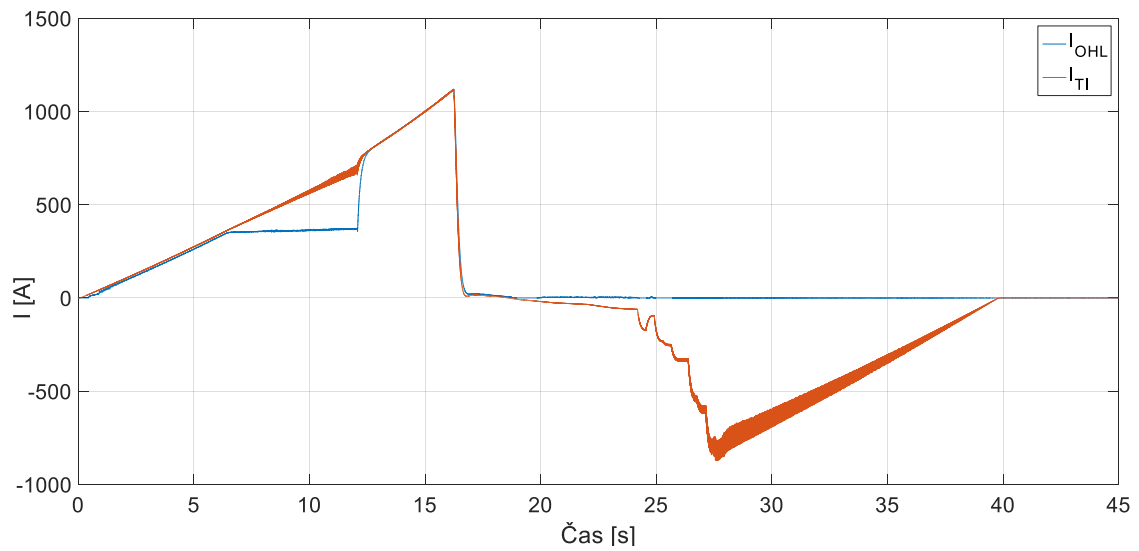
V této kapitole je stručně uveden rozdíl výsledků detailního modelu ku výsledkům zjednodušeného modelu. Simulace byla provedena pro prvních 45 s se 3 moduly a strategií omezení špičkových proudů s mezním výkonem 200 kW.

|                 | Detailní [kW] | Zjednodušený [kW] | Rozdíl [%] |
|-----------------|---------------|-------------------|------------|
| $E_s$           | 1,76          | 1,74              | 101,27     |
| $E_{CHOP}$      | 0,98          | 0,95              | 102,83     |
| $E_{PSC}$       | 0,27          | 0,24              | 114,89     |
| $E_{ASC}$       | 0,39          | 0,41              | 96,06      |
| $\Delta E_{Sc}$ | 0,12          | 0,17              | 70,18      |

Rozdíly nejsou velké, ale zajisté nejsou zanedbatelné. Průběh proudu akumulčním systémem je více rozkmitaný než ve zjednodušeném modelu. Tím by se vysvětlily větší rozdíly v  $\Delta E_{Sc}$ , protože i efektivní hodnota průběhu proudu je vyšší. V kapitole 7.5 je uvedeno elektrické schéma detailního modelu. V modelu nejsou zahrnuty vnitřní odpory superkondenzátoru a tlumivky. Bohužel při jejich zahrnutí se systém nedařilo úspěšně stabilizovat. Na Obr. 34 a Obr. 35 jsou průběhy získané z modelu.



Obr. 34 Omezení špičkových proudů – zobrazení  $U_C$ ,  $U_{SC}$



Obr. 35 Omezení špičkového výkonu – zobrazení  $I_{T1}$ ,  $I_{OHL}$

## 9 Shrnutí výsledků

V úvodních kapitolách diplomové práce jsem se zabýval základními akumulacími prvky, strategiemi řízení akumulací systémů a topologiemi měničů používaných v současných tramvajových vozech. Vysvětlení pojmů a funkce je nezbytné k lepšímu porozumění dalších kapitol.

