

AKUMULAČNÍ SYSTÉM DRÁŽNÍCH VOZIDEL ZVYŠUJÍCÍ ENERGETICKOU ÚČINNOST

DISERTAČNÍ PRÁCE

AKUMULAČNÍ SYSTÉM DRÁŽNÍCH VOZIDEL ZVYŠUJÍCÍ ENERGETICKOU ÚČINNOST

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor

v oboru

Elektronika

Autor:

Ing. Luboš Streit

Školitel:

Prof. Ing. František Vondrášek, CSc.

Datum státní závěreční zkoušky:

1. 7. 2009

Datum odevzdání práce:

21. 10. 2013

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mě pozitivně ovlivnili při psaní této disertační práce. V první řadě patří poděkování mému školiteli panu prof. Ing. Františku Vondráškovi, CSc. za odbornou podporu a vedení. Dále bych rád poděkoval školiteli specialistovi doc. Ing. Pavlu Drábkovi, Ph.D. za velmi cenné rady a trpělivost při vedení mé práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Jakubu Tallovi, Ph.D. za jeho přínosné podněty a užitečné rady. Upřímné poděkování patří také Ing. Jaroslavu Škubalovi, Ph.D. za poskytnutí změřených dat důležitých pro vypracování práce. Dále pak děkuji za vstřícnost kolegům z Katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky a v neposlední řadě mým rodinným příslušníkům a přátelům za vytvoření příjemných podmínek při tvorbě této práce.

Tato disertační práce vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094 a s podporou projektu Centrum kompetence drážních vozidel, číslo projektu TaČR TE01020038.

Dále také tato práce vznikla s podporou studentského grantu SGS-2012-071.

V Plzni, 21. 10. 2013

Autor

Anotace

Tato disertační práce se zabývá vhodnou strategií řízení akumulčního systému pro zvýšení energetické účinnosti vozidel. V práci je popsán simulační model tramvaje jedoucí na konkrétní lince č. 4 v Plzni. Simulační model byl vytvořen za pomoci naměřených reálných dat, která byla statisticky analyzována. Výsledky analýzy tvořily základ pro pravděpodobnostní simulační model. Dalšími vstupy modelu jsou pak parametry tramvaje a tramvajové trati.

Simulační model se skládá celkem z pěti hlavních bloků. V bloku *Trakční mechanika* jsou vypočteny mechanické veličiny vozidla. Blok *Řidič* napodobuje chování skutečného řidiče. Blok *Výkony a energie* zajišťuje správné rozdělení výkonů. Blok *Akumulační systém* vyhodnocuje stav nabití superkondenzátoru a jeho teplotu. Posledním blokem je *Power management*, který je důležitou částí práce. V bloku *Power management* je řešeno několik různých strategií řízení akumulčního systému. Tyto strategie jsou vzájemně porovnány podle výsledné spotřeby energie zohledňující i ztráty v troleji.

Metodika využívající pravděpodobnostní simulační model, která je uvedena v této práci, slouží pro nalezení optimální velikosti superkondenzátoru a vhodné strategie řízení akumulčního systému pro zvýšení energetické účinnosti. Tato metodika může být použita i pro jiné linky.

Klíčová slova:

Akumulační systém, Simulační model, Tramvaj, Power Management, Trakční mechanika, Superkondenzátor, Pulzní měnič, Asynchronní motor

Abstract

This dissertation thesis deals with the suitable power management strategies of the energy storage system in vehicles with enhanced energy efficiency. The thesis describes the tram simulation model running on the line no. 4 in Pilsen. The simulation model was created by using the real measured data, which were statistically analyzed. Results of the analysis formed the basis of the probabilistic simulation model. Other model inputs are tram vehicle parameters and tram line parameters.

The simulation model consists of five main blocks. Mechanical quantities are calculated in the block *Traction Mechanics*. Block *Driver* substitutes behavior of the real tram driver. Block *Power and Energy* ensures the proper distribution of the power. Block *Energy Storage System* evaluates the supercapacitor state of charge and temperature. The last block is *Power Management*, which is the important part of the thesis. Several different power management strategies for the energy storage system are handled in the block *Power management*. These strategies are compared with each other according to final energy consumption taking into account overhead line losses.

The methodology uses probabilistic simulation model, which is presented in this thesis, can be used to find the optimal size of the supercapacitor and the appropriate power management strategy of the energy storage system for other tram lines.

Keywords:

Energy Storage System, Simulation Model, Tram, Power Management, Traction Mechanics, Supercapacitor, Buck/Boost Converter, Induction Motor

Abstract

Diese Dissertationarbeit beschäftigt sich mit der Suche nach geeigneten Managementstrategien Storage-System in Fahrzeugen mit der verbesserten Energieeffizienz. Die Arbeit beschreibt daher ein Simulationsmodell der konkreten Straßenbahn Nummer 4 in Pilsen. Das Simulationsmodell wurde mit real gemessenen Daten gebildet, die statistisch ausgewertet wurden. Die Ergebnisse der Analyse bilden die Basis für das probabilistische Simulationsmodell. Andere Eingang-Parameter des Modells sind dann Straßenbahnparameter und Straßenbahnstrecke.

Das Simulationsmodell besteht aus fünf Blöcken. Im Block Tractionmechanik wurden die mechanischen Größen berechnet. Der Block Fahrer ahmt das Fahrverhaltens des wirklichen Fahrers. Der Block Kraft und Energie gewährleistet eine ordnungsgemäße Verteilung der Leistung. Der Block Akkumulationssystem wertet den Zustand der Superkondensatorladung und Temperatur. Der letzte Block ist Power Management, durch den verschiedene Management-Strategien für das Speichersystem gelöst wurden. Diese Strategien wurden miteinander nach Endenergieverbrauch, unter Berücksichtigung der Verluste in der Laufkatze, verglichen.

Mit diesem Simulationsmodell, erwähnt die Arbeit auch Methode für die Suche nach der optimalen Größe des Superkondensators und entsprechende Vorgehensweisen Storage-System für andere Linien.

Schlüsselwörter:

Akkumulationssystem, Simulationsmodell, Straßenbahn, Power Management, Tractionmechanik, Superkondensator, Gleichspannungswandler, Asynchronmotor

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Současný stav poznání ve zkoumané problematice	12
1.1.1	Akumulační systém na vozidle	13
1.1.2	Provoz bez trolejového vedení	13
1.1.3	Stacionární akumulční systém	15
1.2	Cíle práce	16
1.3	Metodika řešení	16
2	Superkondenzátor	18
2.1	Princip superkondenzátoru	18
2.2	Simulační model superkondenzátoru	19
2.3	Dostupné superkondenzátorové moduly	20
3	Systémy akumulace energie	21
3.1	Topologie akumulčních systémů	21
3.1.1	Paralelní akumulční systém	21
3.1.2	Sériový akumulční systém	23
3.1.3	Speciální topologie akumulčního systému	25
3.2	Model vybraného systému akumulace	27
3.2.1	Simulace	29
3.2.2	Experimenty	33
4	Podklady pro simulaci tramvaje	40
4.1	Parametry tramvaje	40
4.2	Tramvajová linka	41
4.3	Rozbor změřených dat	46
5	Simulační model tramvaje	60
5.1	Blok Trakční mechanika	61
5.2	Blok Řidič	64
5.3	Blok Výkony a energie	67
5.3.1	Spotřebovaná energie E_S	67
5.3.2	Rekuperovaná energie E_R	68
5.3.3	Ztráty ve vedení E_{VED}	71

5.4	Blok Akumulační systém	78
5.5	Přesnost simulace.....	82
6	Strategie řízení akumulčního systému.....	84
6.1	Proporcionální řízení	85
6.2	Omezení špičkových odběrů.....	87
6.3	Střední hodnota odebíraného výkonu	90
6.4	Střední hodnota odebíraného výkonu s predikcí.....	92
6.5	Určení hladiny SC dle predikce trati.....	95
6.5.1	Akumulace energie jinak mařené v brzdovém odporu 95	
6.5.2	Příprava hladiny nabití SC dle trati.....	96
6.5.3	Ladění parametrů strategie pomocí diferenciální evoluce	100
6.5.4	Dosažené úspory energie po optimalizaci.....	102
6.6	Stabilizace trolejového napětí	104
6.7	Měření vybraných strategií.....	104
6.7.1	Proporcionální řízení	106
6.7.2	Omezení špičkových odběrů.....	108
6.7.3	Střední hodnota odebíraného výkonu	110
7	Závěr	111
7.1	Hlavní přínosy práce	115
7.2	Perspektivní směry dalšího výzkumu	116
8	Literatura	118
9	Seznam autorových publikací.....	125

Seznam zkratk a důležitých symbolů

ASM	Asynchronní motor
C_{SC}	Kapacita superkondenzátoru
C_{tep}	Tepelná kapacita superkondenzátoru
DE	Diferenciální evoluce
DSP	Digitální signálový procesor
e	Rozchod kolejnic
E_C	Energie celková
E_{ESS}	Ztráty v akumulacním systému
E_{KH}	Predikce trakční energie krátkého horizontu (60 m)
E_{MER}	Měřená energie
e_{odp}	Poměrná energie mařená v brzdovém odporníku
E_{ODP}	Energie mařená v brzdovém odporníku
E_R	Energie rekuperovaná do troleje
e_R	Poměrná rekuperovaná energie
$E_{REF SC}$	Referenční hodnota energie superkondenzátoru
E_S	Energie spotřebovaná
$E_{SC MAX}$	Maximální uložitelná energie superkondenzátoru
E_{SIM}	Simulovaná energie
ESS	Akumulační systém (z anglického Energy Storage System)
E_{ST+PP}	Energie trakčního střídače a pomocných pohonů
$E_{ŠPIČKA}$	Energie následující výkonové špičky
E_{TOTAL}	Celková spotřeba zahrnující ztráty ve vedení a ΔE_{SC}
E_{VED}	Ztráty ve vedení
f_{mech}	Mechanická frekvence motoru
F_t	Tažná síla
F_{tb}	Brzdná síla
I_A, I_B	Proudy tramvajů v náhradním obvodu pro výp. ztrát ve vedení
I_D	Proud dynamu
I_{ESS}	Proud akumulacního systému
I_{SC}	Proud tekoucí superkondenzátorem
I_{TM}	Proud trakčního měniče
k_{avg}	Konstanta ESS strategie středního výkonu
k_{prop}	Konstanta proporcionální strategie řízení ESS
l	Ujetá vzdálenost
l_{DHor}	Dlouhý horizont vyhledávání špičkového výkonu (500 m)
$l_{ŠPIČKA}$	Vzdálenost do následující výkonové špičky
m	Hmotnost vozidla
M_1	Hmotnost na nápravu
M_W	Požadovaný moment motoru
n	počet náprav
$n_{náprava}$	Otáčky nápravy
n_{SC}	Počet superkondenzátorových modulů
p	Převod převodovky
p_a	Měrná zrychlující síla
P_A, P_B	Výkony tramvajů v náhradním obvodu pro výp. ztrát ve vedení
P_{AVG}	Střední výkon pro jízdu Bory → Košutka a zpět
P_{BR}	Brzdný výkon

P_{ESS}	Výkon akumulčního systému
$P_{ESS PM}$	Výkon ESS požadovaný strategií (Power Management)
$P_{NAB MAX}$	Maximální výkon nabíjení SC
P_{NODP}	Výkon jinak mařený v brzdovém odporníku
p_o	Měrný jízdní odpor
P_{ODP}	Výkon brzdového odporníku
p_p	Počet pólpárů
P_{PP}	Střední výkon pomocných pohonů
P_R	Rekuperovaný výkon do troleje
p_r	Přídavný odpor oblouku
p_s	Měrný odpor sklonu
P_S	Spotřebovávaný výkon z troleje
P_{SC}	Výkon superkondenzátoru
P_{ST}	Výkon trakčního střídače
P_{ST+PP}	Výkon trakčního střídače a pomocných pohonů
P_{T1}	Výkon hlavní simulované tramvaje pro výpočet ztrát ve vedení
P_{T2}	Výkon druhé tramvaje pro výpočet ztrát ve vedení
P_{TR}	Výkon troleje (výkon procházející sběračem jedné tramvaje)
P_{TRA}	Trakční výkon
P_{VED}	Ztrátový výkon vedení
R_A, R_B	Odpor vedení v náhradním obvodu pro výpočet ztrát ve vedení
R_{cm}	Tepelný odpor: článek - modul
R_{ESR}	Ekvivalentní sériový odpor superkondenzátoru
r_k	Poloměr kola
R_K	Odpor přívodních kabelů (měnírna - trolej)
R_M	Náhradní odpor měnírny včetně odporu kabelů
R_{ma}	Tepelný odpor: modul - okolí
R_O	Poloměr oblouku
R_V	Odpor vedení
S	Čelní plocha vozidla
s_{br}	Zábrzdňá vzdálenost
SC	Superkondenzátor (Supercapacitor)
T_a	Teplota okolí
$Teplota_{SC}$	Teplota článků superkondenzátorového modulu
TM	Trakční měnič
t_{PREDIK}	Časový horizont predikce středního výkonu
U_F	Napětí na filtračním kondenzátoru
U_M, I_M	Napětí a proud měnírny
U_{SC}	Napětí superkondenzátoru
U_{TRmax}	Maximální napětí troleje
V, v	Rychlost vozidla [km/h], [m/s]
δ	Relativní odchylka simulované energie od měřené
ΔE_{SC}	Rozdíl energie superkondenzátoru před a po jízdě
ΔP_{SC}	Ztrátový výkon superkondenzátoru
ΔT	Oteplení článku superkondenzátoru
ε	Koeficient respektující účinnost tramvaje při rozjezdu a brzdě
η	Jmenovitá účinnost tramvaje
$\eta_{měnič}$	Účinnost měniče akumulčního systému
ξ	Součinitel rotujících hmot (pro tramvaj 1,2)
ω_{el}	Elektrická úhlová rychlost

1 Úvod

Tato disertační práce se zabývá vhodnou strategií řízení akumulčního systému ve vozidlech se zvýšenou energetickou účinností. Vhodnou strategií se rozumí sofistikované hospodaření s energiemi vozidla, v tomto případě tramvaje jedoucí na lince č. 4 v Plzni. Za tímto účelem byl vytvořen simulační model založený na statistické analýze z reálného měření.

Akumulace elektrické energie představuje po celém světě problematiku, kterou se zabývají mnozí odborníci a vědci. Některé prostředky k uskladnění elektrické energie jsou již dávno realizovány v praxi. Akumulace energie bývá realizována například pomocí polohové energie vody v přečerpávacích elektrárnách. Tento systém akumulace energie je již z principu málo účinný a dá se použít jen pro vysoké výkony.

Pro akumulaci středních výkonů a jejich následnému odběru je výhodnější využít jiné způsoby. Jedním způsobem akumulace energie může být její uložení do kinetické energie setrvačníku, do elektrochemické energie akumulátoru, nebo uložení energie v elektrostatické formě do superkondenzátorů, popřípadě do elektromagnetické energie supravodivé indukčnosti. Toto jsou základní možnosti řešení akumulace středních výkonů.

Vozidlo lehké trakce vybavené akumulčním systémem umožňuje snížení spotřebované energie až o 30% [1]. Akumulační systém neumožňuje pouze snížení spotřeby vozidla, ale i snížení ztrát ve vedení a omezení špičkových odběrů.

1.1 Současný stav poznání ve zkoumané problematice

Zvyšováním účinnosti vozidel lehké trakce se zabývají odborníci již po několik let. Historie akumulace sahá až do počátku dvacátého století, kdy byla v Londýně použita akumulace do polohové energie vozidla. Jednalo se o vyvýšení zastávek nad okolní terén. Rozjezdu vozidla tedy napomáhal sklon ze zastávky a následná přeměna kinetické energie v energii polohovou byla zajištěna stoupáním do následující zastávky. V dnešní době existuje hned několik možností, jak lze akumulaci energie realizovat efektivněji. Nicméně pro akumulaci energie na vozidlech lehké trakce je zapotřebí zohlednit i jiná hlediska, než pouze technickou stránku věci. Protože vozidla lehké trakce (tramvaje) slouží k hromadné přepravě osob, je důležitým hlediskem i jejich bezpečnost. Z tohoto důvodu jsou nejčastěji využívány superkondenzátory. V minulosti byly k akumulaci využívány i setrvačníky (flywheel), které ovšem kvůli bezpečnosti a problematice gyroskopického efektu ustoupily. S nástupem kompozitních materiálů se jejich bezpečnost a účinnost podstatně vylepšily. Firma Alstom spolu s vývojovým týmem z F1 Williams Hybrid Technology chtějí setrvačníky nasadit do tramvají Citadis do roku 2014.

V závislosti na požadavcích jsou v současnosti testována vozidla, která jsou schopna provozu i bez trolejového vedení. Jedná se prakticky o dva možné způsoby. Jedním z nich je tramvaj vybavená superkondenzátory, jejichž dobíjení je realizováno v každé zastávce a tramvaj disponuje dostatkem energie na dojezd do další zastávky. Anebo druhý způsob, kde je tramvaj vybavena mimo superkondenzátorů i bateriemi, které umožní přejezd tramvaje v úsecích bez trolejového vedení na větší vzdálenosti.

Akumulace kinetické energie se používá i v železniční dopravě. V Japonsku byly první stacionární bateriové systémy použity již na začátku dvacátého století. Mezi modernější systémy akumulace v japonské železnici lze považovat akumulaci energie do setrvačníku (1988, 2 MW, 25 kWh), do Li-Ion baterií (2006, 1 MW, 140 kWh) a do superkondenzátorů

(2007, 2,5 MW, 6,8 kWh). Podrobněji je akumulace v japonské železnici popsána v [2].

1.1.1 Akumulační systém na vozidle

První významnější zmínky o praktickém použití superkondenzátorů k akumulaci kinetické energie na tramvaji se objevují kolem roku 2004. Za nejdůležitější zdroj lze považovat výsledky firmy Bombardier z let 2004 až 2007. Hlavní autoři Steiner, M. a Klohr, M. popisují v [1], [3-5] jedny z prvních praktických zkušeností s vyvinutým zařízením *MITRAC Energy Saver* umožňujícím zvýšení účinnosti vozidla právě za použití mobilní verze akumulčního systému se superkondenzátory. Tramvaj s tímto systémem byla předvedena veřejnosti již v září 2003 ve městě Mannheim (Německo), kde byla cestujícím k dispozici po několik let. Takto vybavená tramvaj disponuje i zvýšenou bezpečností pasažérů z hlediska výpadku napájecího napětí. Tramvaj je schopna dojet do následující zastávky právě v případě neplánovaného zastavení uprostřed křižovatky, v tunelu či uprostřed mostu. Možnost jízdy bez nutnosti trolejového vedení je výhodná i například při mytí vozu nebo pohybu po vozovně. Článek [1], z roku 2005, uvádí zkušenosti po dvou letech provozu. Autoři v něm uvádí finanční úsporu za elektrickou energii 15-20 tis. Eur za rok.

Další postupy návrhů akumulace na vozidle lze nalézt v [6-8]. Jedním z požadavků při návrhu je i optimalizace kapacity SC. Proto se například článek [9] zabývá minimalizací kapacity SC pro metro.

1.1.2 Provoz bez trolejového vedení

V případě, že je tramvaj osazena akumulčním systémem, nabízí se myšlenka využít jej pro provoz bez trolejového vedení. Nevzhledné trolejové vedení může být takto odstraněno například v historických částech města. Při tomto způsobu využití tramvaje je zapotřebí přizpůsobení napájecí sítě. Protože energie potřebná pro jízdu tramvaje může být čerpána pouze v okamžiku stání v zastávce, je nutno zastávky opatřit systémem pro rychlou předávku energie. Zastávka disponuje krátkou trolejí a dalším akumulčním systémem. V době, kdy v zastávce nestojí žádná tramvaj, je

její akumulací systém pomalu dobíjen z distribuční sítě. Po příjezdu tramvaje do zastávky je po dobu stání energie přenášena ze superkondenzátorů v zastávce do superkondenzátorů na tramvaji. Nabíjecí výkon musí být tedy vyšší, zhruba 600 kW. Avšak takto velký výkon může špičkově odebírat i běžná tramvaj během rozjezdu. Nutno podotknout, že není zapotřebí dobíjet celou kapacitu superkondenzátoru na vozidle, protože velká část kinetické energie je do něj navracena při brzdění do zmiňované zastávky. Touto aplikací se zabývají Barrade, P., Chattot, E. a spol. v [10-13] již od roku 2003 nebo [14]. První tramvaj testující provoz bez trolejí je tramvaj STEEM od firmy ALSTOM. Tato tramvaj jezdí od roku 2009 na lince T3 v Paříži a sběrač pravidelně stahuje mezi dvěma vybranými zastávkami (300 m). Zkušenosti z jejího provozu popisuje článek [15], kde je uvedena změřená úspora energie 13 %. Tato hodnota je celkem malá z důvodu velké pravděpodobnosti rekuperace. Linka T3 v Paříži je totiž poměrně krátká (7,9 km) a je na ní vypraven větší počet tramvají (více než dvě na km). Protože při jízdě tramvaje pouze pomocí akumulacího systému je zapotřebí maximálně šetřit energii, zabývají se některé výzkumné týmy i možnostmi optimalizace rychlosti a to i pro případ metra [16-19].

V případě potřeby větších dojezdových vzdáleností bývá uvažováno i využití trakčních baterií ve spolupráci se superkondenzátory. Podrobněji se problematikou použití baterií v tramvaji zabývá [20] a [21].

Pro úplné odstranění trolejového vedení zvolilo několik měst (Bordeaux Reims and Angers - 2003, Orléans - 2012, Tours – 2013 a Dubai - 2014) speciální způsob napájení pomocí třetí kolejnice vyvinutý firmou ALSTOM. Tato napájecí kolejnice se skládá ze segmentů, z nichž maximálně dva mohou být pod napětím. Napájení jednotlivých segmentů je povoleno pouze v případě, že jsou zcela zakryty projíždějící tramvají. Výhodou tohoto systému, oproti tramvajím vybavenými bateriemi, je zachování dynamických vlastností tramvaje, jako v případě trolejového napájení.

1.1.3 Stacionární akumulční systém

Další možností jak snížit spotřebu elektrické energie je instalace stabilního akumulčního systému. Tento systém může být zabudován přímo v měničce nebo v blízkosti problémových míst trati. Problémovými místy tratě se rozumí například konce linky, kde jsou způsobovány nepřijatelné úbytky napětí. Charakteristickou vlastností stabilní verze akumulčního systému je právě podpora napájecí infrastruktury v exponovaných oblastech. Výhodou při tomto použití je relativně levná a účinná lokální stabilizace trolejového napětí. Tato varianta je tedy levnější, avšak nemůže zajistit maximální úsporu energie, protože i při jejím použití musí být využito trolejové vedení, ve kterém opět vznikají ztráty.

Použití stacionárního systému je výhodné spíše pro stávající linky. Je to dáno pořizovacími náklady, které jsou nižší než náklady na dovybavení vozového parku mobilní verzí. Další výhodou je levné zvýšení dopravní kapacity při zachování napájecí infrastruktury. Stacionární systém dokáže potlačit špičkové odběry proudu a tím poklesnou i požadavky na špičkový výkon měničů. Proto je možné na stávajících linkách navýšit počet vozidel. Hmotnost stacionárního akumulčního systému nehraje tolik významnou roli, jako je tomu v případě mobilní verze. Stejně tak je kvůli rozměrům náročnější najít ve vozidle vhodné umístění pro mobilní akumulční systém, obvykle to bývají prostory na střeše. Dimenzováním stacionárního akumulčního systému se zabývají Barrero, R. a spol. v [22], [23] a D'Avanzo, S., Iannuzzi D. a spol. v [24].

Stacionární verze je využívána i pro metro. Návrh a zkušenosti z provozu metra v Soulu (Korea) popisuje Hanmin Lee a spol. v [25-28]. Změřená návratnost investice odpovídala předpokládané návratnosti, která dle těchto článků vyšla 3,8 let. Dalším návrhem stacionárního systému se zabývá Brenna, M. a spol. v článku [29].

1.2 Cíle práce

Na základě stále rostoucího požadavku na úsporu elektrické energie a důkladné analýzy současného stavu poznání v dané problematice byly vytyčeny následující cíle disertační práce:

- Souhrn použitelných topologií akumulčních systémů se superkondenzátory
- Ověření vybrané topologie na funkčním fyzikálním modelu
- Statistická analýza změřených dat na reálné lince
- Vytvoření matematického modelu vybrané tramvaje
- Vytvoření pravděpodobnostního modelu vybrané tramvajové linky
- Zhodnocení základních strategií řízení akumulčního systému
- Návrh sofistikované strategie využívající znalost trati
- Optimalizace parametrů strategie pomocí diferenciální evoluce

1.3 Metodika řešení

Tato disertační práce je členěna do sedmi kapitol. První kapitola seznamuje s danou problematikou a obsahuje přehled současného stavu poznání, který je získán z rozboru literárních pramenů. Dále jsou v této kapitole vytyčeny hlavní cíle disertační práce, jejichž naplnění je započato kapitolou 2.

Kapitola 2 se zabývá seznámením se superkondenzátorem využívaným jako akumulční médium pro trakční akumulční systémy. Je zde popsán princip dosažení jeho vlastností, jeho zjednodušený simulační model a jeho dostupné varianty.

Kapitola 3 je členěna do dvou podkapitol, z nichž v první jsou shrnuty použitelné topologie měničů akumulčních systémů. Uváděné topologie jsou opět získány z literárních zdrojů zabývajících se danou problematikou. V druhé podkapitole je popsán jak simulační, tak fyzikální model vybrané topologie akumulčního systému.

V kapitole 4 jsou analyzovány podklady potřebné pro vznik simulačního modelu. Jedná se zejména o parametry vybrané tramvaje, o parametry vybrané linky a důležitý statistický rozbor měřených dat z reálného provozu.

Kapitola 5 popisuje vlastní simulační model tramvaje jedoucí na konkrétní lince. Tato kapitola je rozdělena do podkapitol dle jednotlivých bloků simulačního modelu.

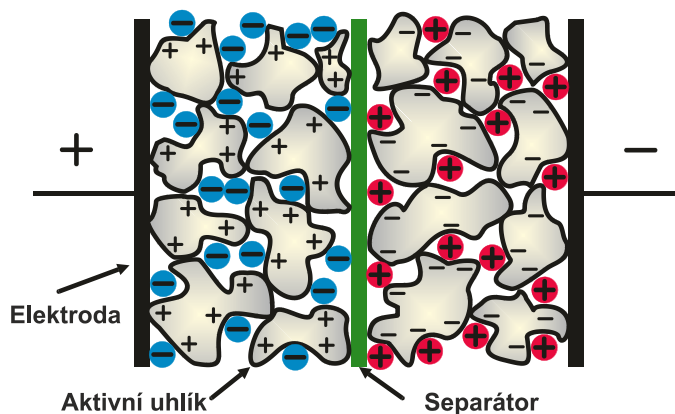
Členění kapitoly 6 odpovídá několika jednotlivým strategiím řízení akumulčního systému. Mimo základní strategie kapitola pojednává o nové strategii, která byla navržena speciálně za účelem zvýšení úspor energie prostřednictvím přípravy hladiny superkondenzátoru dle trati. Účinnost jednotlivých strategií je vyhodnocována dle procentuální uspořené energie.

Závěrečná kapitola 7 porovnává výsledky jednotlivých strategií i z ekonomického hlediska návratnosti investice. V této kapitole vyplynou doporučení pro danou linku č. 4.

2 Superkondenzátor

2.1 Princip superkondenzátoru

Superkondenzátor, též známý jako ultrakapacitor (dále jen SC), je elektrochemický kondenzátor, který je schopen pojmout více energie než kondenzátor klasický. Jeho kapacita může dosahovat tisícinásobků kapacity elektrolytických kondenzátorů. Takto vysokých kapacit je dosaženo pomocí technologie dvou vodivých vrstev. Odtud plyne i jeho další anglický název Electrical Double-Layer Capacitor EDLC. Kladná a záporná elektroda je nejběžněji vyrobena z hliníkové folie, na kterou je nanesen aktivní uhlík. Obě vrstvy jsou odděleny pomocí separátoru. Uspořádání superkondenzátoru je zobrazeno na Obr. 1. Aktivní uhlík může mít různé podoby, často se používá pórovitá forma uhlíku. Jeho povrchová plocha dosahuje hodnot 1000 až 3000 m²/g. V současnosti se hledají nanomateriály, které umožní další zvětšení povrchové plochy a zároveň snížení elektrického odporu. Perspektivně se jeví například uhlíkové nanotrubičky, které dosahují velkých povrchových ploch.



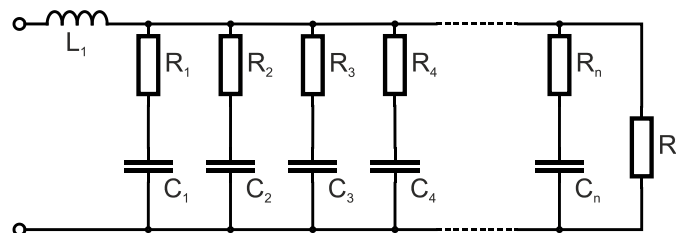
Obr. 1 Uspořádání elektrod superkondenzátoru (přepřacováno z [30])

Větší průmyslové SC dosahují kapacit až 5 000 F. Bohužel napětí jednoho článku je pouze kolem 2 V, proto se SC musí spojovat do baterií. Hustota energie těchto baterií dosahuje až 10 Wh/kg. Velkou výhodou SC, oproti akumulátorům, je velmi krátký nabíjecí čas (řádově několik sekund). Dalšími výhodami jsou: extrémně nízký vnitřní odpor (kolem 10 mΩ),

vysoká účinnost (asi 98%), cca milion nabíjecích cyklů. Pro příklad SC o kapacitě 83 F a na napětí 48 V stojí dnes přibližně 35 tisíc Kč. SC mají určitě slibnou budoucnost, protože vyplňují propast mezi akumulátory a kondenzátory.

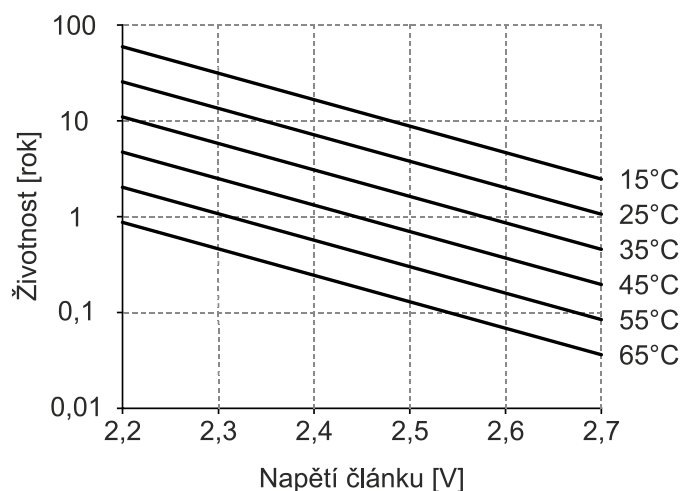
2.2 Simulační model superkondenzátoru

Pro potřeby simulace přechodových dějů superkondenzátorů vzniklo několik náhradních obvodů. Náhradní obvody se mohou různit podle přesnosti nebo dle platnosti pro různé frekvence. Náhradní obvod na Obr. 2, předkládaný v [31], vykazuje platnost v širokém frekvenčním pásmu a zároveň zachovává jednoduchost pro snadné použití v simulaci. Pro dosažení přesnosti modelu je nutná přesná identifikace parametrů náhradního obvodu, kterou se mimo jiných také zabývá [31].



Obr. 2 Náhradní schéma superkondenzátoru

Životnost superkondenzátoru je definována jako pokles kapacity na 80 % nebo nárůst ekvivalentního sériového odporu ESR o 100 %. Po skončení takto výrobcem definované životnosti je superkondenzátor stále funkční, tedy pouze s horšími parametry. Na životnost SC působí hned několik vlivů, z nichž nejdůležitější je teplota a napětí. Zvýšení těchto parametrů má negativní vliv na separátor a způsobuje rozklad organického elektrolytu. Měřením životnosti, principem zrychleného stárnutí, se zabývá [32]. Důležitým poznatkem této práce je graf závislosti životnosti SC na napětí při různých teplotách. Tento graf je uveden na Obr. 3.



Obr. 3 Životnost superkondenzátoru v závislosti na napětí

2.3 Dostupné superkondenzátorové moduly

Největším světovým výrobcem superkondenzátorů je firma Maxwell Technologies z USA. Tato firma nabízí superkondenzátory o různých parametrech od jednotlivých článků s menší kapacitou až po modulové spojení více vysokokapacitních článků. Vyráběné články a moduly jsou zobrazeny na Obr. 4. Pro trakční použití byl speciálně vyvinut největší modul (125 V, 63 F), který splňuje přísné požadavky na bezpečnost a vyhovuje požadovaným standardům.



**Obr. 4 Produktová řada superkondenzátorových modulů firmy Maxwell
(převzato z www.windpowerengineering.com)**

3 Systémy akumulace energie

3.1 Topologie akumulacních systémů

Tato kapitola se zabývá popisem různých zapojení superkondenzátorů a jejich měničů. Existuje totiž několik variant zapojení. Varianty lze rozdělit dle aplikace akumulacního systému na sériové nebo paralelní zapojení akumulacního systému. Dalším dělením může být dělení dle topologie samotných měničů. Nejjednodušší variantou je standardní dvoukvadrantový pulzní měnič. Účinnost DC/DC měničů pro superkondenzátory má nepochybně vliv na celkovou účinnost akumulacního systému, zejména z důvodu dvojího průchodu energie (při brzdění a následných rozjezdech). Proto se objevují složitější topologie měničů, jakou jsou například rezonanční měniče. Dle [6] má změna účinnosti měniče z 85 % na 97 % vliv na ušetřenou energii z 21 % na 27 %. Další skupinou jsou pak měniče zajišťující i galvanické oddělení případně měniče umožňující sečtení výkonu z více akumulacních médií, nejčastěji ze superkondenzátorů a palivových článků, popřípadě z baterie.

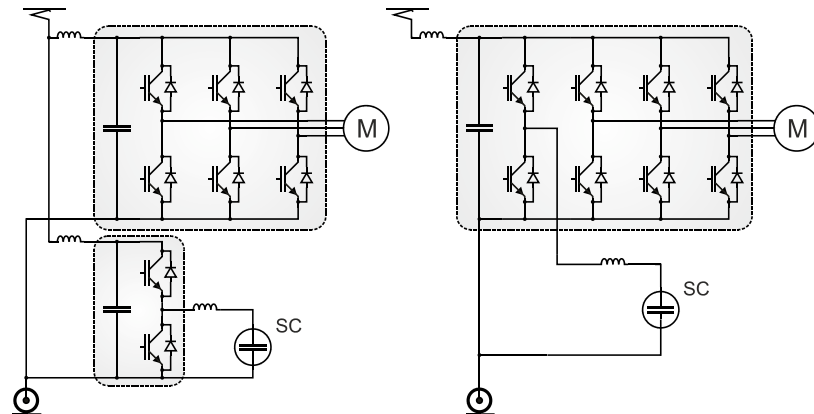
3.1.1 Paralelní akumulacní systém

Nejjednodušší způsob, jak lze akumulacní systém se superkondenzátory připojit, je pomocí DC/DC měniče, který přizpůsobuje proměnlivé napětí superkondenzátoru na velikost stejnosměrného napětí na vstupu trakčního střídače. Podle velikosti napětí U_{SC} vzhledem ke stejnosměrnému napětí střídače lze DC/DC měniče rozdělit do dvou následujících skupin.

- **Vždy nižší napětí superkondenzátoru**

Tato varianta se skládá pouze ze dvou tranzistorů, které fungují jako snižovací a zvyšovací měnič. Umožňují tak oba směry proudu I_{SC} , ale pouze pro napětí U_{SC} vždy nižší než stejnosměrné napětí střídače.

Dle [33] lze tuto variantu provozovat ve dvou zapojeních, jak ukazuje Obr. 5.

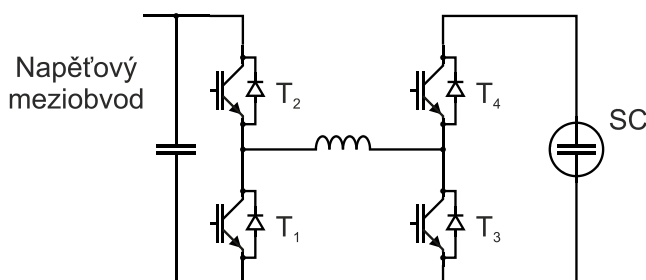


Obr. 5 Nezávislý a integrovaný pulzní měnič akumulčního systému

Pulzní měnič může být integrován v trakčním střídači jako jeho čtvrtá fáze nebo může být zapojen nezávisle. Toto nezávislé zapojení umožňuje větší modularitu a snadnější řízení distribuované energie. Výhodou těchto zapojení (nezávislého i integrovaného) je jejich jednoduchost, avšak na úkor nemožnosti řízení proudu v případě, že by stejnosměrné napětí střídače kleslo pod napětí U_{SC} . Zřejmě nejhorším případem by pak byl neřízený proud při zkratu troleje.

- **Nižší i vyšší napětí superkondenzátoru**

Pro snížení jmenovitého proudu DC/DC měniče a tlumivky a zároveň zachování výkonu akumulčního systému, může být zvoleno větší jmenovité napětí U_{SC} . V případě návrhu akumulčního systému s napětím U_{SCmax} vyšším a U_{SCmin} nižším než je stejnosměrné napětí střídače, je zapotřebí použít takový měnič, který umožňuje oba směry proudu pro různé poměry napětí na vstupu a na výstupu pulzního měniče. Jedná se o dvojitý snižovací/zvyšovací pulzní měnič. Zapojení tohoto měniče, použitého v [34], je zobrazeno na Obr. 6.



Obr. 6 Dvojitý snižovací/zvyšovací pulzní měnič

Výhodou tohoto měniče oproti předchozí variantě není pouze možnost vyššího napětí U_{SC} , ale i možnost blokování přenosu výkonu v obou směrech. Nejvyšší účinnost je dosažena při rovnosti napětí na vstupu i na výstupu. V tento okamžik jsou spínací ztráty minimální. Tato topologie tedy umožňuje:

snižování napětí při nabíjení SC	T_2 spínán
zvyšování napětí při nabíjení SC	T_2 sepnut, T_3 spínán
snižování napětí při vybíjení SC	T_4 spínán
zvyšování napětí při vybíjení SC	T_4 sepnut, T_1 spínán

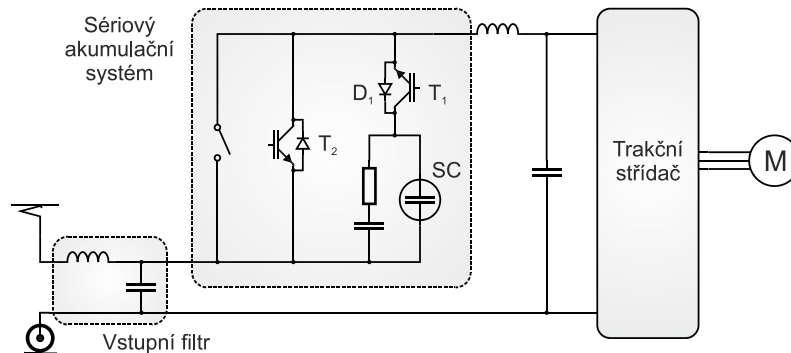
3.1.2 Sériový akumulární systém

Přenos výkonu nemusí být realizován pouze sčítáním proudů (troleje a akumulárního systému), jak tomu bylo v předchozí kapitole, ale i pomocí sčítání napětí v sériové topologii. Z hlediska místa v zapojení, kde je sériové spojení aplikováno, lze sériové akumulární systémy rozdělit na:

- **Sériový akumulární systém na vstupu trakčního střídače**

Tento způsob připojení akumulárního systému, který je popsán v [35] je vhodný pro vozidla, která používají zvyšovací pulzní měnič pro zvýšení napětí na vstupu střídače. Toto zvyšování napětí umožní zvýšení momentu motoru a tím pádem i tažné síly. Stejně tak bude vyšší moment i při brzdě. Běžná topologie těchto vozidel se skládá ze zvyšovacího pulzního měniče (a snižovacího pro rekuperaci) a paralelního akumulárního systému s vlastním pulzním měničem. Popisovaná topologie sériového akumulárního systému spojuje oba

měníče, čímž se ušetří hmotnost a zastavěný prostor ve vozidle. Tato topologie je zobrazena na Obr. 7.

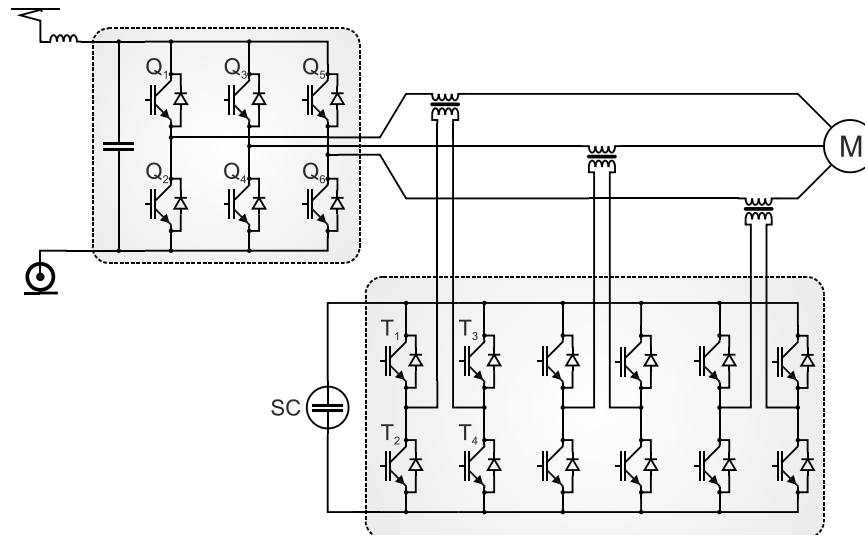


Obr. 7 Zapojení sériového akumulčního systému

Pro vybíjení akumulčního systému při rozjezdu je spínán tranzistor T_1 , který sériově připojuje superkondenzátor. Změnou poměrného sepnutí je regulováno napětí sériového akumulčního systému. Superkondenzátor je tedy vybíjen přímo proudem tekoucím (přes filtr) do trakčního střídače. Při brzdění je superkondenzátor nabíjen opět proudem z trakčního střídače, který protéká diodou D_1 . Pro regulaci napětí, je v režimu brzda spínán tranzistor T_2 .

- **Sériový akumulční systém na výstupu trakčního střídače**

Dalším systémem používajícím sériové spojení může být systém využívající transformátory pro sčítání výkonu. Připojení pomocí tří transformátorů sériově spojených s trakčním motorem popisuje [36]. Pro napájení transformátorů ze superkondenzátoru je zapotřebí další střídač. Celé zapojení je zobrazeno na Obr. 8.



Obr. 8 Akumulační systém využívající transformátory sériově zapojené s vinutím motoru

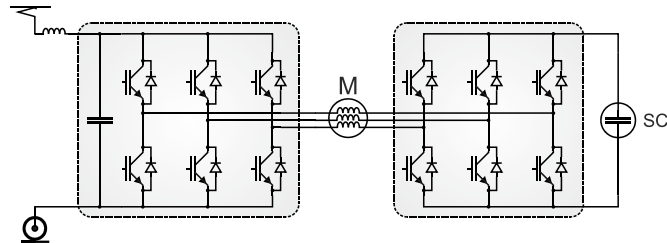
V případě funkce bez využití akumulčního systému jsou sepnuty tranzistory T_1 a T_3 . To znamená, že sekundární vinutí transformátoru je vyzkratováno a motor je napájen pouze z hlavního střídače. Stejně tak musí být vyzkratovány ostatní transformátory. V případě, že trolej není schopna rekuperovanou energii přijmout, jsou sepnuty tranzistory Q_1 , Q_2 a Q_3 trakčního měniče. Energie je v tento okamžik ukládána akumulčním systémem pomocí transformátorů. Výhodou tohoto systému je schopnost uložení kinetické energie při vyšších rychlostech, právě díky vyššímu napětí trakčního motoru, které umožní zvýšení momentu právě ve vyšších otáčkách. Ukládání energie je výhodné při vyšších rychlostech z důvodu závislosti kinetické energie na kvadrátu rychlosti.

3.1.3 Speciální topologie akumulčního systému

V této podkapitole je uvedeno několik dalších topologií, které jsou v současnosti ve stádiu výzkumu. Popisované topologie vychází z [37]. Jejich snahou je snížení ztrát (jako u sériových topologií), které vznikají u běžných zapojení průchodem energie přes dva měniče.

- **Oboustranně napájený trakční motor**

Zapojení uvedené na Obr. 9 využívá vlastního střídače akumulčního systému. Řízení tohoto měniče musí být synchronizováno s hlavním trakčním střídačem.

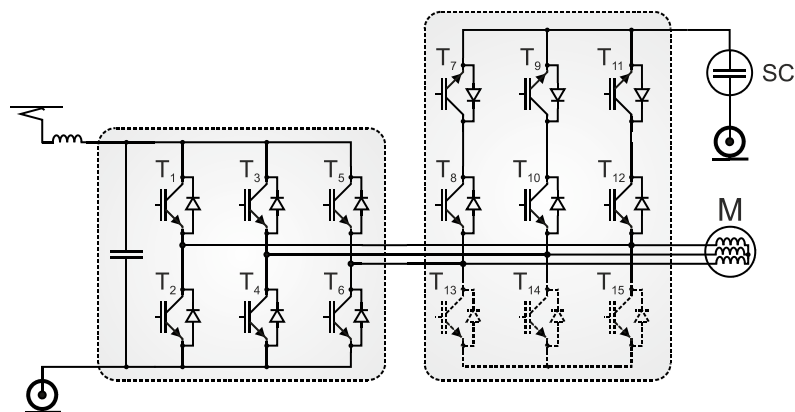


Obr. 9 Akumulační systém využívající oboustranně napájený trakční motor

Nevýhodou této topologie je nutnost vyvedení konců vinutí trakčního motoru.

- **Paralelní střídač akumulčního systému**

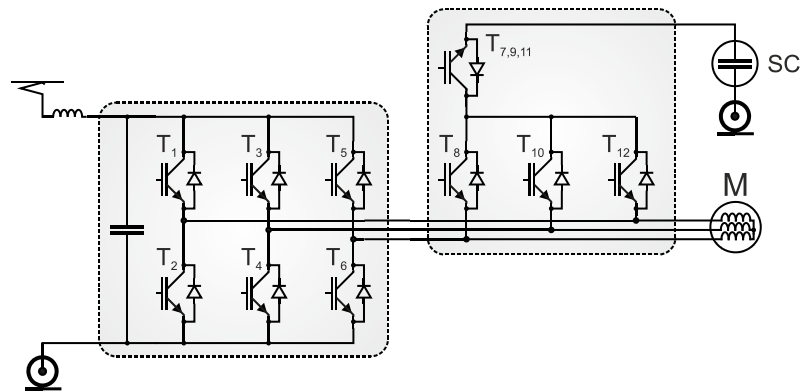
Tato varianta již nevyžaduje zásah do zapojení trakčního motoru, v tomto případě tedy lze použít standardní trakční motor. Jedná se o paralelní řazení střídačů. Zapojení uvedené na Obr. 10 využívá celkem 9 tranzistorů, ovšem toto množství lze snížit, jak ukazuje Obr. 11.



Obr. 10 Akumulační systém využívající paralelní spojení střídačů

Tranzistory T_7 , T_9 a T_{11} lze sloučit v jeden prvek a tranzistory T_{13} , T_{14} a T_{15} lze zastoupit dolními tranzistory v hlavním střídači T_2 , T_4 a T_6 . Samostatnou funkci hlavního střídače lze zajistit vypnutím všech

tranzistorů akumulčního systému $T_{7,9,11}$, T_8 , T_{10} a T_{12} . Samostatná funkce střídače akumulčního systému je zajištěna sepnutím $T_{7,9,11}$ a PWM spínáním horní skupiny T_8 , T_{10} a T_{12} a společné dolní skupiny T_2 , T_4 a T_6 . Pro využití obou střídačů se používá střídání těchto dvou zmíněných módů.