Prvním úkolem bylo vytvořit kinematický model tramvajového vozidla. S pomocí naměřených dat z [10] vznikl matematický model popisující reálnou trať č.4 v Plzni. Za použitelný praktický výstup lze považovat to, že změnou parametrů jako je odpor sklonu, výkon tramvaje, vzdálenost zastávek apod. by se dal tento model překalibrovat na jakoukoliv jinou trať. Výstupem z modelu je průběh odebíraného trakčního výkonu  $P_{TRA}$ , který byl dále využit v dalším kroku.  $P_{TRA}$  byl simulován pro hmotnost tramvaje rovnou střednímu obsazení  $5 \text{ os/m}^2$ . K této hmotnosti byla pro reálnější pojetí přičtena také hmotnost akumulací systému pro  $n$  počet prvků.

Následoval návrh výkonového obvodu tramvajového vozidla a jeho kontrola. Výkonový obvod se skládá z trolejového vedení, vstupního filtru, DC linku, brzdového odporu a trakčního invertoru. Jedním z cílů práce bylo navrhnout vhodný akumulací systém. Akumulací systém byl zpočátku navrhován s paralelním měničem s tranzistory, ale krok simulace byl v takovém případě tak malý, že časová náročnost pro výpočet byla příliš velká. Proto jsem přešel k jinému řešení. Tím byla náhrada měniče za ovládaný proudový zdroj, se kterým se doba jedné simulace podstatně zkrátila. Proud zdroje odpovídal požadavku na proud akumulací systémem, nikoliv však proud superkondenzátorem. Ten jsem tedy pomocí rovnosti výkonů dopočítal. Požadavek na proud akumulací systémem vycházel z bloku Power management. Pod tímto blokem se skrývala regulace podle zvolené strategie. Nebyl však jediným blokem, který řídil proud  $I_{ESS}$ . Důležitým blokem pro stabilitu celého výkonového obvodu byl blok, starající se o stabilizaci LC filtru, který využíval právě akumulací systém k těmto účelům. Při simulaci, kdy byl akumulací systém ovládan pouze pomocí bloku stabilizace LC filtru, tj. žádná strategie nebyla použita, akumulací prvek dodal za dobu jízdy  $1,78 \text{ kWh}$  energie a pojmul  $1,95 \text{ kWh}$  energie.

Strategie řízení byly popsány v kapitole 5. Zvolené strategie pro případ diplomové práce zahrnovaly omezení špičkových proudů, proporční strategii a střední hodnotu odebíraného výkonu. Pro každou strategii byly počítány úspory s  $n$  superkondenzátory v akumulací systému.

Simulace probíhaly režimu zakázané rekuperace, je tedy potřeba brát na vědomí, že na tratě s vyšší hustotou provozu se tyto výsledky nevztahují.

## Závěr

Z provedených simulací vyplývá, že navržené řešení by bylo vhodné například pro tratě typu Most-Litvínov, kde je v jednom napájecím úseku pouze jedno tramvajové vozidlo. Na tratích tohoto typu se vhodně zvolenou strategií a kapacitou akumulčního systému dají snížit ztráty na trakčním vedení i kabelovém vedení (v případě vzdálené měřírny od trakčního vedení).

Se strategií omezení špičkových proudů by úspora dosáhla 36,06 %. Bylo by potřeba 10 modulů, což je finančně neúnosné a jejich objem by nejspíše v takovém množství zasahoval do prostoru cestujících. Ideální volba by měla být mezi dvěma až čtyřmi moduly na jednu nápravu tramvaje. O něco lépe dopadla s maximální úsporou strategie proporční, kdy se úspora vyšplhala k 49,95 %. Pro dva až čtyři moduly je úspora srovnatelná se strategií omezení špičkových proudů. Poslední zvolená strategie středního odebíraného výkonu se neukázala jako vhodná strategie. S nulovou proporční konstantou  $k_{AVG}$  se chovala čistě jako proporční strategie a se zvyšováním  $k_{AVG}$  se úspora pouze snižovala.

Dále byl srovnán krátký úsek spočítaný zjednodušeným modelem a detailním modelem. Ukázal se 1,27 % rozdíl ve spotřebované energii  $E_s$ , což není mnoho. Detailní model však nebyl odladěn tak, jak by bylo potřeba a v modelu nebyly zahrnuty vnitřní odpory superkondenzátoru a tlumivky.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] STREIT, Luboš. *AKUMULAČNÍ SYSTÉM DRÁŽNÍCH VOZIDEL ZVYŠUJÍCÍ ENERGETICKOU ÚČINNOST*. Plzeň, 2013. Dizertační práce. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni.
- [2] JANSA, František. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Nadas, 1980.
- [3] DRÁBEK, Jiří. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. ALFA-vydavatelství technické a ekonomické, 1981.
- [4] ELSTNER, Vlastislav. *Energetická bilance v elektrické trakci*. Plzeň, 2012. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [5] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo and J. M. Carrasco, "Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3881-3895, Dec. 2010.
- [6] TAGUCHI, Yoshiaki, et al. Simulation results of novel energy storage equipment series-connected to the traction inverter. In: *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*. IEEE, 2007. p. 1-9.
- [7] YANO, M.; MIZUMURA, T.; KURAMOCHI, A. A new energy storage systems for railway rolling stock using transformers connected in series to motor windings. In: *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International*. IEEE, 2007. p. 112-117.
- [8] MAXWELL TECHNOLOGIES, BMOD0063 P125. <https://www.maxwell.com/> [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: [https://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule\\_ds\\_1014696-7.pdf](https://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule_ds_1014696-7.pdf)
- [9] STREIT, Luboš, Jakub TALLA a Martin JANDA. Tram LC Filter Stabilization by Supercapacitor Storage System. *IEEE* [online]. 2018, 1 - 5, [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8624903>
- [10] ŠKUBAL, Jaroslav. *ŠKODA TRANSPORTATION*. Protokol: Měření spotřeby elektrické energie tramvaje LTM 10.08. Plzeň, 1998.
- [11] GRIGANS, Linards. *Recuperated Electric Energy Utilization in Urban Electric Transport by Applying Supercapacitors*. Riga, 2012. Rigorózní práce. Riga Technical University, Faculty of Power and Electrical Engineering, Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering.
- [12] [Www.mouser.cz](http://www.mouser.cz) [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Maxwell-Technologies/BMOD0063-P125B08?qS=WBQIFPjBBZvhaMR2gQbDhQ%3D%3D>