Obr. 11 Zjednodušená varianta paralelního střídače akumulčního systému

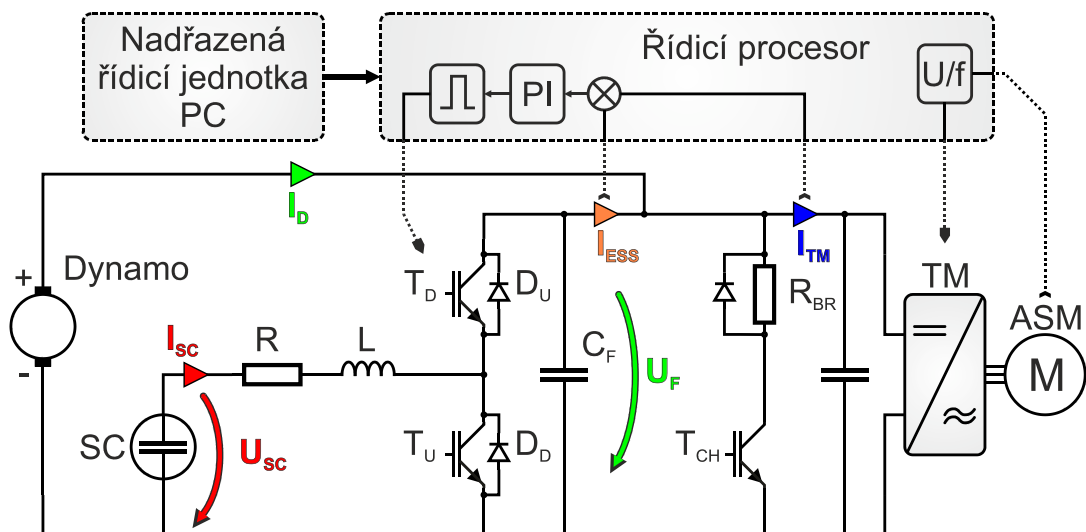
Výhodou této topologie je zvýšení účinnosti díky přímému připojení střídače akumulčního systému k vinutí motoru. Další výhodou je redukován počet spínacích součástí díky využití tranzistorů hlavního střídače. Není zde ani zapotřebí přídavná indukčnost jako u standardní topologie s DC/DC měničem. Odpadají tedy její ztráty a problematika jejího uložení ve vozidle.

3.2 Model vybraného systému akumulace

Pro ověření funkce akumulčního systému se superkondenzátory (dále ESS – z anglického Energy Storage System) byl vytvořen zmenšený model paralelního systému pro napětí SC vždy nižší než stejnosměrné napětí střídače. Paralelní systém byl vybrán z důvodu snadnější zástavby do stávající topologie již provozovaných tramvají. Měnič pro napětí U_{SC} nižší než stejnosměrné napětí střídače byl vybrán z důvodu použití menšího počtu SC modulů, jak bude vysvětleno pomocí návratnosti investice v kapitole 7.

Nejprve byl sestaven model simulační, který byl poté ověřen fyzikálním modelem. Ze schématu zapojení, které ukazuje Obr. 12, je patrné, že model se skládá ze superkondenzátoru SC , tlumivky L (nutné pro funkci měniče), DC/DC měniče pro SC (sestaveným ze snižovacího měniče T_D, D_D , a zvyšovacího měniče T_U, D_U), filtračního kondenzátoru C_F , napěťového trakčního měniče TM a asynchronního motoru ASM . Tranzistor pro brzdový odporník nemusí být použit, protože napájení modelu zajišťuje dynamo, které umožňuje rekuperaci.

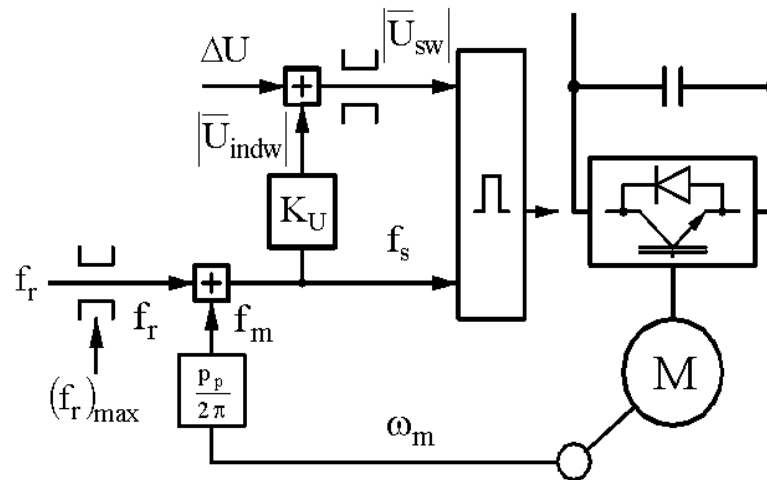
Zmiňovaný Obr. 12 také naznačuje strategii řízení akumulčního systému. PI regulátor řídí spínání tranzistorů DC/DC měniče tak, aby střední hodnota proudu I_{ESS} odpovídala střední hodnotě proudu I_{TM} . Tím vlastně řídí odebíraný proud z dynama I_D na nulovou hodnotu. Řídicí strategie je tedy poměrně jednoduchá: Při každém brzdění nabíjet SC a naopak vybíjet SC při každém požadavku na akceleraci. Nabíjení a vybíjení SC je samozřejmě podmíněno jeho napětím. Musí být zajištěno, aby SC nebyl přebíjen nad maximální povolenou hodnotu.



Obr. 12 Schéma modelu akumulčního systému

Asynchronní motor je řízen metodou konstantního rotorového kmitočtu, která je blíže popsána v [38]. Z tohoto důvodu muselo být použito inkrementální čidlo otáček. Blokové schéma řízení ukazuje Obr. 13.

Rotorový kmitočet je zadáván řídicímu procesoru pomocí nadřazené řídicí jednotky a odpovídá momentu motoru.



Obr. 13 Blokové schéma řízení trakčního měniče (převzato z [38])

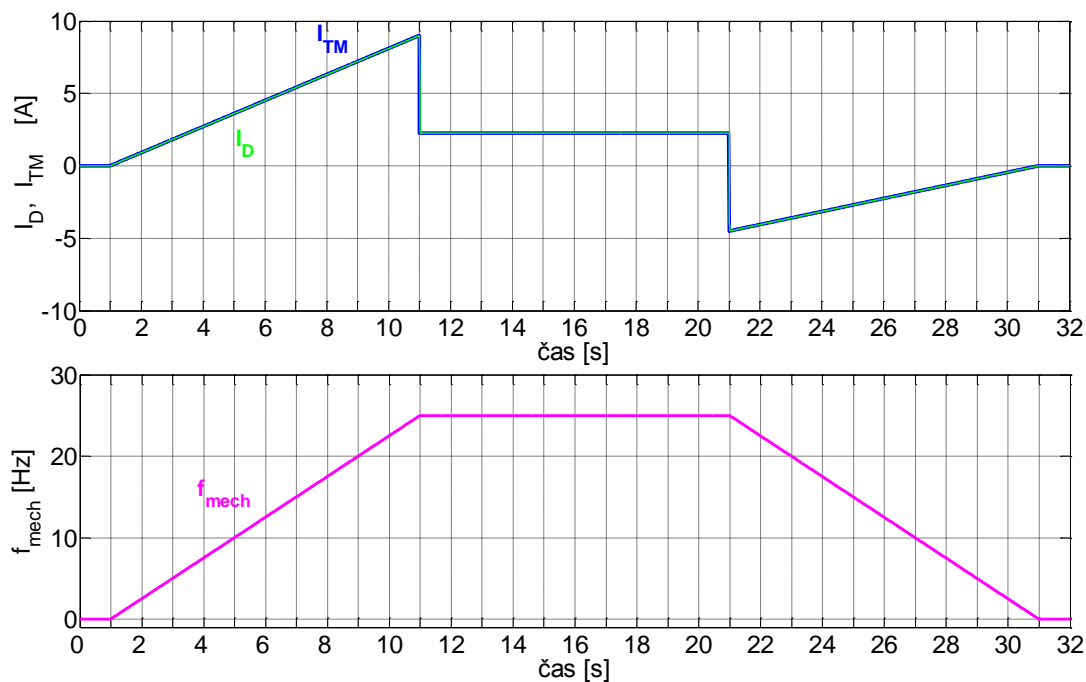
3.2.1 Simulace

Simulovaný systém akumulace vychází ze schématu uvedeného na Obr. 12. V simulaci byl zvolen jednoduchý jízdní profil trati se zadáním požadované rychlosti vozidla, které odpovídá profil otáček motoru ASM (viz Obr. 14 - průběh mechanické frekvence ASM f_{mech}). Stejný profil byl nastaven i pro měření na fyzikálním modelu. Měření a simulace byly prováděny do maximální mechanické frekvence 25 Hz (tato frekvence odpovídá jmenovitým synchronním otáčkám pro použitý čtyřpólový asynchronní motor). Parametry simulace odpovídají parametrům fyzikálního modelu. Tyto parametry ukazuje Tab. 1.

Tab. 1 Parametry systému pro simulaci i měření

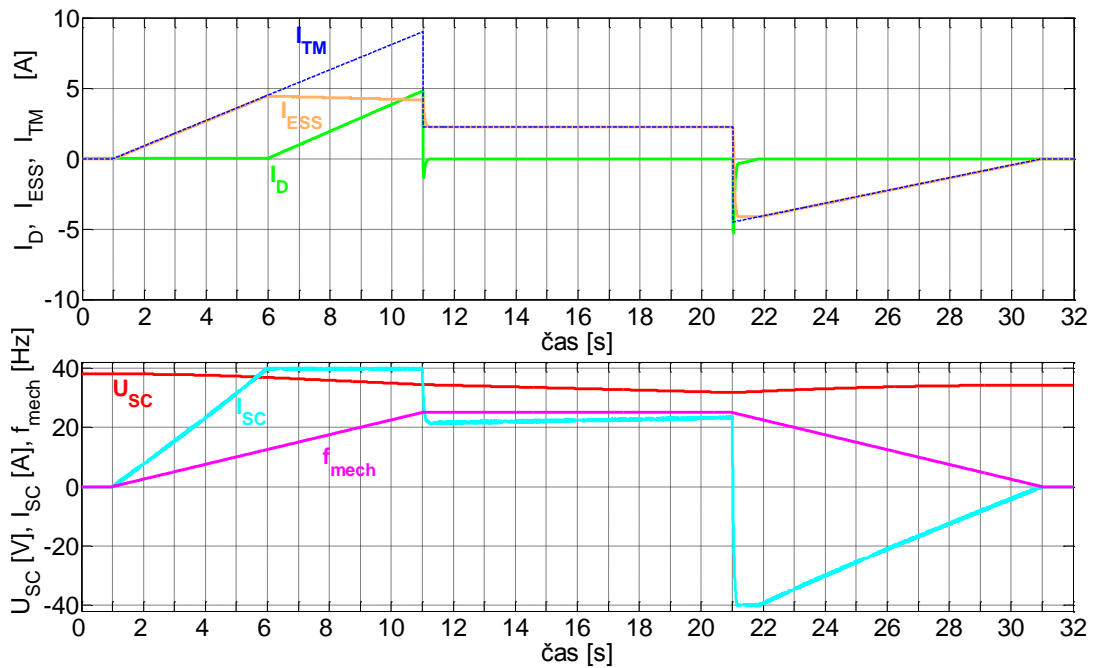
Parametry akumulčního systému	
Výkon	3 kW
Superkondenzátor	83 F / 48 V
Napětí napájecího dynama	320 V
Indukčnost L	9,8 mH
Kondenzátor filtru C_F	7 mF

Brzdňý odporník s tranzistorem je v tomto pŕípadě vynechán, protože napájení zajiřtřuje zdroj schopný i opačné polarity proudu (pŕibřížení k fyzikálnímu modelu, kdy je pro napájení použito dynamo). Simulaci rozběhu a brzdění bez použití akumulaačního systému ukazuje Obr. 14. Popis veličin odpovídá schématu zapojení z Obr. 12.



Obr. 14 Simulace modelu bez použití akumulaačního systému

Z Obr. 14 je patrné, že veřkerý proud zátěže je pochopitelně hrazen pouze z dynamu. Tento pŕůběh lze tedy rozdělit pouze na tŕi časové úseky: rozběh, konstantní otáčky a brzdění. Takto tedy může vypadat běžný provoz motoru. Následující obrázek již ukáže výhody použití akumulaačního systému.



Obr. 15 Simulace modelu s akumulčním systémem

Simulované chování modelu, zobrazeného na Obr. 15, lze rozdělit na šest časových úseků, ve kterých je možno pozorovat rozdílné děje. Simulaci lze tedy rozdělit na následující úseky:

- 0 – 1 s: Stop – není spuštěn motor *ASM*
- 1 – 6 s: Začátek rozběhu – akumulční systém je schopen dodávat výkon potřebný pro rozjezd, protože *SC* byl nabit na napětí $U_{SC} = 39$ V. Díky tomu je odebíráán nulový proud z dynama I_D . *SC* je vybíjen proudem I_{SC} velikostně odpovídajícimu požadovanému výkonu. Vybíjení je patrné z průběhu U_{SC} . Toto napětí klesá nepatrně, protože energie *SC* je ve srovnání s energií soustrojí několikrát větší.
- 6 – 11 s: Konec rozběhu – akumulční systém již není schopen plně dodávat potřebný výkon, protože proud I_{SC} je již omezen na 40 A. Výkon dodávaný akumulčním systémem je tedy nižší než příkon trakčního měniče *TM*, dle rovnice (1), kde značení odpovídá Obr. 12. K omezení tedy dochází díky dosažení maximální dovolené hodnoty proudu I_{SC} , při jeho dalším zvyšování by docházelo k nadměrnému zahřívání *SC*

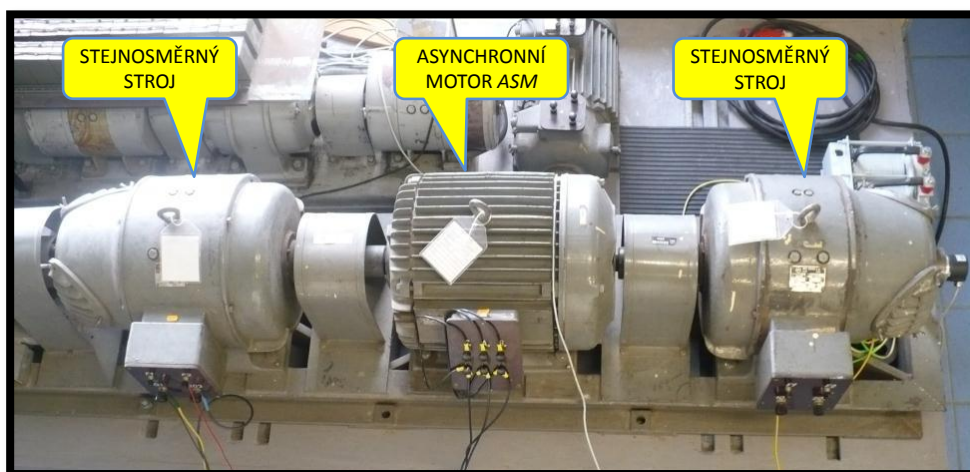
(v tomto případě je proud omezen z důvodu maximálního dovoleného proudu DC/DC měniče superkondenzátoru). Ke snížení výkonu akumulčního systému bohužel dochází také vlivem snižujícího se napětí U_{SC} právě ke konci rozběhu, kdy je požadovaný výkon největší. Odebíraný proud z dynama I_D je nyní roven rozdílu mezi požadovaným I_{TM} a proudem dodávaným akumulčním systémem I_{ESS} . SC je tedy vybíjen maximálním dovoleným proudem.

$$U_{SC} \cdot I_{SC} < U_F \cdot I_{TM} \quad [V, A] \quad (1)$$

- 11 – 21 s: Konstantní otáčky – v tento časový úsek jsou z akumulčního systému plně hrazeny ztráty soustrojí při jmenovitých otáčkách. Příkon trakčního měniče je nyní menší než při rozběhu a akumulční systém je schopen hradit jeho plnou velikost. Z tohoto důvodu je z dynama odebíraný proud I_D nulový. SC je tedy opět vybíjen proudem I_{SC} velikostně odpovídajícím požadovanému výkonu.
- 21 – 22 s: Začátek brzdění – po tento poměrně krátký okamžik není velikost U_{SC} dostatečná pro absorpci brzdného výkonu. Pro dosažení tohoto výkonu by byl požadován proud $I_{SC} > 40$ A. Proud I_{SC} je tedy omezen a SC je nabíjen maximálním proudem a jeho napětí U_{SC} tudíž roste. Proud I_D je tedy opět rozdílem mezi I_{TM} a I_{ESS} . Z počátku je do dynama dodáván dokonce celý proud I_{TM} , což je způsobeno zpožděním akumulčního systému. Toto zpoždění je dáno dobou potřebnou pro změnu směru proudu v indukčnosti a vlastnostmi PI regulátoru.
- 22 – 31 s: Konec brzdění – v tomto úseku již brzdný výkon soustrojí klesl natolik, že je již akumulční systém schopen ho plně absorbovat. K této schopnosti částečně přispělo i zvýšení napětí U_{SC} . SC je v tuto chvíli nabíjen z kinetické energie soustrojí. Proud I_D je nulový, protože veškerý výkon absorbuje SC .

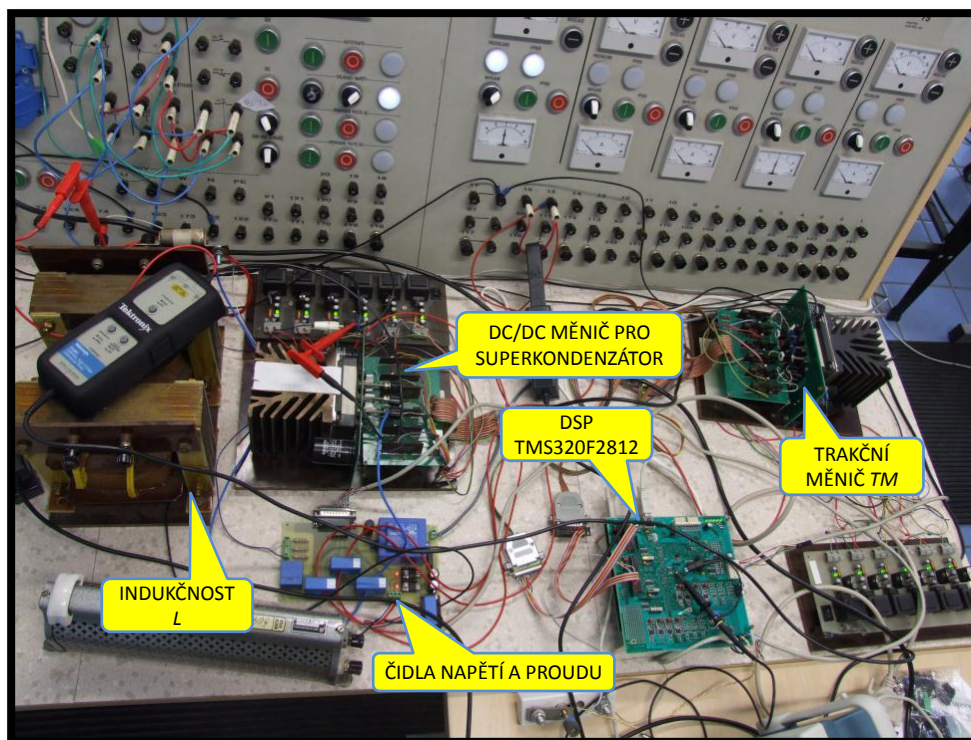
3.2.2 Experimenty

Aby bylo možné ověřit simulace, byl vytvořen i fyzikální model akumulčního systému, který odpovídá uvedenému schématu na Obr. 12. Jako trakční motor *ASM* je použit asynchronní čtyřpólový motor s kotvou nakrátko o jmenovitém výkonu 14 kW, který je mechanicky spřažen s dalšími třemi stroji podobného výkonu (asynchronní stroj s vinutou kotvou a dva stroje stejnosměrné). Toto soustrojí čtyř motorů bylo zvoleno pro velký moment setrvačnosti, který zastupuje setrvačnost vozidla. Na Obr. 16 je fotografie spřaženého soustrojí (vlevo mimo fotografii je asynchronní stroj s vinutou kotvou 7 kW, na fotografii vlevo je stejnosměrný stroj 8,8 kW, dále asynchronní stroj s kotvou nakrátko 14 kW a stejnosměrný stroj 12,7 kW). Stejnoseměrný stroj 12,7 kW může být využit k simulaci libovolného profilu trati a proměnlivému momentu setrvačnosti pro emulaci tramvaje jedoucí na konkrétní lince.



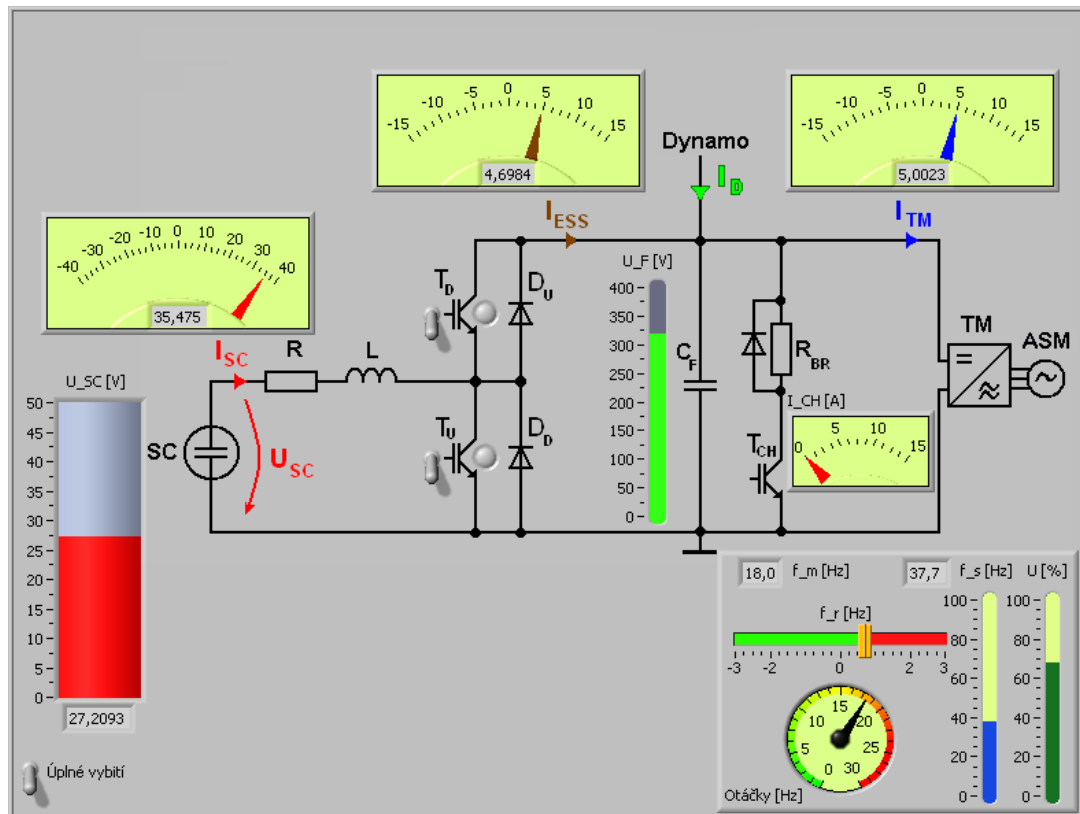
Obr. 16 Soustrojí použité ve fyzikálním modelu systému akumulce

Celý systém je řízen pomocí DSP TMS320F2812 od firmy Texas Instruments. Rozmístění částí systému na měřicím pultu ukazuje Obr. 17.



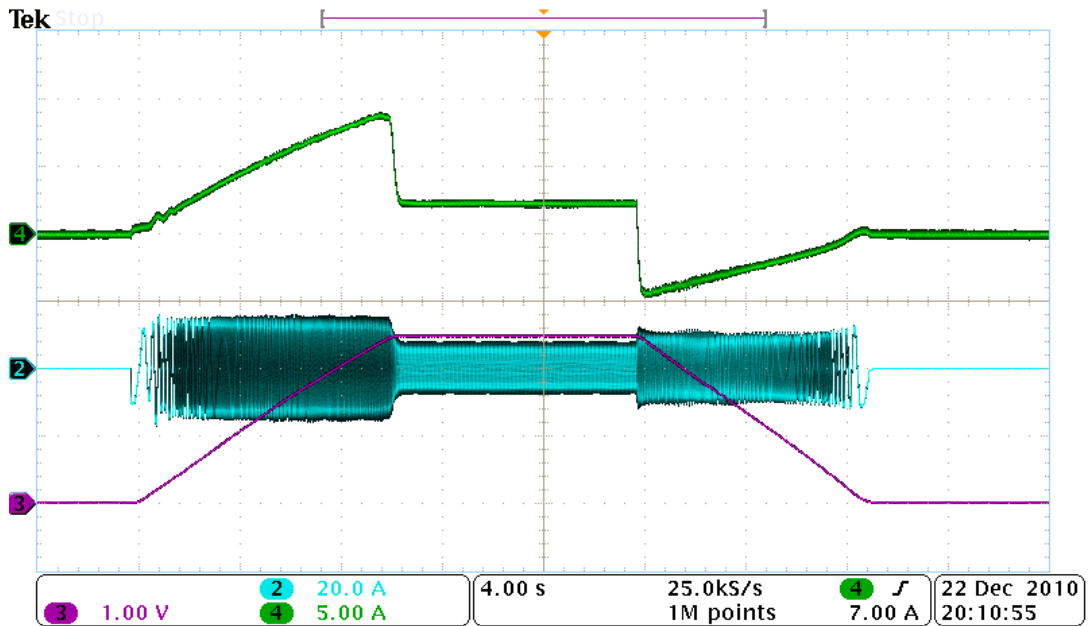
Obr. 17 Zapojení modelu akumulčního systému

Nadřazená řídicí jednotka byla vyvinuta v prostředí LabView a implementována do řídicího PC. Obr. 18 ukazuje grafický vzhled nadřazené jednotky. Jednotka umožňuje sledovat parametry systému (proudy, napětí). V pravém dolním rohu je panel s řízením trakčního střídače *TM*, jsou zde zobrazovány parametry U/f řízení a mechanická frekvence soustrojí.



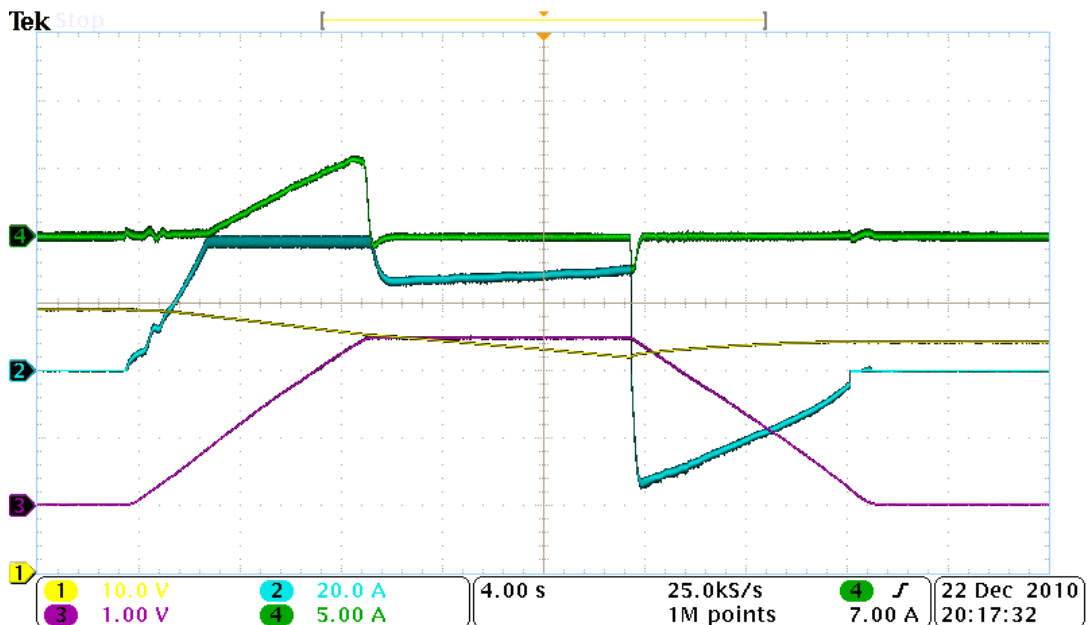
Obr. 18 Nadřazená řídicí jednotka

Následující obrázky ukazují oscilogramy z měření na fyzikálním modelu. Soustrojí bylo měřeno při stejném zatěžovacím profilu, který byl použit i pro simulace. Tento profil je vidět na průběhu mechanické frekvence f_{mech} na Obr. 19 (kanál 3, 10Hz/div).



Obr. 19 Rozběh a brzdění bez použití akumulčního systému

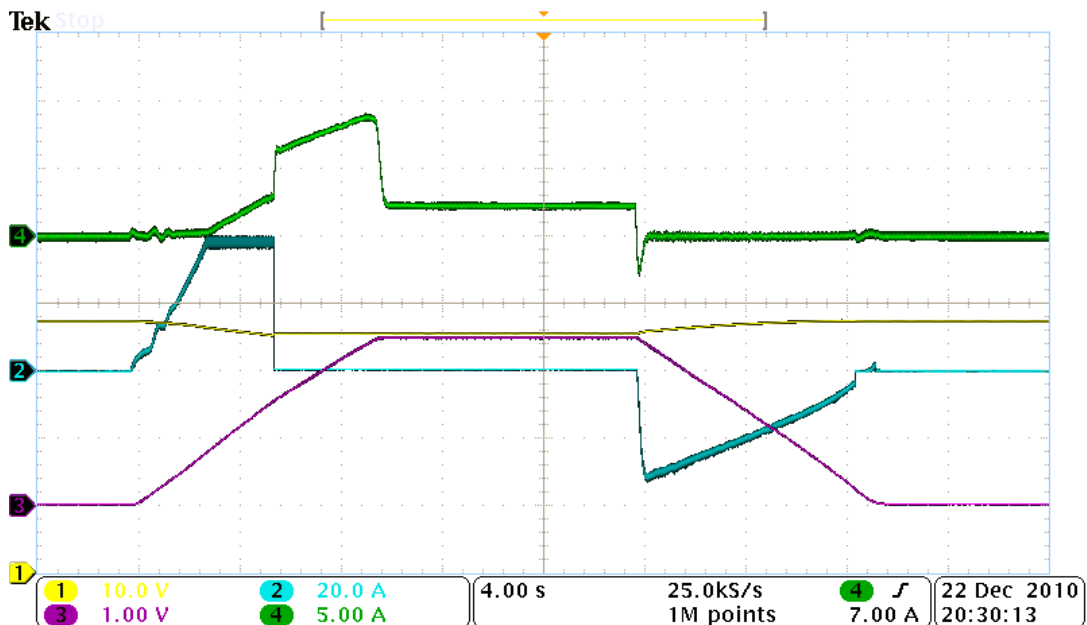
Na Obr. 19 je zobrazen oscilogram z rozběhu měřeného soustrojí bez aplikace akumulčního systému. Kanál 2 ukazuje fázový proud z trakčního střídače (20 A/div), kanál 3 zobrazuje mechanickou frekvenci f_{mech} (10 Hz/div), kanál 4 ukazuje odebíraný proud z dynama I_D (5 A/div). Bez použití akumulčního systému je zřejmé, že plný proud rozběhu je hrazen z dynama (stejně tak při brzdění je plný proud dodáván do dynama). Simulace tohoto experimentu byly ukázány na Obr. 14. Obrázek Obr. 20 již ukazuje měření s akumulčním systémem.



Obr. 20 Rozběh a brzdění s akumulacním systémem

Kanál 1 zobrazuje napětí superkondenzátoru U_{SC} (10 V/div), kanál 2 ukazuje proud tekoucí superkondenzátorem I_{SC} (20 A/div), kanál 3 zobrazuje mechanickou frekvenci f_{mech} (10 Hz/div) a kanál 4 ukazuje odebíraný proud z dynama I_D (5 A/div). Z průběhu proudu z dynama I_D je patrné, že akumulacní systém hradí první cca 4s rozběhu. Po této době je již proud tekoucí superkondenzátorem I_{SC} omezen (40 A je limit použitého pulzního měniče) a proto není systém schopen dodávat plný potřebný výkon. Zbývající výkon je tedy odebírá z dynama. Po dokončení rozběhu, kdy jsou otáčky již konstantní, odebírá soustrojí výkon pokrývající pouze ztráty. Tento výkon je již akumulacní systém schopen dodávat v plné výši. Na průběhu proudu I_{SC} je patrná regulace, kdy regulátor zvyšuje proud I_{SC} z důvodu klesajícího napětí na superkondenzátoru U_{SC} . Tímto regulátor zajistí dodávání potřebného výkonu. V okamžiku, kdy nastává brzdění, otáčí se směr proudu I_{SC} , a jedná se tedy o ukládání energie do SC. Akumulacní systém reaguje se zpožděním způsobeným dobou nutnou pro změnu smyslu proudu tekoucího indukčností, dopravním zpožděním filtrů a regulátoru. Ukládání energie do superkondenzátoru se opět projeví nárůstem napětí U_{SC} .

Tímto experimentálním měřením byla ověřena korektnost simulace, jejíž výsledek byl zobrazen na Obr. 15. Nepatrné rozdíly mezi měřením a simulací jsou způsobeny ztrátami na měničích, které nebyly v simulacích uvažovány.



Obr. 21 Rozběh a brzdění s akumulacním systémem ($U_{SCmin} = 35V$)

Obr. 21 ukazuje chování akumulacního systému při zadání minimálního napětí $U_{SCmin} = 35 V$. Popis měřených veličin odpovídá popisu k Obr. 20. Prvních 5 s rozběhu je totožný s rozběhem na Obr. 20. Po této části rozběhu dochází k blokování pulzního měniče z důvodu nastaveného minimálního napětí $U_{SCmin} = 35 V$. Proto se odebíraný proud z dynama téměř skokově změní. Od tohoto okamžiku je tedy rozběh hrazen pouze z dynama proudem I_D . Akumulacní systém reaguje, až v okamžiku, kdy začíná brzdění. Superkondenzátor v tento okamžik začne absorbovat kinetickou energii soustrojí a bude tak připraven pro další rozběh.

V následující tabulce Tab. 2 je uveden soupis nejdůležitějších komponent použitých při měření na fyzikálním modelu akumulčního systému.

Tab. 2 Použité vybavení při měření

Název	Výrobce	Typ	Evidenční číslo
Superkondenzátor SC	Maxwell	BMOD0083 P048B01	N/A
Napěťový střídač TM	AEG	AEG F6-50 R1200KF	N/A
DC/DC měnič pro SC	AEG	AEG F6-50 R1200KF	N/A
Asynchronní motor ASM	Mez Frenštát	14kW 1460ot/min	5488233
Digitální signálový procesor DSP	Texas Instruments	TMS320F2812	EL105/6
Měřicí deska napětí	LEM	LV 25-P	70628
Měřicí deska proudu	LEM	LA 55-P	N/A
Osciloskop	Tektronix	TDS 3014B	500402
Proudové sondy	Tektronix	A622	N/A
Napěťová dif. sonda	Tektronix	P5205	N/A

4 Podklady pro simulaci tramvaje

Tato kapitola se věnuje aplikaci akumulčního systému se superkondenzátory na konkrétní tramvaj jedoucí na reálné městské lince.

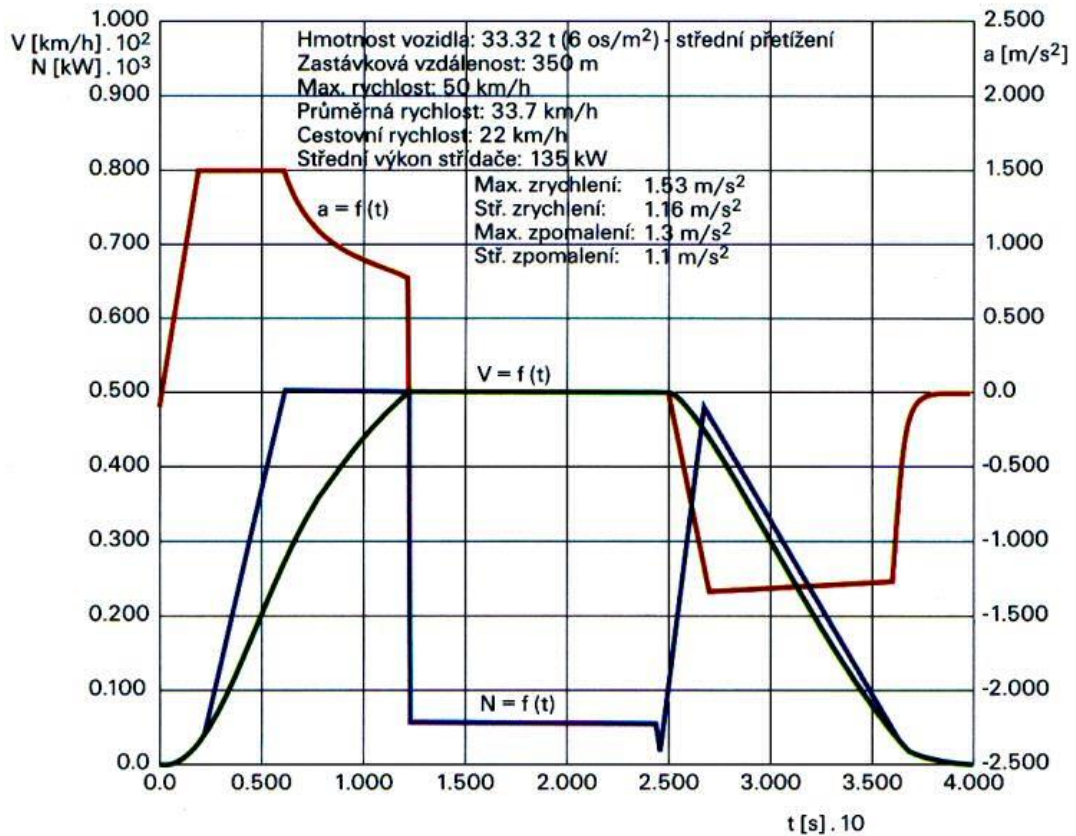
4.1 Parametry tramvaje

Protože ověření simulačního modelu bude provedeno porovnáním se skutečnými naměřenými daty, měl by i simulační model obsahovat parametry stejné tramvaje. Naměřená data, jejichž rozbor je uveden v kapitole 4.3, pocházejí z protokolu o měření odběrů tramvaje LTM 10.08 [39], který obsahuje měření při různých zátěžích včetně přetížení vozu. V simulaci je proto uvažována tříčlánková nízkopodlažní tramvaj Škoda LTM 10.08, která byla později označována Škoda 03T a známá pod přezdívkou Astra (Asynchronní tramvaj). Hlavní parametry tramvaje uvedené v Tab. 3 vycházejí z [40].

Tab. 3 Základní parametry tramvaje 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
Brzdový maximální výkon	750 kW

Průběhy zrychlení, výkonu a rychlosti tramvaje LTM 10.08 o hmotnosti 33,32 t na rovném úseku jsou uvedeny v Obr. 22.



Obr. 22 Rozjezd a brzda tramvaje LTM 10.08 (převzato z [40])

Převážná kapacita tramvaje je uvedena v následující tabulce Tab. 4. Hmotnost uvažované osoby je 70 kg.

Tab. 4 Převážná kapacita tramvaje LTM 10.08

Celková obsazenost	Počet osob	Hmotnost tramvaje
prázdná tramvaj	0	24 200 kg
střední obsazení 4 os/m ² + 41 sedících + řidič	131	33 440 kg
normální obsazení 5 os/m ² + 41 sedících + řidič	154	35 050 kg
maximální obsazení 8 os/m ² + 41 sedících + řidič	221	39 740 kg
přetížení 10 os/m ² + 41 sedících + řidič	267	42 960 kg

4.2 Tramvajová linka

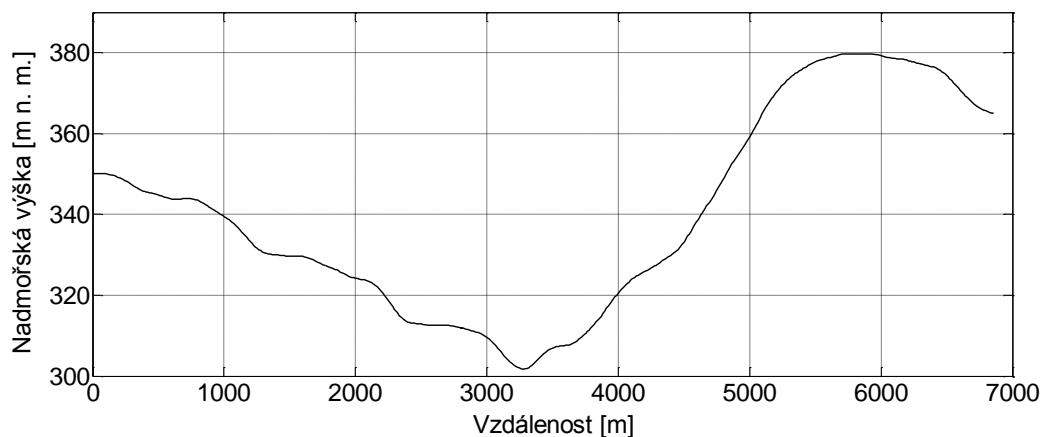
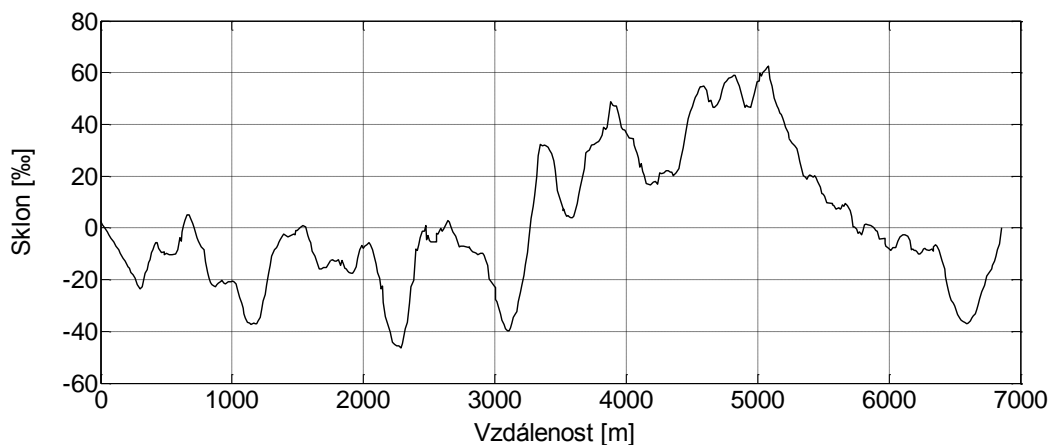
Tramvajová linka č. 4 v Plzni byla zvolena z důvodu její velké vytíženosti a výškového rozdílu mezi koncovými zastávkami. Na lince se nachází celkem 16 zastávek. Výpis zastávek včetně jejich vzdálenosti na trati a nadmořské výšky je uveden v Tab. 5. Výškový profil celé linky byl

změřen pomocí GPS navigace Garmin GPSmap 60CSx. Měření bylo provedeno v obou směrech a na konečných zastávkách byl přístroj vždy kalibrován dle nejbližších nivelačních bodů. Informace o nivelačních bodech lze zjistit na webových stránkách Zeměměřického úřadu [41]. Kalibrace byla prováděna z důvodu eliminace závislosti měřené výšky na změně barometrického tlaku. Při větších změnách tlaku se může měřená výška měnit až o 10 m/hod. Možnost kalibrace pomocí GPS signálu byla zakázána, protože její přesnost je závislá na síle GPS signálu a pohybuje se v rozmezí cca 3-20 m. Citlivost barometrického výškoměru je 0,1 m a při správné kalibraci tak lze dosáhnout přesnějšího výsledku. Změřený výškový profil byl ověřen pomocí map udávajících nadmořskou výšku, které jsou dostupné zde [42].

Tab. 5 Zastávky na lince č. 4 v Plzni

č.	Zastávka	Vzdálenost [m]	Nadmořská výška [m n. m.]
0	Bory	0	350
1	Dvořákova	319	347
2	Náměstí Míru	685	343
3	Dobrovského, Klatovská	1154	335
4	Chodské náměstí	1426	330
5	Masarykovo náměstí	1833	327
6	U Práce, Klatovská	2120	323
7	V sadech Pětatřicátníků	2576	313
8	Pod Záhorskem	3776	312
9	Lékařská fakulta, Karlovarská	4335	329
10	Ulice 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

Výškový profil celé trati ve směru Bory → Košutka je uveden na Obr. 23. Derivací výškového profilu dle vzdálenosti získáme sklon, který je vykreslen na následujícím Obr. 24.

**Obr. 23 Výškový profil linky č. 4 v Plzni****Obr. 24 Sklon linky č. 4 v Plzni**

Protože vozidlo nestaví pouze na zastávkách, byly zaměřeny i některé křižovatky. Jedním kritériem pro výběr křižovatek byla tzv. “zelená vlna”, což z výběru vyloučí křižovatky, na kterých vozidla z pravidla stavit nemusí. Dále byly z výběru vyloučeny ty křižovatky, ve kterých vozidlo stojí zároveň v zastávce, a tudíž zde stává vždy. Výčet křižovatek včetně nadmořské výšky je uveden v Tab. 6.

Tab. 6 Vybrané křižovatky na lince č. 4 v Plzni

č.	Křižovatka	Vzdálenost [m]	Nadmořská výška [m n. m.]
0	Sukova	517	345
1	Dobrovského	1007	340
2	U trati	1619	330
3	V sadech Pětatřicátníků	2410	313
4	Lidická	4080	324
5	Na Chmelnicích	4419	330
6	Studentská	5983	379
7	U Jam	6609	371

Následující tabulka ukazuje počet tramvají na lince v různou denní dobu v pracovní dny i svátky. Tabulka je rozdělena na hodinové intervaly. Čas 0 h tedy znamená interval 0:00 až 0:59 apod.

Tab. 7 Počet tramvají na lince

Počet tramvají na lince č. 4																								
Čas [h]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Po-Pá	1	0	0	0	5	11	14	20	13	13	13	13	13	14	17	17	17	17	13	11	9	7	7	7
So-Ne	1	0	0	0	3	6	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	5	5	5

Pro větší názornost a pro použití ve stochastickém modelu byly simulačně zjištěny teoretické hodnoty pravděpodobnosti výskytu určitého počtu tramvají v jednotlivých napájecích úsecích. Pro zjištění pravděpodobností byla použita jednoduchá simulace, která vychází z délky trati, počtu tramvají na lince a z délek napájecích úseků. Všechny tramvaje jsou v simulaci nejprve rovnoměrně rozloženy po celé délce trati v obou směrech a po té jsou cyklicky posouvány po trati. Po každém posunutí jsou vyhodnoceny počty tramvají v úsecích a z nich jsou poté vypočteny i četnosti různých počtů tramvají v úsecích. Četnosti a z nich vyplývající pravděpodobnosti jsou zjišťovány pro 0, 1, 2, 3 a >3 tramvaje v úseku. Zjištěné pravděpodobnosti jsou pouze teoretické, protože nezohledňují některé další vlivy, ze kterých je nejvýznamnější časové zpoždění způsobené proměnlivou dopravní situací. Skutečný počet tramvají v úseku závisí i na rozmístění zastávek. Nejvíce patrný rozdíl je v nejkratším úseku

Pošta, kde se často potkají i více jak tři tramvaje, protože se zde nachází dokonce přestupní zastávka. Z hlediska výpočtu ztrát v troleji je tento rozdíl zanedbatelný, protože v krátkém úseku budou tramvaje blízko sebe, a tudíž ztráty v troleji nebudou tolik významné. Další vliv, který není zahrnut, jsou plovoucí intervaly jízdního řádu (v průběhu dne se dle počtu tramvajů mění časové intervaly). Dále není uvažováno zpoždění vlivem dopravní situace a společná část trati s jinou linkou (s linkou č. 1). Z hlediska energetické bilance jsou vozidla linky č. 1 již zahrnuta ve statistických analýzách. Výsledky počtu tramvajů v napájecím úseku jsou uvedeny v Tab. 8 jak pro dopravní špičku, tak i mimo ni.

Tab. 8 Pravděpodobnost počtu tramvajů v napájecích úsecích v [%]

Pravděpodobnost [%] mimo špičku - 12h, 13 tramvajů na lince						
č.	Napájecí úsek	Počet tramvajů v úseku				
		0	1	2	3	>3
1	Bory	0	17	83	0	0
2	Chodské náměstí	18	65	17	0	0
3	Hálkova	0	19	81	0	0
4	Pošta	73	27	0	0	0
5	Rondel	0	0	91	9	0
6	Lochotín	0	36	64	0	0
7	Cizinecký dům	32	32	36	0	0
8	Košutka	0	44	56	0	0
9	Šídlovák	0	24	76	0	0

Pravděpodobnost [%] v dopravní špičce - 7h, 20 tramvajů na lince						
č.	Napájecí úsek	Počet tramvajů v úseku				
		0	1	2	3	>3
1	Bory	0	0	19	81	0
2	Chodské náměstí	0	47	53	0	0
3	Hálkova	0	0	35	53	12
4	Pošta	58	42	0	0	0
5	Rondel	0	0	24	31	45
6	Lochotín	0	0	72	5	23
7	Cizinecký dům	10	18	72	0	0
8	Košutka	0	0	70	20	10
9	Šídlovák	0	0	31	69	0

Pro simulační model tramvaje je z důvodu zjednodušení použita pouze pravděpodobnost v době mimo dopravní špičku, tzn. pro 13 tramvajů na lince. Tento počet tramvajů byl vybrán, protože se na lince objevuje po nejdelší dobu z celého pracovního dne.