# Přílohy

## Příloha 1

Tab. 10 Naměřené výsledky se strategií omezení špičkových proudů

| E <sub>SPS</sub>    |  | Výkonová mez [kW] |       |       |       | E <sub>PCPS</sub>   |  | Výkonová mez [kW] |      |      |      | E <sub>JPS</sub>        |  | Výkonová mez [kW] |       |       |      |
|---------------------|--|-------------------|-------|-------|-------|---------------------|--|-------------------|------|------|------|-------------------------|--|-------------------|-------|-------|------|
| Počet modulů SC [n] |  | 100               | 200   | 300   | 400   | Počet modulů SC [n] |  | 100               | 200  | 300  | 400  | Počet modulů SC [n]     |  | 100               | 200   | 300   | 400  |
| 1                   |  | 40,44             | 40,51 | 40,65 | 41,62 | 1                   |  | 3,22              | 3,23 | 3,16 | 2,62 | 1                       |  | 1,40              | 1,33  | 1,27  | 0,72 |
| 2                   |  | 37,81             | 38,05 | 38,75 | 41,46 | 2                   |  | 4,79              | 4,65 | 4,24 | 2,74 | 2                       |  | 1,65              | 1,54  | 1,21  | 0,37 |
| 3                   |  | 35,24             | 35,68 | 38,01 | 41,52 | 3                   |  | 6,291             | 6,02 | 4,71 | 2,74 | 3                       |  | 1,87              | 1,71  | 0,97  | 0,24 |
| 4                   |  | 32,74             | 33,95 | 37,43 | 41,58 | 4                   |  | 7,78              | 7,05 | 5,07 | 2,74 | 4                       |  | 2,26              | 1,77  | 0,90  | 0,20 |
| 6                   |  | 28,7              | 32,64 | 37,13 | 41,7  | 6                   |  | 10,23             | 7,88 | 5,30 | 2,75 | 6                       |  | 2,19              | 1,27  | 0,59  | 0,14 |
| 8                   |  | 26,98             | 32,04 | 37,05 | 41,82 | 8                   |  | 11,20             | 8,30 | 5,42 | 2,75 | 8                       |  | 2,03              | 1,20  | 0,50  | 0,13 |
| 9                   |  | 26,57             | 31,94 | 37,09 | 41,88 | 9                   |  | 11,49             | 8,39 | 5,43 | 2,75 | 9                       |  | 1,63              | 0,99  | 0,40  | 0,11 |
| 10                  |  | 26,41             | 31,76 | 37,14 | 41,94 | 10                  |  | 11,63             | 8,53 | 5,44 | 2,75 | 10                      |  | 1,71              | 1,05  | 0,41  | 0,12 |
| E <sub>CHOPS</sub>  |  | Výkonová mez [kW] |       |       |       | E <sub>ASCAS</sub>  |  | Výkonová mez [kW] |      |      |      | E <sub>SPS/ES</sub> [%] |  | Výkonová mez [kW] |       |       |      |
| Počet modulů SC [n] |  | 100               | 200   | 300   | 400   | Počet modulů SC [n] |  | 100               | 200  | 300  | 400  | Počet modulů SC [n]     |  | 100               | 200   | 300   | 400  |
| 1                   |  | 14,94             | 14,99 | 15,07 | 15,65 | 1                   |  | 3,35              | 3,31 | 3,24 | 2,70 | 1                       |  | 6,69              | 6,53  | 6,21  | 3,97 |
| 2                   |  | 13,31             | 13,45 | 13,87 | 15,5  | 2                   |  | 4,91              | 4,77 | 4,36 | 2,86 | 2                       |  | 12,76             | 12,21 | 10,59 | 4,34 |
| 3                   |  | 11,71             | 11,98 | 13,37 | 15,47 | 3                   |  | 6,46              | 6,19 | 4,88 | 2,91 | 3                       |  | 18,69             | 17,67 | 12,30 | 4,20 |
| 4                   |  | 10,17             | 10,8  | 12,97 | 15,45 | 4                   |  | 8,00              | 7,27 | 5,29 | 2,96 | 4                       |  | 24,46             | 21,67 | 13,64 | 4,06 |
| 6                   |  | 7,62              | 9,98  | 12,67 | 15,41 | 6                   |  | 10,54             | 8,20 | 5,62 | 3,06 | 6                       |  | 33,78             | 24,69 | 14,33 | 3,78 |
| 8                   |  | 6,49              | 9,51  | 12,5  | 15,36 | 8                   |  | 11,61             | 8,72 | 5,84 | 3,17 | 8                       |  | 37,75             | 26,07 | 14,51 | 3,51 |
| 9                   |  | 6,17              | 9,39  | 12,47 | 15,34 | 9                   |  | 11,95             | 8,86 | 5,89 | 3,22 | 9                       |  | 38,69             | 26,30 | 14,42 | 3,37 |
| 10                  |  | 6,02              | 9,23  | 12,44 | 15,32 | 10                  |  | 12,13             | 9,04 | 5,96 | 3,27 | 10                      |  | 39,06             | 26,72 | 14,31 | 3,23 |