4.3 Rozbor změřených dat

Pro ověření správnosti simulačního modelu bylo využito změřených dat tramvaje na reálné lince zpracovaných v [39]. Měření bylo provedeno výrobcem tramvaje v roce 1998 a to v rozmezí 4. května až 23. června. Celkově bylo změřeno třicet jízd na lince č. 4. Měřená tramvaj byla typu LTM 10.08. Jednotlivé jízdy probíhaly dle tehdejšího jízdního řádu v různé dny v týdnu (Po, Út, Pá i So). Čas měření se pohyboval v rozmezí 7-14 h. Dalším důležitým údajem pro nastavení simulačního modelu je pobyt v zastávkách 20 s. Z rozboru dat byl pro simulační model určen střední výkon pomocných pohonů, jehož hodnota se pohybuje kolem 4 kW.

V následujících tabulkách Tab. 9 až Tab. 12 jsou uvedeny výsledky měření vyhodnocené v [39]. Hodnoty jsou uvedeny po odečtení spotřeby topení. Výpočty poměrných energií popisují následující rovnice.

$$E_C = E_S - E_R \text{ [kWh]} \quad (2)$$

$$e_R = \frac{E_R}{E_S} \cdot 100 \quad [\%, \text{kWh, kWh}] \quad (3)$$

$$e_{odp} = \frac{E_{odp}}{E_{odp} + E_R} \cdot 100 \quad [\%, \text{kWh, kWh}] \quad (4)$$

E_C	...	energie celková [kWh]
E_S	...	energie spotřebovaná [kWh]
E_R	...	energie rekuperovaná do troleje [kWh]
e_R	...	poměrná rekuperovaná energie [%]
e_{odp}	...	poměrná energie mařená v brzdovém odporu [%]
E_{ODP}	...	energie mařená v brzdovém odporu [kWh]

Tab. 9 Výsledky měření spotřeb prázdné tramvaje LTM 10.08

0 osob/m ²					
E _C [kWh]	E _S [kWh]	E _R [kWh]	e _R [%]	E _{odp} [kWh]	e _{odp} [%]
Směr: Bory → Košutka					
15,14	19,24	4,1	21,31	0,29	6,61
15,1	18,94	3,84	20,27	0,42	9,86
16,16	20,59	4,43	21,52	0,72	13,98
14,37	18,96	4,59	24,21	0,69	13,07
16,32	21,76	5,44	25	0,69	11,26
Směr: Košutka → Bory					
12,46	17,22	4,76	27,64	0,28	5,56
11,44	16,48	5,04	30,58	0,1	1,95
12,7	18,63	5,93	31,83	0,23	3,73

Tab. 10 Výsledky měření spotřeb středně obsazené tramvaje

5 osob/m ²					
E _C [kWh]	E _S [kWh]	E _R [kWh]	e _R [%]	E _{odp} [kWh]	e _{odp} [%]
Směr: Bory → Košutka					
18,49	23,96	5,47	22,83	0,55	9,14
17,19	22,26	5,07	22,78	0,52	9,3
17,22	21,55	4,33	20,09	0,58	11,81
17,58	23,24	5,66	24,35	0,5	8,12
Směr: Košutka → Bory					
14,06	20,33	6,27	30,84	0,4	6
13,72	20,09	6,37	31,71	0,29	4,35
14,89	21,67	6,78	31,29	0,4	5,57
14,69	21,98	7,29	33,17	0,31	4,08

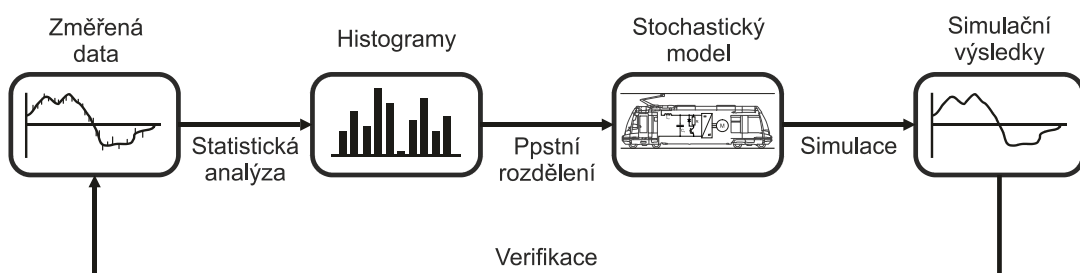
Tab. 11 Výsledky měření spotřeb plné tramvaje

8 osob/m ²					
E _C [kWh]	E _S [kWh]	E _R [kWh]	e _R [%]	E _{odp} [kWh]	e _{odp} [%]
Směr: Bory → Košutka					
20,24	24,65	4,41	17,89	0,94	17,57
19,05	24,04	4,66	20,76	0,71	12,46
19,6	24,61	5,01	20,36	0,75	13,02
Směr: Košutka → Bory					
16,13	22,61	6,48	28,66	0,55	7,82
15,41	21,33	5,92	27,75	0,44	6,92
15,45	21,9	6,45	29,45	0,33	4,87

Tab. 12 Výsledky měření spotřeb přetížené tramvaje

10 osob/m ²					
E_C [kWh]	E_S [kWh]	E_R [kWh]	e_R [%]	E_{odp} [kWh]	e_{odp} [%]
Směr: Bory → Košutka					
24,56	30,71	6,15	20,03	1,93	23,89
23,32	28,21	4,89	17,33	1,79	26,8
24,97	28,88	3,91	13,54	2,59	39,85
25,61	31,12	5,51	17,71	2,58	31,89
Směr: Košutka → Bory					
17,3	24,51	7,21	29,42	0,73	9,19
20,62	25,63	5,01	19,55	2,21	30,61
24,04	30,77	6,73	21,87	2,71	28,71
23	27,97	4,97	17,77	2,62	34,52

Pro vytvoření věrohodných simulačních výsledků byl vyvinut stochastický model tramvaje jedoucí na lince č. 4. Z tohoto důvodu bylo nutné změřená data statisticky vyhodnotit a vytvořit tak pravděpodobnostní podklady pro simulační model. Statistickou analýzou byly určeny četnosti různých stavů vybraných veličin. Výsledky těchto analýz jsou znázorněny pomocí histogramů a slouží pak jako pravděpodobnostní rozdělení pro generátory pseudonáhodných čísel ve zmiňovaném stochastickém modelu tramvaje. Na obrázku Obr. 25 je patrný princip použití změřených dat.

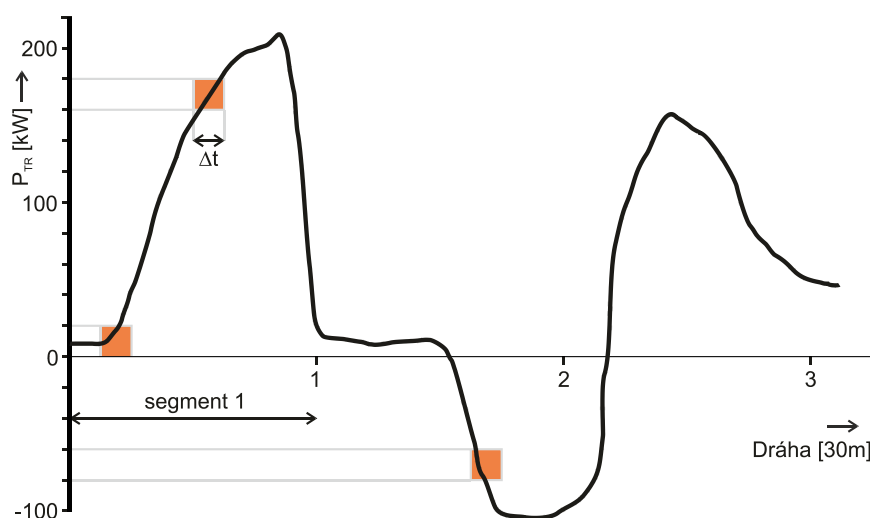


Obr. 25 Využití změřených dat pro stochastický model

- Četnost výkonu troleje pro režim brzda i pohon

První analýza změřených dat ukazuje celkovou četnost výkonu troleje P_{TR} z hlediska jedné měřené tramvaje. Výkon je kvantován do jednotlivých hladin po 20 kW a dráha trati je kvantována po 30 m

na jednotlivé segmenty. Vzorkovací perioda Δt byla pro všechny následující analýzy shodná se vzorkovací periodou při měření. V analýze jsou započteny oba směry výkonu, tedy pro režim rozjezd i brzda. Princip výpočtu četnosti je naznačen pomocí tří příkladů na Obr. 26. V prvním příkladu zleva je o 1 zvýšena četnost u hladiny $P_{TR} = 0 \div 20$ kW, druhý příklad ukazuje zvýšení hodnoty četnosti pro hladinu $P_{TR} = 160 \div 180$ kW a třetí pro hladinu $P_{TR} = -(60 \div 80)$ kW. Pro jednoduchost je graf uveden při konstantní rychlosti.



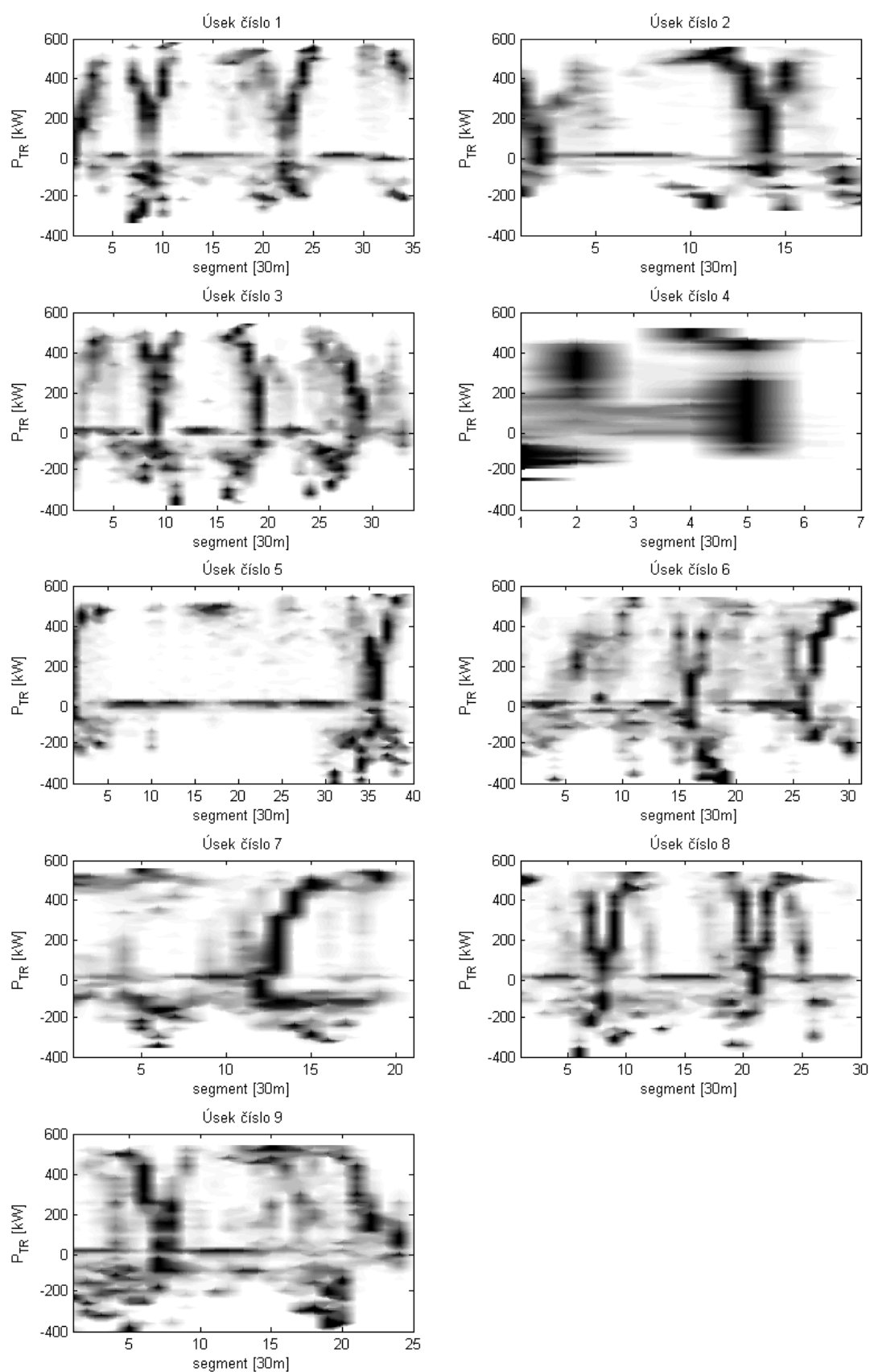
Obr. 26 Princip výpočtu četnosti výkonu odebíraného i dodávaného do troleje dle polohy na trati

Tímto způsobem zpracovaná data jsou použitelná ve stochastickém modelu pro rekonstrukci výkonu tramvaje nacházející se v libovolném místě trati. Výsledné četnosti byly zpracovány do devíti grafů na Obr. 27, které jsou rozděleny podle napájecích úseků. Protože jsou napájecí úseky různě dlouhé, vychází pro ně tedy i různý počet třicetimetrových segmentů. Jednotlivé napájecí úseky jsou uvedeny v Tab. 13. Celková vzdálenost je zde uvedena vyšší než ve výpisu zastávek, protože jsou započteny i vzdálenosti točky Bory a Košutka.

Tab. 13 Napájecí úseky linky č. 4 (převzato z [43])

č.	Napájecí úsek	Vzdálenost [m]		Délka úseku [m]
		od	do	
1	Bory	0	1005	1005
2	Chodské náměstí	1005	1551	546
3	Hálkova	1551	2543	992
4	Pošta	2543	2694	151
5	Rondel	2694	3844	1150
6	Lochotín	3844	4742	898
7	Cizinecký dům	4742	5319	577
8	Košutka	5319	6177	858
9	Šídlovák	6177	7140	963

Pouze pro lepší čitelnost grafu byla vypočtená data normována v každé hladině výkonu dle maximální hodnoty. Každý vektor výkonu byl tedy normován dle vektorové maximové normy. Po znormování je v grafu lépe patrné rozložení výkonu do segmentů trati nezávisle pro každou hladinu výkonu. Nestane se tak, že by byla četnost vyšších výkonů zanedbatelně nižší, než četnost výkonů kolem nuly. To by v grafu potlačilo zobrazení právě vyšších výkonů. Dále byla tato data lineárně interpolována, což vede ke zdánlivému „rozmazání“, obzvláště pak v napájecím úseku číslo 4, který se dělí kvůli své délce pouze na 6 segmentů. Ve většině úseků je patrné poměrně rovnoměrné rozdělení velmi nízkých výkonů po celé délce úseku. Z grafu jsou patrné i polohy zastávek, které se projevují specifickým obrazcem, který v ideálním případě připomíná písmeno „X“. Horizontální symetrie obrazce je způsobena tím, že byla použita data pro oba směry jízdy. Vertikální symetrie je pak způsobena brzděním a rozjížděním tramvaje. Dobře jsou patrné například zastávky *Sokolovská* a *Severka* v úseku číslo 8. Obrazec těchto zastávek se jeví symetricky díky poměrně malému tedy zanedbatelnému sklonu trati. Při malém sklonu je totiž rozjezdový nebo brzdový výkon v obou směrech podobný. Zastavení v místě trati s velkým sklonem se projeví velkým rozjezdovým výkonem v jednom směru a velkým brzdovým výkonem v opačném směru. Toto je patrné například na zastávce *U Družby* v segmentu 12 na napájecím úseku číslo 7, kde sklon trati dosahuje 60 ‰.

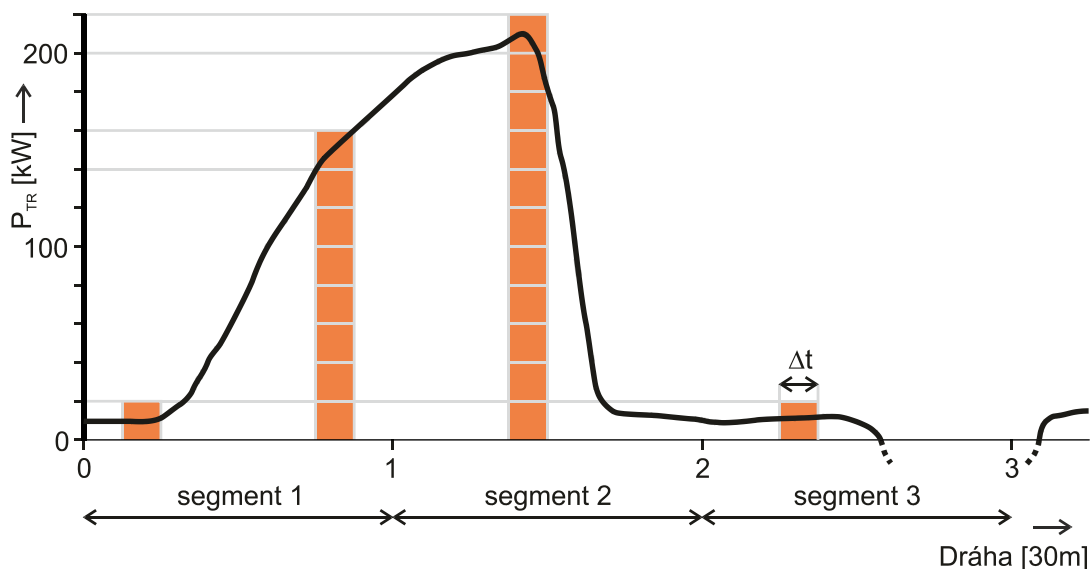


Obr. 27 Četnost výkonu odebíraného i dodávaného do troleje dle polohy na trati

- **Četnost minimálního odebíraného výkonu z troleje**

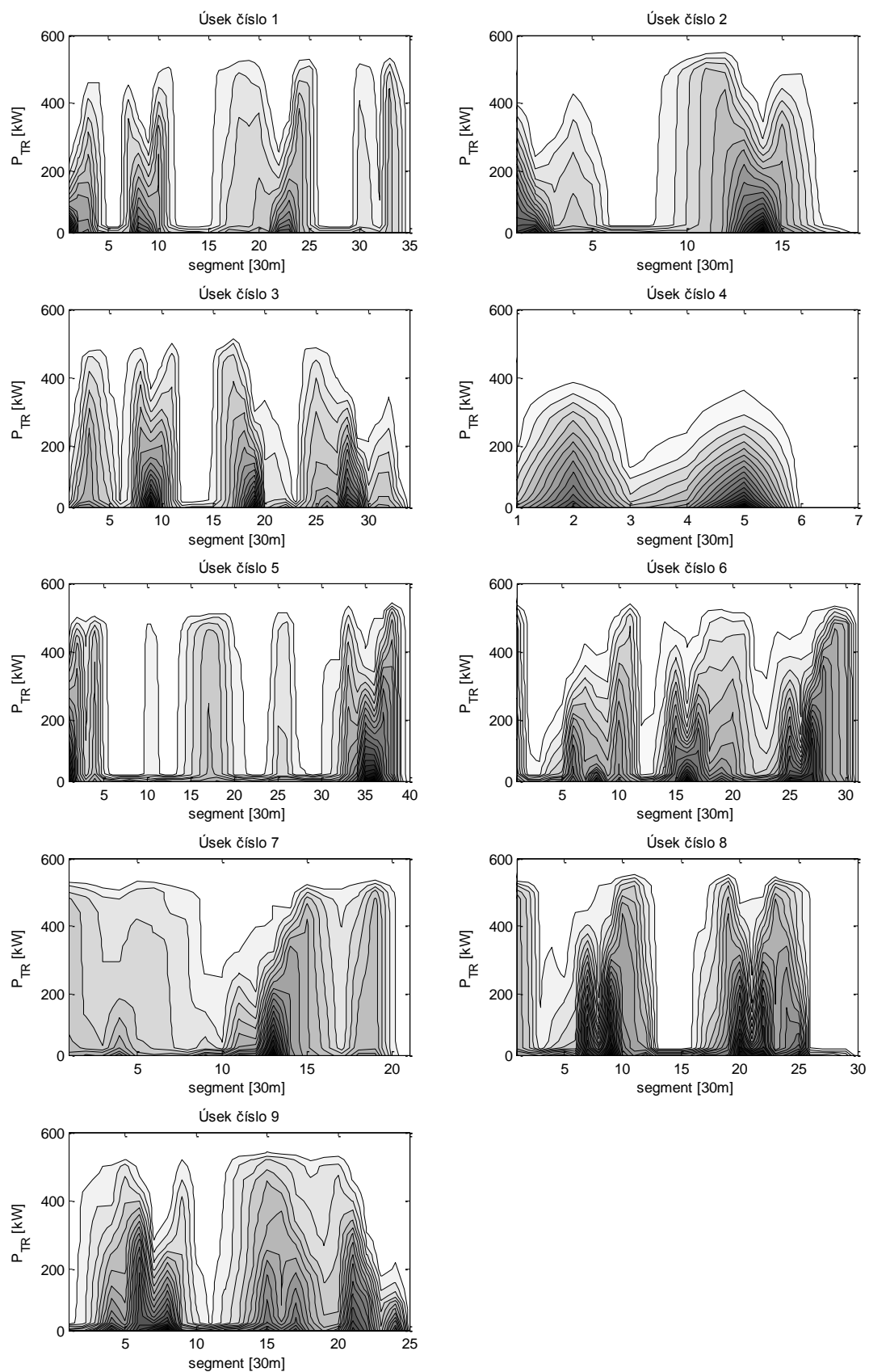
Následující metodika zpracování změřených dat si klade za cíl nalezení takových míst na trati, kde bude pravděpodobně odebrán případný rekuperovaný výkon hlavní simulované tramvaje. Metodika je opět založena na výpočtu četností, tentokrát však pouze odebíraného výkonu v různých místech trati. Dráha trati je opět kvantována po 30 m na jednotlivé segmenty a odebíraný výkon P_{TR} po 20 kW. Protože zjištěná četnost bude sloužit pro lokalizaci odběru simulované rekuperované energie, je vhodné započítat četnosti nejen do dané hladiny výkonu, ale i do všech hladin nižších. Znamená to, že simulovaný rekuperovaný výkon může být odebrán v místě, kde je stejný výkon odebírán druhou tramvají, nebo v místě kde druhá tramvaj odebírá výkon vyšší.

Princip výpočtu četnosti odebíraného výkonu v závislosti na poloze je uveden na Obr. 28. Opět je pro názornost zvolena konstantní rychlost tramvaje. V prvním segmentu je uveden jeden případ pro malý výkon, který je započten do četnosti pro segment 1 a výkon do 20 kW. Druhý příklad v tomto segmentu již ukazuje navýšení četnosti pro výkon 140÷160 kW i všech nižších. V segmentu 2 se jedná o ještě vyšší výkon. Další příklad v segmentu 3 ukazuje vozidlo jedoucí výběhem. Je tedy zvýšena četnost výkonu 0÷20 kW. Záporný výkon není v tomto výpočtu četnosti zahrnut, protože se jedná pouze o lokalizaci odběrů.



Obr. 28 Princip výpočtu četnosti minimálního odebíraného výkonu z troleje dle polohy na trati

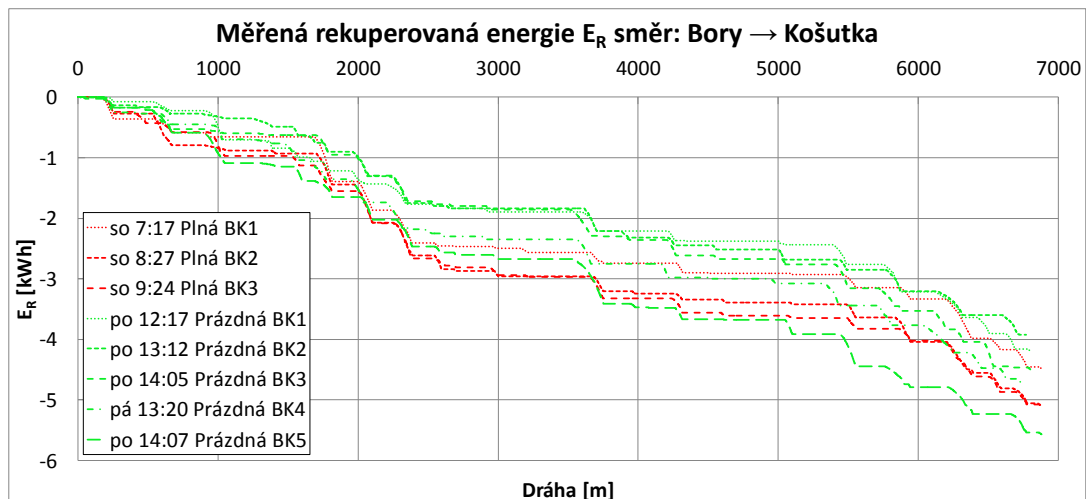
Z uvedeného popisu výpočtu četnosti vyplývá, že nejčastěji bude odebírán nejnižší výkon, tedy $0 \div 20$ kW. Toto odpovídá skutečnosti, že pro malý rekuperovaný výkon se mnohem častěji najde odběr, než pro větší rekuperovaný výkon. Výsledné četnosti byly opět zpracovány do devíti grafů dle napájecích úseků. Tyto grafy jsou uvedeny na Obr. 29. Pro větší názornost jsou do grafů vynesena lineárně interpolovaná data. V grafech je patrna zmiňovaná velká četnost malých odebíraných výkonů prakticky ve všech místech trati. Dále lze lokalizovat jednotlivé zastávky díky zvýšeným odběrům v těchto místech. Například v prvním napájecím úseku je patrna zastávka *Dvořákova* ve vzdálenosti 319 m, tedy segment 11. Nebo další zastávka *náměstí Míru* v tom samém napájecím úseku ve vzdálenosti 685 m, tedy segment 23.



**Obr. 29 Četnost minimálního odebíraného výkonu
v závislosti na poloze na trati**

- **Četnost rekuperace**

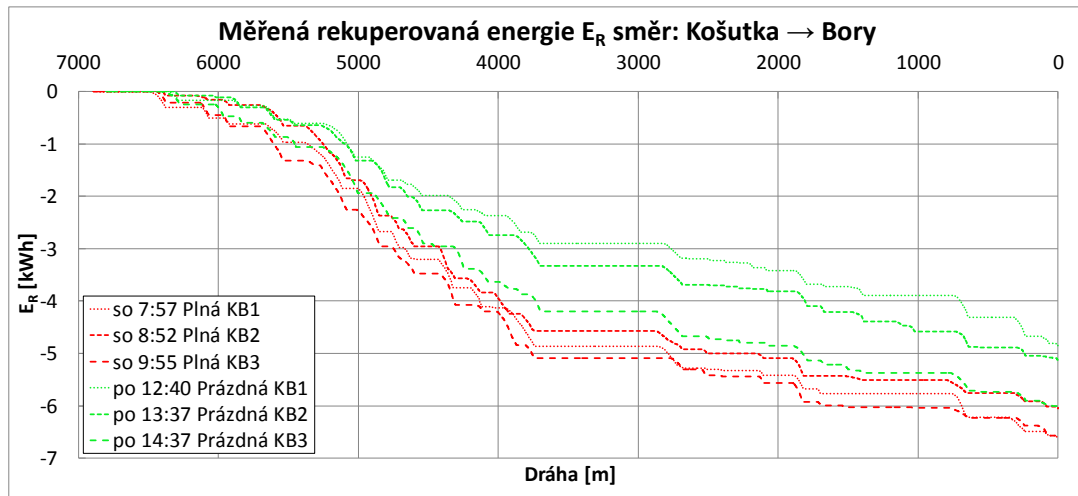
Dále byla ze změřených hodnot určena průměrná rekuperovaná energie $E_R = 10,9$ kWh. Hodnoty měřené rekuperované energie E_R pro všechna měření a všechna měřená zatížení se pohybovaly v rozmezí 8,6 kWh až 13,36 kWh. Při výpočtu průměru rekuperované energie E_R pouze pro jednotlivá zatížení (0, 5, 8 a 10 os/m²) dostaneme čtyři průměrné hodnoty, jejichž rozmezí vychází pouze od 9,72 kWh (0 os/m²) až 11,81 kWh (5 os/m²). Tímto bylo zjištěno, že na velikost rekuperované energie má zatížení tramvaje menší vliv, než bylo očekáváno. Může to však být zapříčiněno nedostatečným množstvím změřených dat. I přesto je pozorována zřejmá nahodilost možnosti rekuperace. Pro lepší představu o průběhu rekuperované energie byla změřená data zpracována do grafu. Graf na Obr. 30 ukazuje závislost rekuperované energie E_R na pozici na trati ve směru Bory → Košutka. Graf na Obr. 31 pak ve směru opačném Košutka → Bory. Zpracována byla všechna data z jízdy prázdné tramvaje (0 os/m²) a všechna data z jízdy plné tramvaje (8 os/m²). V legendě grafu je uveden i čas měření pro možnost vyhodnocení závislosti na dni v týdnu, popřípadě rozdíl mezi dopravní špičkou a mimo špičku. Bohužel malé množství dat neumožňuje kvalitní statistické vyhodnocení.



Obr. 30 Rekuperovaná energie směr Bory → Košutka

V následujícím grafu na Obr. 31 je patrná velká část rekuperované energie právě v oblasti s dlouhým klesáním o velkém sklonu. Jedná se o lochtínské stoupání ve vzdálenosti cca 4000÷5000 m od konečné

na Borech. V tomto směru je již více patrný rozdíl mezi prázdnou a plnou tramvají.



Obr. 31 Rekuperovaná energie směr Košutka → Bory

Protože množství rekuperované energie závisí na aktuálních poměrech v troleji, je zapotřebí vyhodnotit změřená data tak, aby bylo možné velikost rekuperované energie v simulaci věrohodně rekonstruovat. Metodika zpracování změřených dat je založena na výpočtu četnosti možných poměrů v troleji při brzdění. Sledovanými veličinami byl právě rekuperovaný výkon P_R a výkon brzdového odporíku P_{ODP} . Respektive brzdový výkon P_{BR} , který je součtem P_R a P_{ODP} . Výkon troleje P_{TR} je tedy při rekuperaci roven rekuperovanému výkonu P_R .

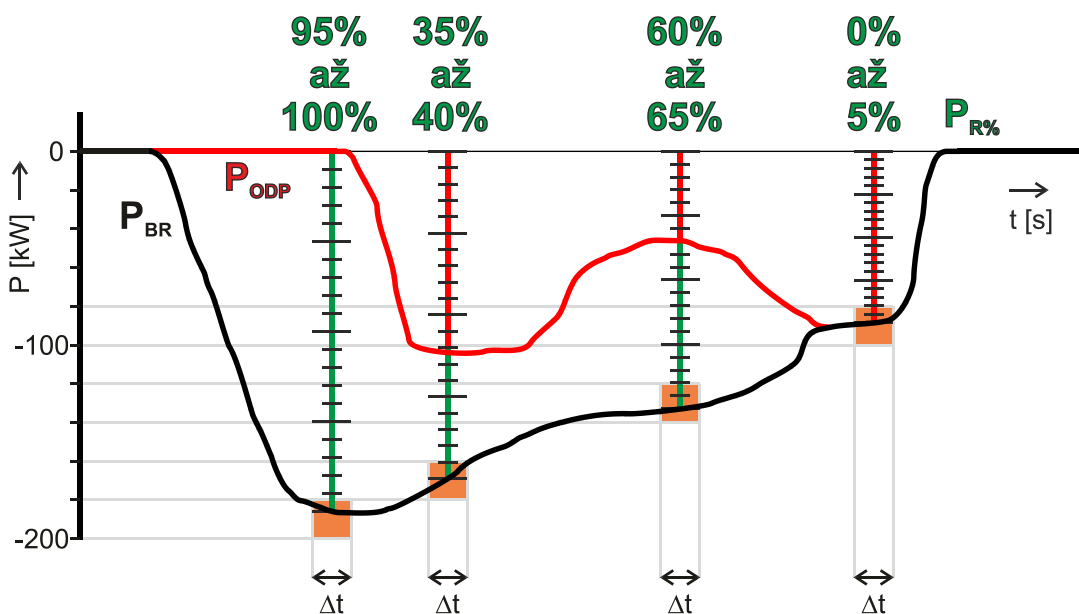
$$P_{BR} = P_R + P_{ODP} \quad [\text{kW}] \quad (5)$$

Tento brzdový výkon byl kvantován po $\Delta P_{BR} = 20 \text{ kW}$. Po zařazení změřené hodnoty do dané hladiny brzdového výkonu P_{BR} byl vypočten poměrný rekuperovaný výkon $P_{R\%}$ dle následujícího vztahu:

$$P_{R\%} = \frac{P_R}{P_{BR}} \cdot 100 \quad [\%, \text{kW}, \text{kW}] \quad (6)$$

Tento poměrný výkon byl kvantován po $\Delta P_{R\%} = 5 \%$. Po zařazení i hodnoty $P_{R\%}$ do příslušné procentní hladiny byla sečtena četnost ze všech třiceti měření. Četnosti byly opět vypočteny pro každý napájecí úsek zvlášť. Výsledkem tohoto postupu je pak trojrozměrná matice četností $n_{i,j,k}$, kde i je škála brzdového výkonu P_{BR} , j je škála poměrné rekuperace $P_{R\%}$ a k je číslo úseku.

Na Obr. 32 je uveden příklad kvantování, kde je patrné rozdělení P_{BR} a $P_{R\%}$ do hladin. Jedná se o příklad průběhu výkonů při brzdění tramvaje. V prvním příkladu zleva je P_{BR} zařazen do hladiny $-(180\div 200)$ kW, a protože je výkon brzdového odporníku nulový, je plný výkon rekuperován do troleje. Četnost pro hladinu $P_{BR} = -(180\div 200)$ kW a hladinu $P_{R\%} = 95\div 100\%$ je tedy zvýšena o 1. Podobně je tomu tak v dalších dvou příkladech, pouze s rozdílem, že brzdový výkon P_{BR} je již částečně mařen v odporníku. Četnosti se zvýší tedy u hladin $P_{BR} = -(160\div 180)$ kW, $P_{R\%} = 35\div 40\%$ a u $P_{BR} = -(120\div 140)$ kW, $P_{R\%} = 60\div 65\%$. Poslední příklad ukazuje podmínky troleje neumožňující rekuperaci. Proto je veškerý brzdový výkon mařen v odporníku ($P_{R\%} = 0\%$). V tomto případě je zvýšena četnost pro hladinu $P_{BR} = -(80\div 100)$ kW a hladinu $P_{R\%} = 0\div 5\%$.

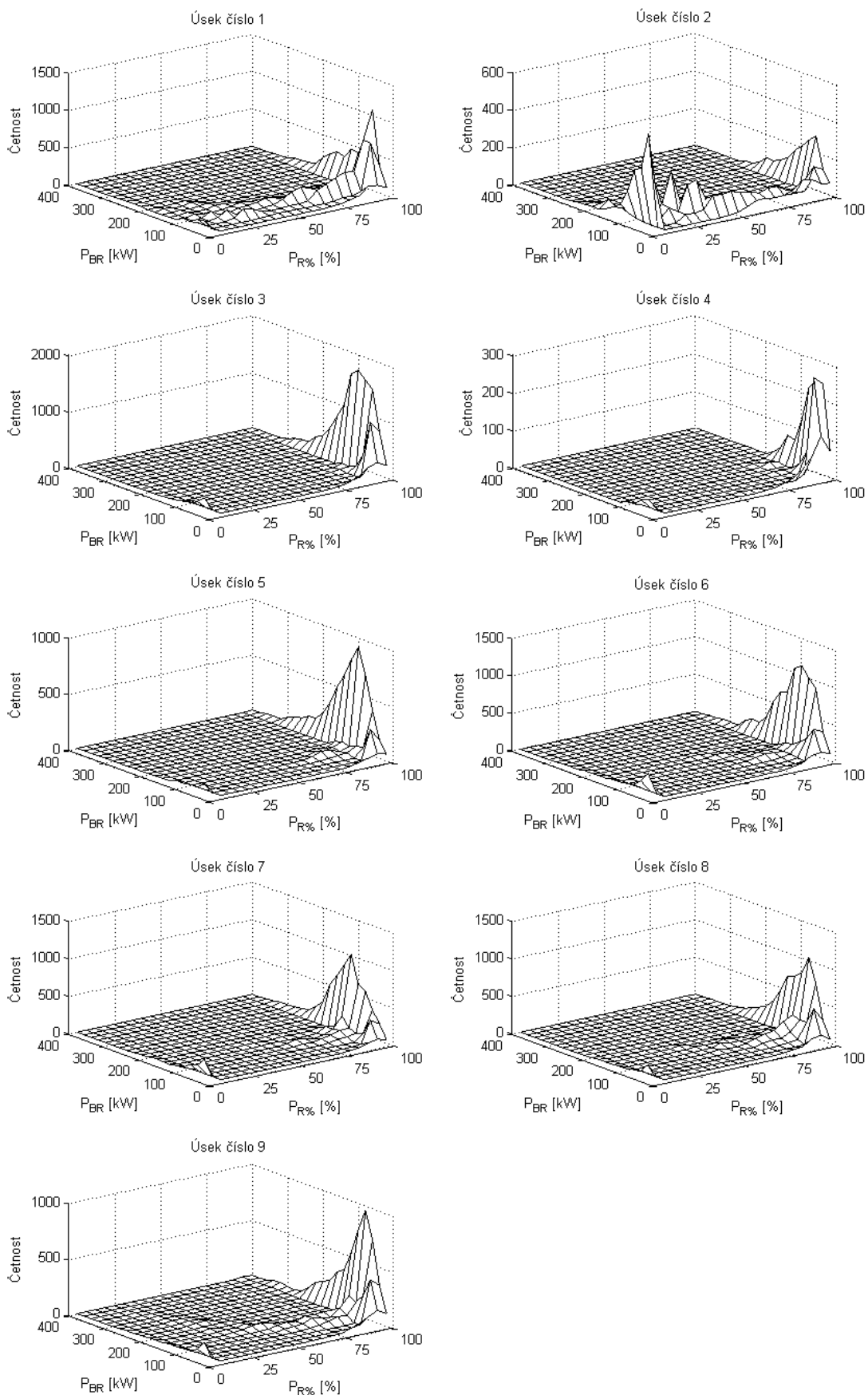


Obr. 32 Princip výpočtu četnosti rekuperace z měřených dat

Na Obr. 33 je zobrazena výsledná matice četností, která byla zpracována do devíti prostorových grafů opět dle napájecích úseků. Z grafu pro druhý úsek je patrné poměrně časté brzdění do brzdového odporníku, což může být způsobeno poměrně malou délkou úseku. Na kratším úseku je méně pravděpodobné, že se v úseku budou vyskytovat dvě tramvaje současně. Dalším zřejmým výsledkem je poměrně velká četnost plné rekuperace v úsecích lochotínského stoupání (úseky 5, 6 a 7). V tomto

místě trati se častěji jedná i o rekuperaci vyšších výkonů než v jiných místech trati.

Bohužel nízký počet měření nezaručuje vysokou důvěryhodnost výsledků. I přesto je lze použít pro odhad poměrů v troleji. Po zadání případných dalších měření lze podle navržené metodiky výsledky dále zpřesňovat.

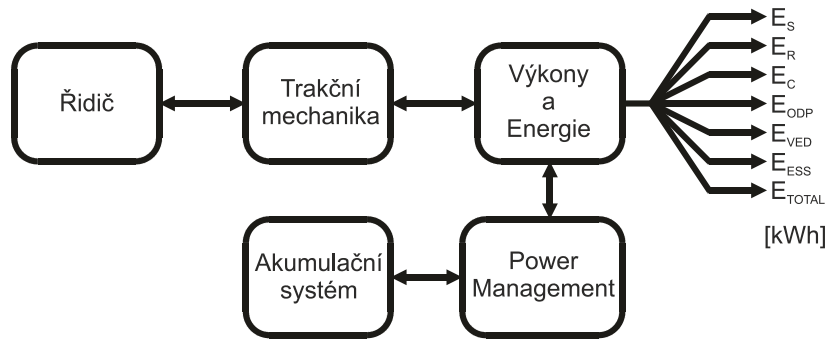


Obr. 33 Četnost rekuperace z měřených dat na lince č. 4

5 Simulační model tramvaje

Úkolem simulačního modelu tramvaje LTM 10.08 na lince č. 4 v Plzni je zjištění energetických poměrů při provozu a ověření možnosti úspor při použití akumulčního systému. Dále tento model poslouží pro snazší dimenzování velikosti superkondenzátorů a k vývoji sofistikovaných metod řízení akumulčního systému. Pro vývoj simulačního modelu byl využit nástroj Matlab/Simulink. Navržený model si neklade za cíl zjištění kompletní energetické bilance a nejedná se tedy o plnohodnotné simulování všech tramvajů na lince. Vzhledem ke snížení výpočetní náročnosti bylo přistoupeno na variantu, která vychází z analýzy změřených dat a vypočtených pravděpodobností. Jedná se proto o stochastický model. Simulace jsou zaměřeny na sledování energetických bilancí z pohledu jedné tramvaje. Interakce s ostatními tramvajemi v napájecích úsecích je řešena pomocí jediné tramvaje, která statisticky zahrnuje i případné další tramvaje. Nejedná se tedy o plnohodnotnou simulaci druhé tramvaje, ale o její statistické zastoupení. Toto zjednodušení lze připustit, protože dle Tab. 8 vychází, že nejčastěji se v jednom napájecím úseku budou nacházet nejvýše 2 tramvaje (při vybraném počtu 13 tramvajů na linku).

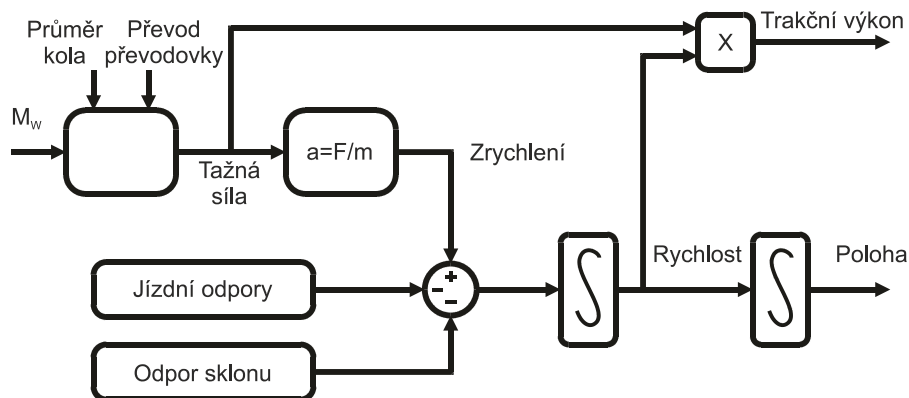
Model tramvaje se skládá z bloků: *Řidič*, *Trakční mechanika*, *Výkony a energie*, *Power Management* (distribuce energií) a *Akumulční systém*. Principiální blokové schéma modelu je uvedeno na Obr. 34. Hlavním výstupem jsou následující energie: E_S – spotřebovaná, E_R – rekuperovaná do troleje, E_C – celková (rozdíl E_S a E_R), E_{ODP} – energie mařená v odporu, E_{VED} – ztráty ve vedení, E_{ESS} – ztráty v akumulčním systému, E_{TOTAL} – celkový ukazatel účinnosti tramvaje.



Obr. 34 Blokové schéma simulačního modelu tramvaje

5.1 Blok Trakční mechanika

Nejdůležitějším blokem z hlediska simulace ztrát je bezpochyby blok *Trakční mechanika*, kde jsou počítány mechanické ztráty vycházející z pohybové rovnice (7) podrobněji popsané v [44]. Náhled do bloku trakční mechaniky ukazuje Obr. 35.



Obr. 35 Zjednodušené blokové schéma bloku *Trakční mechanika*

$$\frac{F_t}{m \cdot \xi} \mp p_a - (p_o + p_r \pm p_s) \cdot 9,80665 = 0 \quad \left[\text{N}, \text{t}, \frac{\text{N}}{\text{t}}, \frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (7)$$

F_t	...	tažná síla [N]
m	...	hmotnost vozidla [t]
ξ	...	součinitel rotujících hmot [-] (pro tramvaj 1,2)
p_a	...	měrná zrychlující síla [N/t]
p_o	...	měrný jízdní odpor [N/kN]
p_r	...	přídavný odpor oblouku [N/kN]
p_s	...	měrný odpor sklonu [N/kN]

Tažná síla je vypočtena dle rovnice (8) z momentu trakčního motoru, při známém převodu převodovky a poloměru kola. Protože měření spotřeb tramvaje bylo provedeno na novém voze, byl pro simulace zvolen poloměr nového kola, tedy 305 mm.

$$F_t = \frac{M \cdot p}{r_k} \quad [\text{N}, \text{Nm}, -, \text{m}] \quad (8)$$

M	...	moment trakčního motoru [Nm], průběh momentu vychází z trakční charakteristiky tramvaje
p	...	převod převodovky 6,8406
r_k	...	poloměr kola 0,305 m (nové kolo)

Následující rovnice (9) určuje měrný jízdní odpor tramvaje [45]. Skládá se ze smykového tření v ložiskách, které je závislé na hmotnosti, valivého tření závislého na rychlosti a tření o vzduch závislého na druhé mocnině rychlosti, čelní plochy a hmotnosti.

$$p_o = 3,65 + \frac{14,4}{M_1} + 0,045 \cdot V + \frac{44 \cdot S}{M_1 \cdot n} V^2 \cdot 10^{-4} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}}, \text{t}, \frac{\text{km}}{\text{h}}, \text{m}^2, - \right] \quad (9)$$

M_1	...	hmotnost na nápravu [t]
V	...	rychlost vozidla [km/h]
S	...	čelní plocha vozidla [m ²]
n	...	počet náprav

Pro výpočet přídatného odporu oblouku byl použit vztah (10), který je určen pro městské dráhy [43]. Simulovaná linka č. 4 má poměrně málo znatelných oblouků a proto jejich méně přesný popis významně neovlivní výsledky simulací. Výpis oblouků včetně odhadnutého poloměru z mapových podkladů je v následující tabulce Tab. 14.

Tab. 14 Výpis významných oblouků na lince č. 4 v Plzni

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

$$p_r = 350 \frac{e}{R_o} \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}}, \text{m}, \text{m} \right] \quad (10)$$

e ... rozchod kolejnic 1,435 m

R_o ... poloměr oblouku [m]

Měrný odpor sklonu p_s je odvozen od výškového profilu linky, který byl po filtraci pomocí klouzavého průměru derivován dle vzdálenosti. Největší sklon 63 ‰ byl naměřen mezi zastávkami *Ul. B. Němcové* a *U Družby*. Změřený výškový profil a sklon trati byly zobrazeny v Obr. 23 a Obr. 24.

Výpočet rychlosti tramvaje a ujeté dráhy vychází z rovnice (7) a to vyjádřením měrné zrychlující síly p_a . Integrací měrné zrychlující síly dostaneme rychlost a druhou integrací poté ujetou vzdálenost, jak ukazují rovnice (11) a (12). Měrnou zrychlující sílu p_a je nutno převést z N/t na N/kg.

$$v = \int \frac{p_a}{1000} dt \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}, \frac{\text{N}}{\text{t}} \right] \quad (11)$$

$$l = \int v \cdot dt \quad \left[\text{m}, \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (12)$$

p_a ... měrná zrychlující síla [N/t]

v ... rychlost tramvaje [m/s]

l ... ujetá vzdálenost [m]

Pro výpočet tažné síly dle rovnice (8) je zapotřebí znát aktuální hodnotu momentu trakčního motoru M . Tato hodnota je vypočtena v bloku *Motor*, kde je maximální moment zadán dle trakční charakteristiky tramvaje. Vstupem tohoto bloku je tedy moment požadovaný M_w a úhlová rychlost

ω_{el} . Výstupní moment M je tedy omezen dle maximálního momentu (jak pro pohon, tak pro brzdu). Výpočet úhlové rychlosti ω_{el} je odvozen z otáček nápravy $n_{náprava}$ dle rovnice (13) a (14) vycházejících z rychlosti tramvaje.

$$n_{náprava} = \frac{1000 \cdot V}{2\pi \cdot 60 \cdot r_k} \left[\frac{\text{ot}}{\text{min}}, \frac{\text{km}}{\text{h}}, \text{m} \right] \quad (13)$$

$$\omega_{el} = n_{náprava} \cdot p \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot p_p \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}, \frac{\text{ot}}{\text{min}}, -, - \right] \quad (14)$$

$n_{náprava}$...	otáčky nápravy [ot/min]
V ...	rychlost tramvaje [km/h]
r_k ...	poloměr kola 0,305 m
ω_{el} ...	úhlová rychlost elektrická [rad/s]
p ...	převod převodovky 6,8406
p_p ...	počet pólpárů = 2

Potřebný trakční výkon P_{TRA} je poté vypočten dle vztahu (15).

$$P_{TRA} = \frac{\omega_{el}}{p_p} \cdot M \left[\text{W}, \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \text{Nm}, - \right] \quad (15)$$

5.2 Blok Řidič

Dalším blokem v simulačním modelu je výpočet požadovaného momentu pro blok *Trakční mechanika*. Úkolem tohoto bloku je simulace chování řidiče tramvaje. Tento blok musí zajistit rozjezd tramvaje, dodržování maximální rychlosti, využívání výběhu, přesné zastavení v zastávkách ($\pm 1\text{m}$), čekání v zastávkách. Doba čekání byla nastavena na 20 s stejně jako v zadání pro měření spotřeb tramvaje v reálném provozu [39]. Takto budou výsledky simulace srovnatelné s naměřenými hodnotami.