Tab. 11 Naměřené výsledky s proporční strategií

| <b>E<sub>SPR</sub></b>     | <b>Proporční konstanta [-]</b> |            |            |            |            | <b>E<sub>SPCPR</sub></b>   | <b>Proporční konstanta [-]</b> |            |            |            |            | <b>E<sub>JPR</sub></b>                   | <b>Proporční konstanta [-]</b> |            |            |            |            |
|----------------------------|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------------|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|--|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Počet modulů SC [n]</b> | <b>1</b>                       | <b>0,8</b> | <b>0,6</b> | <b>0,4</b> | <b>0,2</b> | <b>Počet modulů SC [n]</b> | <b>1</b>                       | <b>0,8</b> | <b>0,6</b> | <b>0,4</b> | <b>0,2</b> | <b>Počet modulů SC [n]</b>               | <b>1</b>                       | <b>0,8</b> | <b>0,6</b> | <b>0,4</b> | <b>0,2</b> |
| <b>1</b>                   | 40,37                          | 40,39      | 40,43      | 40,46      | 40,51      | <b>1</b>                   | 3,31                           | 3,30       | 3,28       | 3,27       | 3,25       |  | 1,42                           | 1,36       | 1,29       | 1,20       | 1,08       |
| <b>2</b>                   | 37,74                          | 37,77      | 37,82      | 37,88      | 38,2       | <b>2</b>                   | 4,82                           | 4,81       | 4,79       | 4,76       | 4,56       | <b>2</b>                                 | 1,68                           | 1,59       | 1,50       | 1,39       | 1,15       |
| <b>3</b>                   | 35,16                          | 35,2       | 35,25      | 35,32      | 37,14      | <b>3</b>                   | 6,35                           | 6,30       | 6,28       | 6,24       | 5,20       | <b>3</b>                                 | 1,96                           | 1,79       | 1,69       | 1,56       | 0,95       |
| <b>4</b>                   | 32,65                          | 32,68      | 32,74      | 33,24      | 36,45      | <b>4</b>                   | 7,88                           | 7,79       | 7,76       | 7,47       | 5,63       | <b>4</b>                                 | 2,38                           | 2,10       | 1,95       | 1,67       | 0,88       |
| <b>6</b>                   | 29,04                          | 28,10      | 28,65      | 31,33      | 35,71      | <b>6</b>                   | 10,02                          | 10,58      | 10,17      | 8,64       | 6,12       | <b>6</b>                                 | 2,22                           | 2,32       | 1,89       | 1,26       | 0,65       |
| <b>8</b>                   | 24,21                          | 25,68      | 27,05      | 30,61      | 35,43      | <b>8</b>                   | 12,86                          | 12,01      | 11,17      | 9,12       | 6,35       | <b>8</b>                                 | 2,70                           | 2,32       | 1,74       | 1,15       | 0,58       |
| <b>9</b>                   | 22,91                          | 24,59      | 26,69      | 30,42      | 35,46      | <b>9</b>                   | 13,67                          | 12,67      | 11,40      | 9,26       | 6,37       | <b>9</b>                                 | 2,24                           | 2,02       | 1,42       | 0,96       | 0,45       |
| <b>10</b>                  | 21,91                          | 24,09      | 26,49      | 30,32      | 35,51      | <b>10</b>                  | 14,21                          | 12,95      | 11,56      | 9,36       | 6,38       | <b>10</b>                                | 2,61                           | 2,09       | 1,49       | 1,01       | 0,46       |