Model chování řidiče vychází ze stejných veličin, jako vyhodnocuje skutečný řidič, pouze s tím rozdílem, že skutečný řidič některé veličiny vnímá pouze pocitově a tedy nezná jejich přesnou velikost. Nicméně jeho zkušenosti mu umožní správně reagovat například při různých sklonech trati nebo při různé hmotnosti. Některé veličiny, jako je například rychlost,

zná řidič i konkrétně, ale zrychlení opět odhaduje z pocitových vjemů. Řidič tedy na základě svých vlastních zkušeností ovlivňuje vozidlo tak, aby se jeho výsledný stav blížil ke stavu požadovanému. Právě proto, že řidič vychází ze zkušeností, je velmi obtížné jeho chování simulovat. Simulační model tedy používá přesné hodnoty, ze kterých lze zásahy řidiče vypočítat. Veličiny, které simulovaný řidič používá, jsou tedy stejné, jako ty, ze kterých vychází skutečný řidič. Jsou jimi: poloha na trati, požadovaná poloha, rychlost, hmotnost, odpory (zejména sklon) a zrychlení.

Použitím vypočtených brzdých charakteristik lze dosáhnout například časově optimálního brzdění. Avšak v tomto případě je zapotřebí napodobit chování skutečného řidiče, aby bylo možné porovnání simulace s naměřenými spotřebami tramvaje. Proto musí simulovaný řidič umět využívat i výběh, což je obtížnější vzhledem k často proměnnému velkému sklonu.

Základ simulace řidiče popisují rovnice (16) a (17), ze kterých je v průběhu jízdy vypočítávána brzdná dráha při poloviční brzdě síle a při známých jízdních odporech. Do rovnice je dosazen úmyslně prostý průměr odporů v aktuální poloze a v cílové poloze. Simulovaný řidič tedy zná pouze odhadovanou aktuální zábrzdnou vzdálenost a tím i odhadovaný okamžik, kdy musí začít brzdit. Takto je simulovaný řidič blíže řidiči skutečnému, který okamžik zahájení brzdění také odhadne dle aktuálních parametrů vozidla a trati. V případě, že jsou splněny podmínky pro jízdu ve výběhu, je výběh započat v určité vzdálenosti před zábrzdnou vzdáleností. Vzdálenost pro přechod do režimu výběh je odvozena od jízdních odporů, z nichž nejdůležitější je sklon trati.

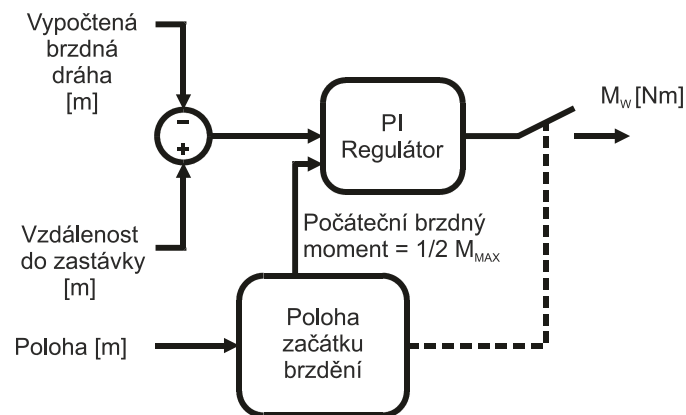
$$s_{br} = \frac{v^2}{2 \cdot a} \quad \left[\text{m}, \frac{\text{m}}{\text{s}}, \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (16)$$

$$a = \frac{F_{tb}}{m} + p_x \cdot 9,80665 \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \text{N}, \text{t}, \frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (17)$$

s_{br}	...	zábrzdná vzdálenost [m]
v	...	rychlost vozidla [m/s]
a	...	zpomalení [m/s ²]

F_{tb}	...	poloviční brzdná síla [N] - konstanta
m	...	hmotnost vozidla [t]
ρ_x	...	průměr odporů v aktuální poloze a cílové poloze [N/kN]

V okamžiku, kdy přejde řidič z režimu výběh do režimu brzda, je požadován poloviční brzdňý moment M_W . Protože tento okamžik byl úmyslně pouze odhadnut, začne se uplatňovat regulátor, který má napodobit korekci brzdňého účinku skutečného řidiče. Skutečný řidič také začne brzdít v odhadnuté vzdálenosti od cíle, a jak se k cíli přibližuje, tak brzdňý účinek koriguje, tedy přibrzdňuje nebo naopak odbrzdňuje. Regulační odchylkou regulátoru je rozdíl mezi odhadem zábrzdňé vzdálenosti a vzdáleností do cíle. V případě, že zábrzdňá vzdálenost je kratší než vzdálenost do cíle, regulátor odbrzdí a naopak. Takto nastavený simulovaný řidič je schopen zastavit na zastávce s přesností menší než ± 1 m i při velkých změnách sklonu v průběhu brzdění. V simulaci je možné zvolit i zastavení na vybraných křižovatkách. Blokově je tento princip zachycen na Obr. 36.



Obr. 36 Princip brzdění do zastávky napodobující skutečného řidiče

Po uplynutí nastavené čekací doby (20 s) zadá simulovaný řidič pokyn k jízdě. V případě, že tramvaj dosáhne maximální nastavené rychlosti (50 km/h), zareaguje rychlostní regulátor, který omezí požadovaný moment trakčňého motoru M_W . Jede-li tramvaj na úseku se záporným sklonem, který by byl schopen překonat všechny odpory, regulátor rychlosti nastaví M_W do záporných hodnot, tramvaj tedy brzdí tak, že udržuje maximální povolenou rychlost.

Nastavení chování řidiče bude mít bezpochyby velký vliv na celkovou spotřebu tramvaje. Jednou z možností ušetření elektrické energie je tedy správná technika jízdy. Zkoumání vhodné techniky jízdy však není předmětem této práce. Zmiňovaný způsob simulace řidiče byl zvolen z důvodu nastavení chování řidiče podobně, jako tomu bylo při měření v reálném provozu. Jedině tak mohou být výsledky porovnatelné.

5.3 Blok Výkony a energie

V tomto bloku je vstupující trakční výkon, který byl vypočten v bloku *Trakční mechanika*, rozdělen do jednotlivých složek. Integrací jednotlivých složek výkonu dostáváme konkrétní energie. Tyto energie jsou hlavním ukazatelem celé simulace a slouží k porovnávání navržených metod úspory elektrické energie. Vypočtené energie jsou:

- E_S energie spotřebovaná z troleje, bez uvažování rekuperace
- E_R energie rekuperovaná do troleje
- E_C energie celková $E_S - E_R$
- E_{ODP} energie mařená v brzdovém odporu
- E_{VED} ztrátová energie ve vedení (trolej, koleje a kabely)

5.3.1 Spotřebovaná energie E_S

Spotřebovaná energie vozidlem z troleje E_S je spočtena integrací výkonu střídače po přičtení spotřeby pomocných pohonů dle (19). Protože se jedná pouze o energii spotřebovanou, integruje se pouze výkon střídače v motorickém režimu. Výkon střídače je vypočten z trakčního výkonu P_{TRA} , jmenovité účinnosti tramvaje η a koeficientu respektujícího účinnost tramvaje při rozjezdu a brzdění ε , dle vztahu (18). Koeficient ε vychází ze vzorce pro výpočet rozjezdových / brzdových ztrát tramvaje uváděného v [44]. Hodnota koeficientu ε je závislá na druhu regulace trakčního motoru (koeficienty pro různé způsoby jsou uvedeny v [44]) a na místě provozu

(v centru 1,3 / na předměstí 1,7 dle [46] nebo dle [47], kde se jedná o údaje dopravních podniků města Prahy).

$$P_S = \frac{P_{TRA} \cdot \varepsilon}{\eta} + P_{PP} - P_{ESS} \quad [W, -] \quad (18)$$

$$E_S = \int P_S dt \quad [Ws, W] \quad (19)$$

P_S	...	spotřebovávaný výkon z troleje [W]
E_S	...	energie spotřebovaná z troleje, bez uvažování rekuperace [Ws]
P_{TRA}	...	trakční výkon [W]
ε	...	koeficient respektující účinnost tramvaje při rozjezdu a brzdění (1,3)
η	...	jmenovitá účinnost tramvaje (0,8)
P_{PP}	...	střední příkon pomocných pohonů (4 kW)
P_{ESS}	...	výkon akumulčního systému [W]

Protože koeficient ε respektuje účinnost tramvaje pouze při rozjezdu a brzdění, je hodnota 1,3 použita právě při rozjezdu ze stání nebo při plném brzdění. Při ostatních režimech je tento koeficient $\varepsilon = 1$. Jmenovitá účinnost η zahrnuje jmenovité účinnosti převodovky, trakčního motoru a trakčního střídače. Uvažovaná účinnost dvoustupňové čelní převodovky je 98 %, trakčního asynchronního motoru 85 % a trakčního napěťového IGBT střídače 97 %. Střední příkon pomocných pohonů P_{PP} byl vyhodnocen z měřených dat [39]. Velikost výkonu akumulčního systému P_{ESS} závisí na bloku *Power Management*, pokud je akumulční systém využit. Na velikost výkonu P_{ESS} má dále vliv napětí U_{SC} , teplota SC a z toho plynoucí I_{SCMAX} .

5.3.2 Rekuperovaná energie E_R

Energie rekuperovaná do troleje E_R spolu s energií mařenou v brzdovém odporu E_{ODP} vycházejí opět z výkonu trakčního střídače, tentokrát v generátorickém režimu. To znamená, že P_{TRA} nabývá záporných hodnot, a proto se účinnost η i koeficient ε vyskytuje v obrácené hodnotě. Celkový generovaný brzdový výkon se dělí na výkon rekuperovaný

do troleje P_R a na výkon mařený v brzdovém odporu P_{ODP} . Výpočet celkového brzděného výkonu je dle vztahu (20). Integrací složek brzděného výkonu dostáváme energii rekuperovanou (21) a energii zmařenou v brzdovém odporu (22).

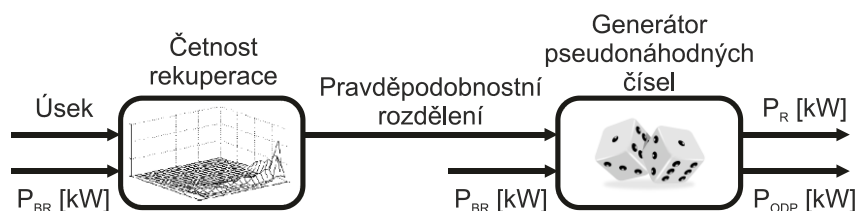
$$P_R + P_{ODP} = \frac{P_{TRA} \cdot \eta}{\varepsilon} + P_{PP} - P_{ESS} \quad [W, -] \quad (20)$$

$$E_R = \int P_R dt \quad [Ws, W] \quad (21)$$

$$E_{ODP} = \int P_{ODP} dt \quad [Ws, W] \quad (22)$$

P_R	...	rekuperovaný výkon do troleje [W]
P_{ODP}	...	výkon mařený v brzdovém odporu [W]
P_{TRA}	...	trakční výkon [W]
ε	...	koeficient respektující účinnost tramvaje rozjezdu a brzdění (1,3)
η	...	jmenovitá účinnost tramvaje (0,8)
P_{PP}	...	střední příkon pomocných pohonů (4 kW)
P_{ESS}	...	výkon akumulčního systému [W]
E_R	...	energie rekuperovaná do troleje [Ws]
E_{ODP}	...	energie mařená v brzdovém odporu [Ws]

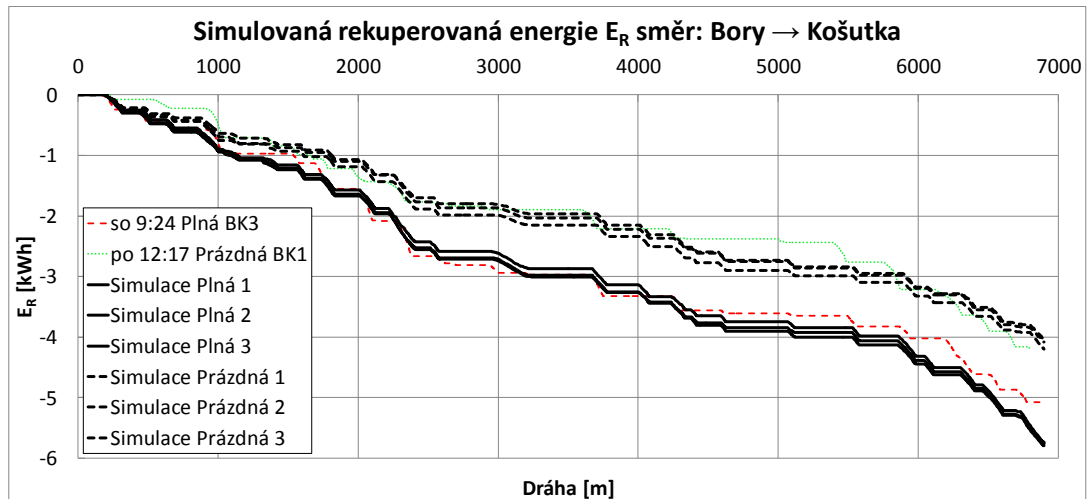
Pro správné rozdělení brzděného výkonu pro rekuperaci a brzdový odporník bylo opět využito závěrů z měření v reálném provozu. Protože je rekuperace energie do troleje víceméně otázkou náhody, je i v simulaci tato náhoda zavedena prostřednictvím generátoru pseudonáhodných čísel. Tento generátor generuje náhodná čísla dle zadaného rozdělení. Zadávané rozdělení odpovídá hustotě pravděpodobnosti, která byla získána ze změřených dat výpočtem četnosti v kapitole 4.3. Na základě hodnoty brzděného výkonu P_{BR} a čísla úseku, ve kterém se tramvaj nachází, je zjištěno pravděpodobnostní rozdělení a dle tohoto rozdělení je pak náhodně vygenerován podíl rekuperované energie. Tímto je zajištěno, že se simulované hodnoty rekuperované energie budou blížit změřeným hodnotám. Zmiňovaný princip je graficky znázorněn na Obr. 37.



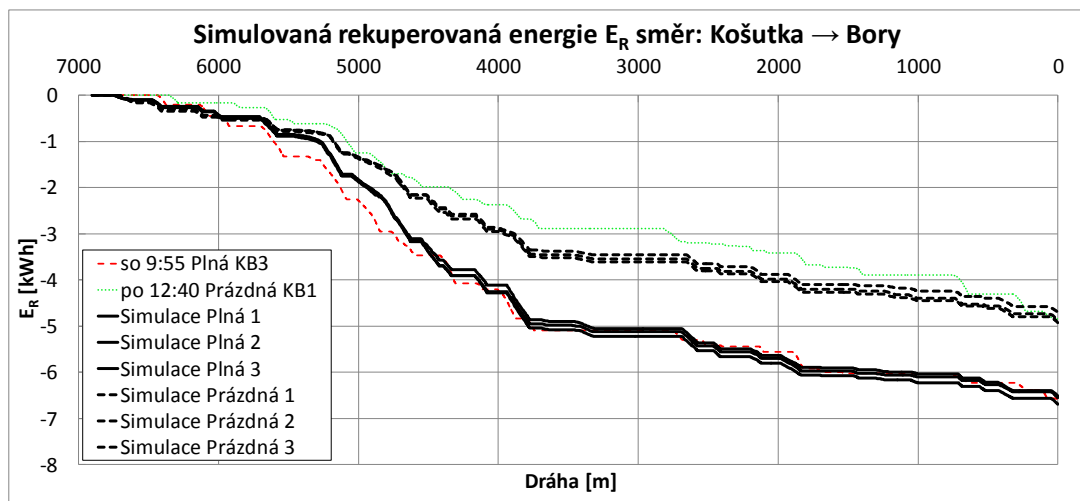
Obr. 37 Princip rozdělení brzdného výkonu

Výhodou použitého generátoru pseudonáhodných čísel je, že umožňuje vygenerování různých číselných sad, a to s opakovatelným výsledkem. Příklady simulace rekuperované energie jsou uvedeny v následujících grafech. Simulace byla vypočtena třikrát a pokaždé s jinou sadou generovaných čísel, které zajistí různé rozdělení brzdného výkonu na rekuperaci a brzdový odporník. Pro porovnání simulovaných průběhů se změřenými jsou v grafech ponechány i některé vybrané průběhy rekuperované energie z měření. Ostatní průběhy z reálného měření již byly zobrazeny na Obr. 30 a Obr. 31. Grafy simulovaných průběhů jsou opět rozděleny dle směru: Bory → Košutka Obr. 38 a Košutka → Bory Obr. 39. Měření a simulace jsou v grafech uvedeny pro dvě hmotnosti: Prázdná (0 os/m^2) a Plná (8 os/m^2).

Při pohledu na jednotlivé průběhy simulované rekuperované energie lze pozorovat mnohem větší podobnost, než je tomu v případě měření. Je to způsobeno tím, že v reálném provozu nelze zajistit naprosto shodné podmínky, jako jsou například: dopravní situace, přítomnost jiné tramvaje v úseku, počasí popřípadě obsazenost. Podobnost výsledků simulace tedy ukazuje na její výhodu. Díky stejným podmínkám v simulaci lze eliminovat některé vlivy, které se dají jen velmi obtížně předvídat.



Obr. 38 Simulovaná rekuperovaná energie směr Bory → Košutka



Obr. 39 Simulovaná rekuperovaná energie směr Košutka → Bory

5.3.3 Ztráty ve vedení E_{VED}

Tramvaj vybavená akumulacním systémem může snížit nejen ztráty v troleji způsobené pouze vlastním odběrem, ale v případě přítomnosti druhé tramvaje v úseku může účinně snížit i ztráty způsobené odběrem právě této druhé tramvaje. Je to způsobeno tím, že částí troleje může protékat součet odebíraných proudů obou tramvajů. V této části troleje vznikne ztráta úměrná kvadrátu součtu proudů $R_V \cdot (I_1 + I_2)^2$. V případě, že jedna z tramvajů je tedy vybavena akumulacním systémem, lze předpokládat snížení jejího odběru, což příznivě ovlivní i ztráty způsobené druhou tramvajů. Následující rovnice ukazují názorný příklad.

$$P_{VED_{T1}} = R_V \cdot I_1^2 = 0,08 \cdot 200^2 = 3,2 \text{ kW} \quad [\text{kW}, \Omega, \text{A}] \quad (23)$$

$$P_{VED_{T2}} = R_V \cdot I_2^2 = 0,08 \cdot 300^2 = 7,2 \text{ kW} \quad [\text{kW}, \Omega, \text{A}] \quad (24)$$

$$P_{VED} = R_V \cdot (I_1 + I_2)^2 = 0,08 \cdot 500^2 = 20 \text{ kW} \quad [\text{kW}, \Omega, \text{A}] \quad (25)$$

$$P_{VED} - P_{VED_{T1}} - P_{VED_{T2}} = 20 - 3,2 - 7,2 = 9,6 \text{ kW} \quad [\text{kW}] \quad (26)$$

Rovnice (23) a (24) ukazují příklad výkonové ztráty v části vedení pro každou tramvaj samostatně. Hodnota odporu $R_V = 0,08 \Omega$ odpovídá délce vedení 1 km. V případě, že se budou rozjíždět obě tramvaje současně, budou ztráty na vedení odpovídat rovnici (25). Rovnice (26) pak ukazuje rozdíl ztrát v případě, že tramvaj T_1 je vybavena akumulacním systémem, který byl schopen odebíraný rozjezdový proud plně hradit. Od ztrát způsobenými oběma tramvajemi P_{VED} byly odečteny ztráty tramvaje T_1 bez akumulacního systému (protože nyní je proud ztráty způsobující zcela kompenzován akumulacním systémem) a ztráty způsobené druhou tramvaj T_2 . Výsledný ztrátový výkon byl tedy ušetřen díky snížení součtu proudů použitím akumulacního systému. V simulaci jsou tyto ušetřené ztráty připočteny k celkovým ušetřeným ztrátám za použití akumulacního systému na tramvaji T_1 . V případě, kdy by byl akumulacní systém nasazen i na ostatní tramvaje, vycházely by celkové ztráty ve vedení zřejmě ještě příznivěji.

Pro výpočet ztrát ve vedení je zapotřebí znát počet tramvaj v úseku. Již v kapitole 4.2 byl vybrán nejčastější stav, tedy právě dvě tramvaje v jednom napájecím úseku. Ztrátová energie v troleji, kolejkách a kabelech E_{VED} , je pak vypočtena z velikostí proudů těchto tramvaj (hlavní simulované tramvaje T_1 a vedlejší T_2) a z odporů vedení. Odporů vedení jsou dány vzájemnými vzdálenostmi tramvaj a vzdáleností měřírny. Odpor měřírny R_M je vypočten dle vztahu (27) z jmenovitého proudu, jmenovitého napětí a napětí naprázdno. Tento odpor R_M zahrnuje i odpor přívodních kabelů R_K spojujících měřírnu s trolejí. Měrný odpor přívodních kabelů mezi měřírnu a trolejí vychází $r_K = 0,13 \text{ } [\Omega/\text{km}]$, tato hodnota byla odvozena v [43]. Dále je definován měrný odpor trakčního napájení, který se skládá z odporu kolejnic a troleje. Jednotlivé kolejnice jsou vzájemně průběžně propojovány

spojkami, stejně jako paralelně vedené troleje. Měrný odpor trakčního napájení, který byl také odvozen v [43], tedy vychází $r_{tr} = 0,08$ [Ω/km].

$$R_M = \frac{U_0 - U_n}{I_n} + R_K \quad [\Omega, V, A] \quad (27)$$

R_M	...	náhradní odpor měřírny včetně odporu kabelů [Ω]
R_K	...	odpor přívodních kabelů (měřírna – trolej) [Ω]
U_0	...	napětí měřírny naprázdno [V]
U_n	...	jmenovité napětí měřírny [V]
I_n	...	jmenovitý proud měřírny [A]

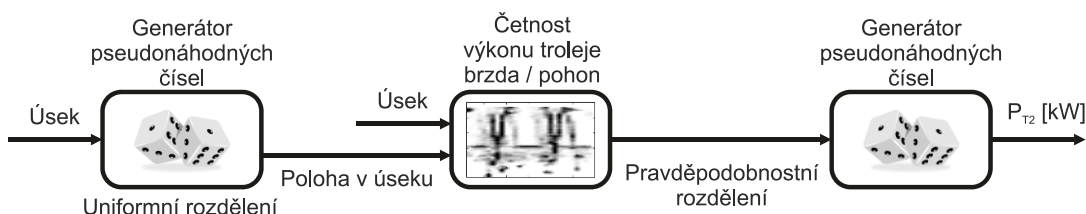
K určení konkrétních hodnot odporů a ztrát se musí nejprve najít jednotlivé polohy tramvají a měřírny a také jejich okamžité výkony. Poloha a výkon tramvaje T_1 jsou přímo výstupem z jejího modelu, poloha měřírny je zadána. Poloha a výkon tramvaje T_2 jsou určeny z hustoty pravděpodobností určených z měření výpočtem četnosti v kapitole 4.3. Postup generování vzdáleností záleží na režimu simulované tramvaje T_1 , je tedy rozdílný pro režim pohon a režim brzda.