| <b>E<sub>CHOPPR</sub></b>  | <b>Proporční konstanta [-]</b> |            |            |            |            | <b>E<sub>ASCPR</sub></b>   | <b>Proporční konstanta [-]</b> |            |            |            |            | <b>E<sub>SPR</sub>/E<sub>S</sub> [%]</b> | <b>Proporční konstanta [-]</b> |            |            |            |            |
| <b>Počet modulů SC [n]</b> | <b>1</b>                       | <b>0,8</b> | <b>0,6</b> | <b>0,4</b> | <b>0,2</b> | <b>Počet modulů SC [n]</b> | <b>1</b>                       | <b>0,8</b> | <b>0,6</b> | <b>0,4</b> | <b>0,2</b> | <b>Počet modulů SC [n]</b>               | <b>1</b>                       | <b>0,8</b> | <b>0,6</b> | <b>0,4</b> | <b>0,2</b> |
| <b>1</b>                   | 14,90                          | 14,92      | 14,94      | 14,96      | 14,98      | <b>1</b>                   | 3,38                           | 3,37       | 3,35       | 3,34       | 3,32       |  | 6,85                           | 6,81       | 6,71       | 6,65       | 6,53       |
| <b>2</b>                   | 13,26                          | 13,28      | 13,31      | 13,35      | 13,54      | <b>2</b>                   | 4,94                           | 4,93       | 4,91       | 4,88       | 4,68       | <b>2</b>                                 | 12,92                          | 12,85      | 12,74      | 12,60      | 11,86      |
| <b>3</b>                   | 11,66                          | 11,68      | 11,71      | 11,76      | 12,84      | <b>3</b>                   | 6,51                           | 6,47       | 6,45       | 6,41       | 5,37       | <b>3</b>                                 | 18,87                          | 18,78      | 18,67      | 18,50      | 14,31      |
| <b>4</b>                   | 10,11                          | 10,12      | 10,15      | 10,45      | 12,38      | <b>4</b>                   | 8,09                           | 8,00       | 7,97       | 7,69       | 5,85       | <b>4</b>                                 | 24,67                          | 24,60      | 24,46      | 23,30      | 15,90      |
| <b>6</b>                   | 7,83                           | 7,26       | 7,59       | 9,20       | 11,82      | <b>6</b>                   | 10,34                          | 10,89      | 10,49      | 8,96       | 6,44       | <b>6</b>                                 | 32,99                          | 35,16      | 33,89      | 27,71      | 17,60      |
| <b>8</b>                   | 4,79                           | 5,71       | 6,52       | 8,65       | 11,53      | <b>8</b>                   | 13,27                          | 12,41      | 11,58      | 9,54       | 6,77       | <b>8</b>                                 | 44,14                          | 40,75      | 37,59      | 29,37      | 18,25      |
| <b>9</b>                   | 3,94                           | 4,99       | 6,25       | 8,48       | 11,49      | <b>9</b>                   | 14,13                          | 13,13      | 11,86      | 9,72       | 6,83       | <b>9</b>                                 | 47,14                          | 43,26      | 38,42      | 29,81      | 18,18      |
| <b>10</b>                  | 3,30                           | 4,64       | 6,07       | 8,36       | 11,47      | <b>10</b>                  | 14,72                          | 13,46      | 12,07      | 9,87       | 6,89       | <b>10</b>                                | 49,45                          | 44,42      | 38,88      | 30,04      | 18,07      |



Tab. 12 Naměřené výsledky pro strategii středního odebíraného výkonu

| <b>E<sub>SAVG</sub></b>    | <b>Proporční konstanta</b> |            |            |          | <b>E<sub>PSCAVG</sub></b>  | <b>Proporční konstanta</b> |             |             |          | <b>E<sub>JAVG</sub></b>                   | <b>Proporční konstanta</b> |            |            |          |
|----------------------------|----------------------------|------------|------------|----------|----------------------------|----------------------------|-------------|-------------|----------|---|----------------------------|------------|------------|----------|
| <b>Počet modulů SC [n]</b> | <b>1</b>                   | <b>0,6</b> | <b>0,3</b> | <b>0</b> | <b>Počet modulů SC [n]</b> | <b>1</b>                   | <b>0,6</b>  | <b>0,3</b>  | <b>0</b> | <b>Počet modulů SC [n]</b>                | <b>1</b>                   | <b>0,6</b> | <b>0,3</b> | <b>0</b> |
| <b>1</b>                   | 42,03                      | 41,67      | 41,14      | 40,37    | <b>1</b>                   | 3,63                       | 3,57        | 3,47        | 3,31     | <b>1</b>                                  | 1,83                       | 1,63       | 1,50       | 1,42     |
| <b>2</b>                   | 40,69                      | 39,69      | 38,81      | 37,74    | <b>2</b>                   | 5,14                       | 5,08        | 4,97        | 4,82     | <b>2</b>                                  | 1,87                       | 1,82       | 1,74       | 1,68     |
| <b>3</b>                   | 39,02                      | 37,57      | 36,45      | 35,16    | <b>3</b>                   | 6,58                       | 6,59        | 6,46        | 6,35     | <b>3</b>                                  | 2,04                       | 2,04       | 1,98       | 1,96     |
| <b>6</b>                   | 38,38                      | 34,7       | 31,11      | 29,04    | <b>6</b>                   | 9,37                       | 10,78       | 10,94       | 10,02    | <b>6</b>                                  | 1,55                       | 2,01       | 2,49       | 2,22     |
| <b>9</b>                   | 37,78                      | 32,5       | 26,7       | 22,91    | <b>9</b>                   | 10,59                      | 12,74       | 14,34       | 13,67    | <b>9</b>                                  | 1,27                       | 1,67       | 2,20       | 2,24     |
| <b>E<sub>CHOPAVG</sub></b> | <b>Proporční konstanta</b> |            |            |          | <b>E<sub>ASCAVG</sub></b>  | <b>Proporční konstanta</b> |             |             |          | <b>E<sub>SAVG</sub>/E<sub>s</sub> [%]</b> | <b>Proporční konstanta</b> |            |            |          |
| <b>Počet modulů SC [n]</b> | <b>1</b>                   | <b>0,6</b> | <b>0,3</b> | <b>0</b> | <b>Počet modulů SC [n]</b> | <b>1</b>                   | <b>0,60</b> | <b>0,30</b> | <b>0</b> | <b>Počet modulů SC [n]</b>                | <b>1</b>                   | <b>0,6</b> | <b>0,3</b> | <b>0</b> |
| <b>1</b>                   | 15,9                       | 15,67      | 15,35      | 14,9     | <b>1</b>                   | 3,71                       | 3,65        | 3,55        | 3,38     | <b>1</b>                                  | 3,02                       | 3,85       | 5,08       | 6,85     |
| <b>2</b>                   | 15,14                      | 14,51      | 13,96      | 13,26    | <b>2</b>                   | 5,27                       | 5,21        | 5,09        | 4,94     | <b>2</b>                                  | 6,11                       | 8,42       | 10,45      | 12,92    |
| <b>3</b>                   | 14,27                      | 13,34      | 12,59      | 11,66    | <b>3</b>                   | 6,77                       | 6,76        | 6,64        | 6,51     | <b>3</b>                                  | 9,97                       | 13,31      | 15,90      | 18,87    |
| <b>6</b>                   | 13,85                      | 11,56      | 9,344      | 7,83     | <b>6</b>                   | 9,69                       | 11,10       | 11,25       | 10,34    | <b>6</b>                                  | 11,44                      | 19,94      | 28,22      | 32,99    |
| <b>9</b>                   | 13,39                      | 10,23      | 6,69       | 3,94     | <b>9</b>                   | 11,07                      | 13,21       | 14,8        | 14,13    | <b>9</b>                                  | 12,83                      | 25,01      | 38,39      | 47,14    |