- **T_1 v režimu pohon**

V tomto režimu se hledá pozice druhé tramvaje T_2 a hlavně její okamžitý výkon. Velikost a polarita tohoto výkonu určuje, zda bude tato tramvaj T_2 napájet spotřebu hlavní sledované tramvaje T_1 . Pozice druhé tramvaje T_2 v úseku je zvolena náhodně dle uniformního rozdělení. Lze totiž předpokládat, že tramvaje jsou nejčastěji po trati rovnoměrně rozloženy. Počet tramvají na lince a v úseku byl uveden v kapitole 4.2 v tabulce Tab. 7 a Tab. 8. Počet tramvají nacházejících se ve stejném napájecím úseku je definován jeho délkou a celkovým počtem tramvají na lince. Toto tvrzení nebude zřejmě platit v úsecích, kde se kříží více linek, které jsou napájeny ze stejné měřírny. Pro přesnější výpočet ztrát ve vedení je zapotřebí toto zohlednit. V případě společné části trati s jinou linkou by bylo dostačující pouze zvýšení počtu vozidel v úseku. Pro úseky, ve kterých dochází ke křížení, by bylo vhodnější statisticky analyzovat i společnou část druhé

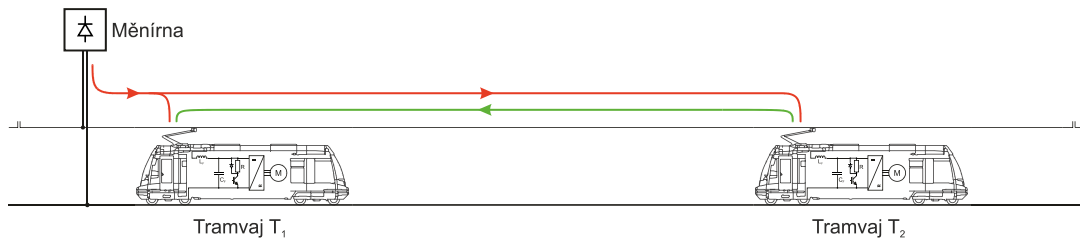
linky. Z hlediska zjednodušení jsou tyto úseky v simulačním modelu zanedbány.

Okamžitý výkon tramvaje T_2 je na základě náhodně zvolené pozice vygenerován dle rozdělení, které vychází z výpočtu četností výkonů v různých segmentech napájecího úseku, jak bylo již uvedeno na Obr. 27. Výkon je tedy určen dle pravděpodobnosti z pozice v úseku a může nabývat kladných nebo záporných hodnot (režim brzda / pohon). Princip získání velikosti výkonu tramvaje T_2 je zobrazen na Obr. 40.



Obr. 40 Princip získání výkonu druhé tramvaje T_2

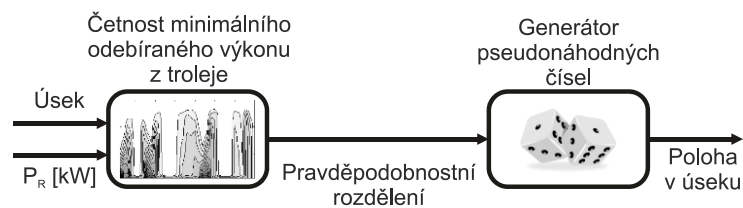
Po získání velikosti výkonu T_2 mohou nastat dva krajní stavy, které jsou zobrazeny na Obr. 41. Zeleně je naznačen stav při záporném (tedy rekuperovaném) výkonu tramvaje T_2 v absolutní hodnotě větším, než je odběr hlavní tramvaje T_1 . Výkon pro rozjezd tramvaje T_1 je tedy plně hrazen rekuperující tramvaj T_2 . Tento stav nastane pouze na začátku rozjezdu, kdy ještě není odběr rozjíždějící se tramvaje T_1 větší, než výkon rekuperující tramvaje T_2 . Při vyšší rychlosti rozjíždějící se tramvaje T_1 již rekuperovaný výkon tramvaje T_2 nebude dostatečný pro její rozjezd, protože rozjezdový výkon je díky ztrátám vyšší než výkon rekuperovaný. V tomto případě bude zbývající část výkonu hrazena z měničny. Druhým krajním stavem je pak červeně naznačený tok energie. Je to pro případ, kdy je hodnota výkonu tramvaje T_2 kladná a tudíž tato tramvaj odebírá také proud z měničny.



Obr. 41 Možnosti směru toku energie při T_1 v režimu pohon

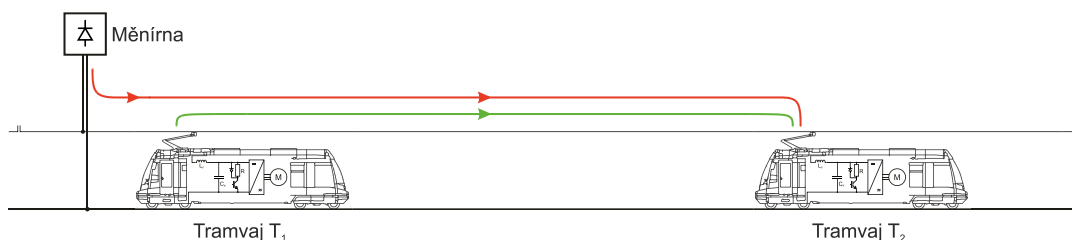
- **T_1 v režimu brzda**

V tomto režimu hlavní simulovaná tramvaj T_1 generuje brzdný výkon, který se dělí na výkon mařený v odporu a výkon rekuperovaný dle pravděpodobnosti uvedené na Obr. 37. Pro konkrétní velikost rekuperovaného výkonu se musí najít takové místo, kde může být tento výkon spotřebováván. K lokalizaci tohoto odběru slouží vypočtená četnost minimálního odebíraného výkonu z troleje. Princip je uveden na Obr. 42. Na základě velikosti rekuperovaného výkonu a napájecím úseku je zjištěna hustota pravděpodobnosti, ze které generátor pseudonáhodně vybere pravděpodobnou polohu odběru.



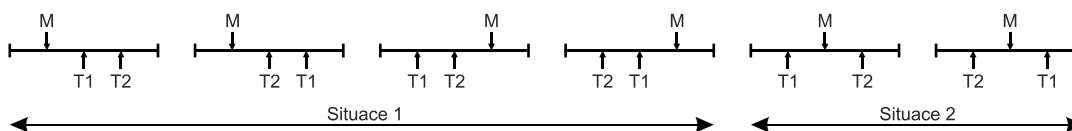
Obr. 42 Princip lokalizace odběru rekuperované energie

Při režimu brzda tramvaje T_1 mohou nastat dva případy, které jsou naznačeny na Obr. 43. Zeleně je zvýrazněn stav, kdy je odebíraný výkon T_2 nižší, než brzdný výkon T_1 . V tomto případě je rekuperovaný výkon T_1 roven odebíranému výkonu T_2 (respektive výkonu T_2 a ztrát na vedení). Druhým případem je kombinace zelené a červené křivky, kdy odebíraný výkon T_2 je větší než výkon dodávaný T_1 . Část výkonu T_2 tedy musí být hrazena z měničny.



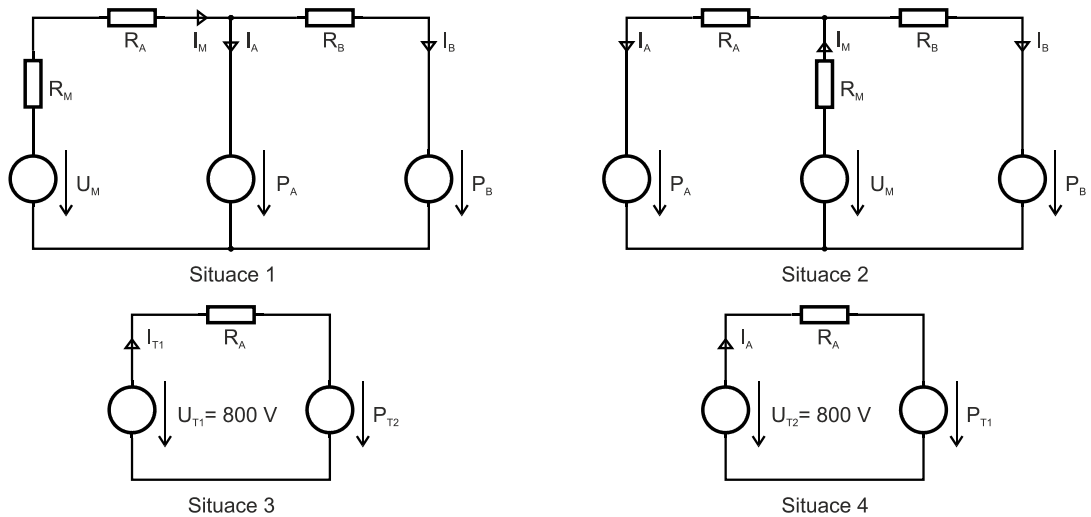
Obr. 43 Možnosti směru toku energie při T₁ v režimu brzda

Veškeré podklady pro vlastní výpočet ztrát jsou již zjištěny a je proto možné vyhodnotit o jakou situaci (rozmístění tramvají a měnírny v úseku) se jedná. V případě uvažování jedné měnírny a dvou tramvají může nastat celkem šest různých rozmístění, které jsou zobrazeny v Obr. 44. Značka M určuje polohu měnírny a značky T₁ a T₂ pak polohy tramvají v napájecím úseku.



Obr. 44 Možná rozmístění tramvají a měnírny v napájecím úseku

Pro tato rozmístění lze určit dva náhradní elektrické obvody pro výpočet ztrát zobrazené na Obr. 45 jako *Situace 1* a *2*. Při přebytku generovaného výkonu se jedná o *Situaci 3* a *4*. Pro tyto případy musí být náhradní obvod odlišný, protože měnírna neumožňuje opačný směr výkonu.



Obr. 45 Náhradní obvody pro výpočet ztrát ve vedení

Řešením těchto náhradních obvodů lze vypočítat ztráty ve vedení. Odpor R_M opět znamená náhradní odpor měřírny a odpory R_A a R_B charakterizují odpory trakčního vedení (trolej, kolejnice) dle konkrétního rozmístění tramvají po úseku.

Pro *Situaci 1* platí následující rovnice:

$$(R_M + R_A) \cdot I_M + \frac{P_A}{I_A} - U_M = 0 \quad (28)$$

$$R_B \cdot I_B + \frac{P_B}{I_B} - \frac{P_A}{I_A} = 0 \quad (29)$$

$$I_M = I_A + I_B \quad (30)$$

Pro *Situaci 2* platí následující rovnice:

$$-R_A \cdot I_A - R_M \cdot I_M + U_M - \frac{P_A}{I_A} = 0 \quad (31)$$

$$R_M \cdot I_M + R_B \cdot I_B + \frac{P_B}{I_B} - U_M = 0 \quad (32)$$

$$I_M = I_A + I_B \quad (33)$$

Protože v rovnicích figurují výkony, které jsou výsledkem simulace, vede řešení rovnic na polynom čtvrtého řádu. Po jeho vyřešení musí být ze čtyř kořenů vybrán jediný fyzikálně reálný výsledek. Po získání správných hodnot proudů je již možné spočítat ztráty ve vedení.

Náhradní obvody pro *Situace 3 a 4* jsou sice stejné, ale jejich postup řešení je odlišný, protože jsou známy jiné veličiny. Vždy je znám výkon P_{T1} a výkon P_{T2} musí mít právě takovou velikost, aby bylo v obvodu dosaženo rovnosti výkonů (zahrnuje tedy ztráty ve vedení). Protože se jedná o situace s přebytkem generovaného výkonu, vždy bude jedna z tramvají na maximálním napětí (a přebytečný výkon se bude mařit v jejím brzdovém odporu). *Situace 3* odpovídá režimu brzda tramvaje T_1 , proto lze předpokládat, že její napětí bude maximální ($U_{TRmax} = 800$ V). Výpočet ztrát je tedy mnohem jednodušší.

Výpočet ztrát ve vedení P_{VED} pro *Situaci 3*:

$$P_{VED} = R_A \cdot \left(\frac{P_{T1}}{U_{TRmax}} \right)^2 \quad (34)$$

Situace 4 odpovídá režimu pohon tramvaje T_1 . Aby byla v *Situaci 4* zaručena rovnost výkonů, musí být odebíraný výkon T_1 roven součtu rekuperovaného výkonu a ztrát ve vedení.

Rovnice pro určení proudu při *Situaci 4*:

$$R_A \cdot I_A + \frac{P_{T1}}{I_A} - U_{TRmax} = 0 \quad (35)$$

Řešením této rovnice jsou dva kořeny, z nichž musí být opět vybrán jeden fyzikálně reálný výsledek. Poté mohou být spočteny i ztráty ve vedení.

5.4 Blok Akumulační systém

Tento blok prezentuje systém akumulace energie skládající se ze superkondenzátoru (akumulační prvek) a z výkonového pulzního měniče. Energii akumulačního systému lze hrubě navrhnout dle kinetické energie tramvaje. Velikost energie může být navržena zhruba na $\frac{3}{4}$ maximální kinetické energie. Dimenzování systému na plnou energii by totiž nebylo vhodné, protože nelze očekávat vždy zcela plně obsazenou tramvaj a brzdění z plné rychlosti. Přesnější návrh je odvozen od konkrétní trati a s tím související možnosti rekuperace, od požadavků na akumulační systém a od použité strategie řízení. Velmi důležitým kritériem je

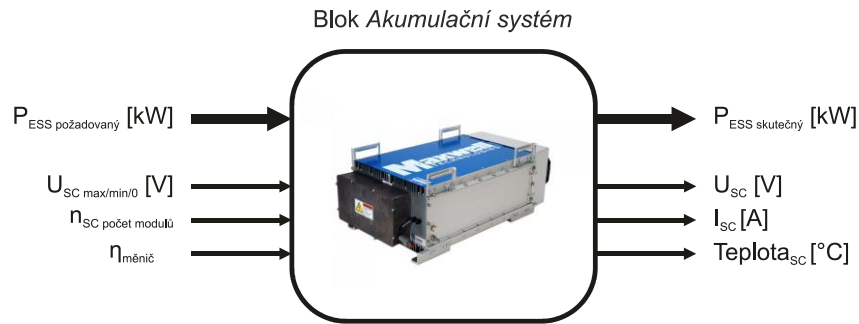
samozřejmě i návratnost investice, nemusí se totiž vyplatit za každou cenu ušetřit maximum energie. Pro simulace a návrh akumulčního systému byl vybrán modul BMOD0063 P125 od firmy Maxwell Technologies [48], která patří mezi největší světové výrobce. Tento modul je přímo navržen a certifikován pro použití v trakci a vyhovuje proto i bezpečnostním požadavkům a testům. V tabulce Tab. 15 jsou uvedeny jeho základní parametry.

Tab. 15 Základní parametry superkondenzátorového modulu

Maxwell modul BMOD0063 P125	
Jmenovitá kapacita	63 F
Jmenovité napětí	125 V
ESR	18 mΩ
Maximální trvalý proud ($\Delta T=15^{\circ}\text{C}$)	140 A _{RMS}
Maximální trvalý proud ($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)	240 A _{RMS}
Tepelný odpor (článek - okolí)	0,04 °C/W
Tepelná kapacita	33370 J/°C
Délka x Šířka x Výška	619x425x266 mm
Hmotnost	60,5 kg

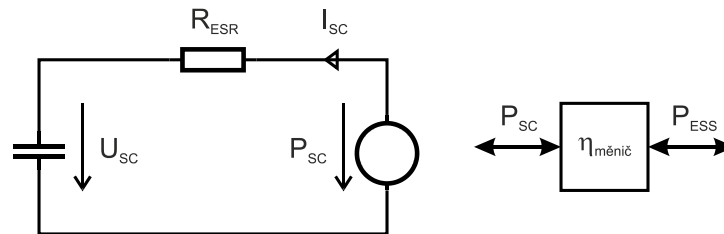
Blok *Akumulční systém* je koncipován tak, aby bylo možné snadno nastavit počet těchto modulů pro potřeby simulace.

Stav akumulčního systému je definován pomocí několika výstupních veličin na základě veličin vstupních. Hlavní vstupní veličinou je požadavek na výkon P_{ESS} (kladný nebo záporný dle směru toku energie). Dalšími vstupy jsou hodnoty minimálního, maximálního a počátečního napětí (U_{SCmin} , U_{SCmax} , U_{SC0}) všech použitých modulů v sérii, počet modulů n_{SC} a účinnost měniče akumulčního systému $\eta_{m\acute{e}ni\acute{c}h}$. Dle [6] může účinnost měniče v případě použití rezonanční topologie dosahovat 97%. Hlavní výstupní veličinou tohoto bloku je skutečný výkon akumulčního systému P_{ESS} , který je ovlivněn mnoha parametry, jako jsou účinnost, teplota a povolený rozsah napětí. Další výstupní veličiny jsou proud I_{SC} , napětí U_{SC} a již zmiňovaná $Teplota_{SC}$. Uvedené vstupní a výstupní veličiny jsou zobrazeny na Obr. 46.



Obr. 46 Vstupy a výstupy bloku Akumulační systém

Model popisující superkondenzátor se pro zjednodušení skládá pouze z kapacity C_{SC} a vnitřního odporu R_{ESR} . Protože je od bloku *Akumulační systém* požadována vždy konkrétní hodnota výkonu, skládá se jeho popis ještě ze zdroje tohoto výkonu P_{SC} , jak ukazuje Obr. 47. Tento výkon P_{SC} je o ztráty na měniči menší než výkon P_{ESS} celého bloku *Akumulační systém* (případně vyšší při opačném toku energie).



Obr. 47 Zjednodušený elektrický model SC

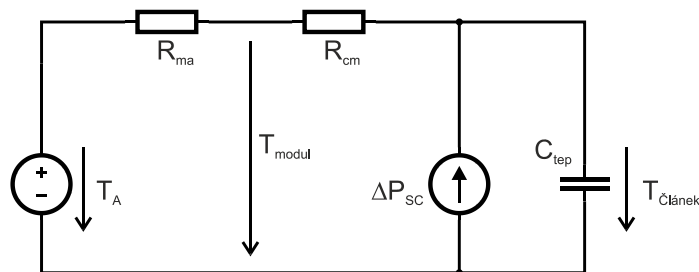
Řešení obvodu vede díky zdroji výkonu opět na kvadratickou rovnici. Vybráním správného kořenu je získán proud I_{SC} . V případě, že je po akumulacním systému požadován vyšší výkon, než je systém schopen „protlačit“ přes vnitřní odpor R_{ESR} , je tento výkon omezen na maximální možnou hodnotu. Spíše však dochází k omezení výkonu kvůli minimálnímu povolenému napětí U_{SCMIN} a omezení maximálního proudu I_{SC} .

$$R_{ESR} \cdot I_{SC}^2 + U_{SC} \cdot I_{SC} - P_{SC} = 0 \quad [\Omega, A, V, W] \quad (36)$$

- R_{ESR} ... ekvivalentní sériový odpor SC [Ω]
- I_{SC} ... proud SC [A]
- U_{SC} ... napětí SC [V]
- P_{SC} ... výkon SC [W]

Protože na životnost SC mají významný vliv teplota a maximální napětí, musí být při návrhu tyto parametry vhodně zvoleny. V katalogovém listu modulu [49] je uvedeno, že modul BMOD0063 P125 je složen ze 48 článků. Z toho plyne, že jmenovité napětí 125 V odpovídá cca 2,6 V na článek. Z hlediska prodloužení životnosti by bylo vhodné provozovat SC na nižším napětí, viz Obr. 3 v kapitole 2.1. Z tohoto grafu je patrna i důležitost návrhu maximální teploty článků.

Pro zjištění teploty článků SC byl použit ekvivalentní elektrický obvod jako tepelný model celého modulu BMOD0063 P125 uvedený v [50]. Tento náhradní elektrický obvod je uveden na Obr. 48.



Obr. 48 Náhradní elektrický obvod pro tepelný výpočet SC

Následující rovnice popisují řešení náhradního obvodu a jejich výsledkem je tedy hledaná teplota článků, popřípadě povrchu modulu.

$$T_{\text{článek}}(t) = K \cdot e^{\lambda t} + T_a + (R_{ma} + R_{cm}) \cdot \Delta P_{SC} \quad \left[^\circ\text{C}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \text{W} \right] \quad (37)$$

$$\lambda = -\frac{1}{C_{tep} \cdot (R_{ma} + R_{cm})} \quad \left[\frac{\text{J}}{^\circ\text{C}}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right] \quad (38)$$

$$K = T_{\text{článek}}(0) - (R_{ma} + R_{cm}) \cdot \Delta P_{SC} - T_a \quad \left[^\circ\text{C}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \text{W} \right] \quad (39)$$

$T_{\text{článek}}$... teplota článku SC [$^\circ\text{C}$]

T_a ... teplota okolí [$^\circ\text{C}$]

R_{ma} ... tepelný odpor modul – okolí [$^\circ\text{C}/\text{W}$]

R_{cm} ... tepelný odpor článek – modul [$^\circ\text{C}/\text{W}$]

ΔP_{SC} ... ztrátový výkon SC [W]

C_{tep} ... tepelná kapacita SC [$\text{J}/^\circ\text{C}$]

Ztrátový výkon superkondenzátorového modulu, který je proudovým zdrojem v tepelném obvodu, je vypočten dle následující rovnice.

$$\Delta P_{SC} = R_{ESR} \cdot I_{SC}^2 \quad [\text{W}, \Omega, \text{A}] \quad (40)$$

R_{ESR} ... ekvivalentní sériový odpor SC [Ω]

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

Vypočtená teplota slouží k omezení proudu I_{SC} v případě přehřátí SC a tím k jeho ochraně proti výraznému zkrácení životnosti. Když teplota článků SC dosáhne nastavené maximální hodnoty, je proud I_{SC} omezen na takovou hodnotu, která odpovídá danému oteplení a teplotu tedy nebude dále navyšovat. Hodnota proudu je odvozena ze vzorce pro výpočet oteplení dodávaný výrobcem SC [49]. Tento vztah platí pro teplotu okolí 25 °C a ustálený stav.

$$\Delta T = R_{ca} \cdot R_{ESR} \cdot I_{SC}^2 \left[^\circ\text{C}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \Omega, \text{A} \right] \quad (41)$$

ΔT ... oteplení článků [$^\circ\text{C}$]

R_{ca} ... tepelný odpor: články – okolí ($R_{ma} + R_{cm}$) [$^\circ\text{C}/\text{W}$]

5.5 Přesnost simulace

Pro určení přesnosti simulačního modelu byly simulační výsledky bez použití akumulačního systému porovnávány s naměřenými hodnotami v reálném provozu. Konkrétně byly porovnávány simulované a naměřené energie (spotřebované E_S , celkové E_C a součty energie rekuperované a mařené v odporníku $E_R + E_{ODP}$). Přesnost modelu tedy určují vypočtené relativní odchylky, které jsou vypočteny dle rovnice (42). Jejich výpočet vychází ze zmiňovaných energií v součtu za cestu Bory → Košutka a zpět.

$$\delta = \frac{E_{SIM} - E_{MER}}{E_{MER}} \cdot 100 \quad [\%, \text{kWh}] \quad (42)$$

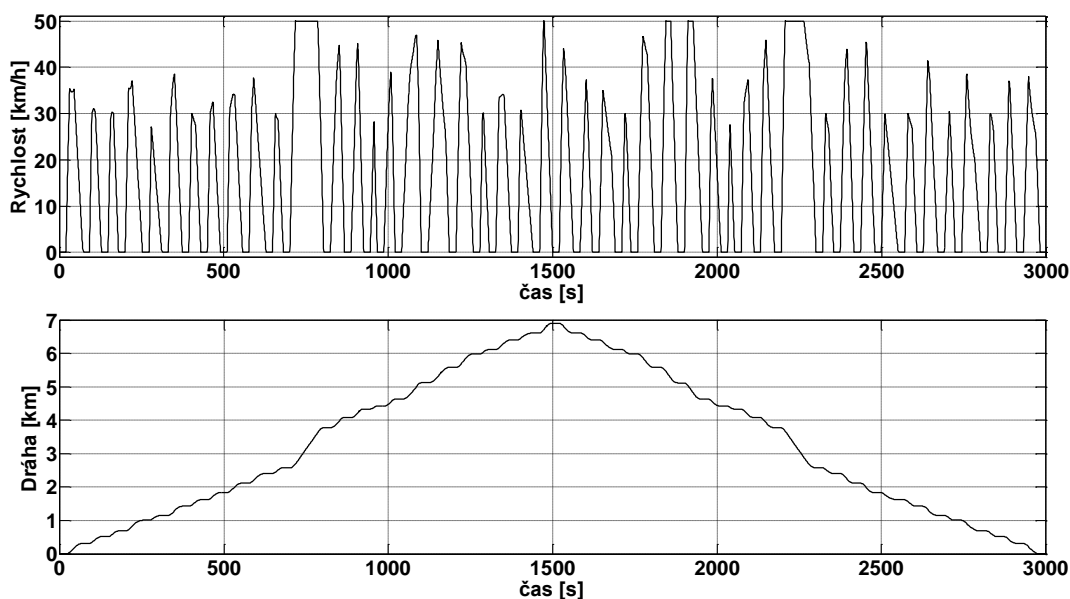
Vypočtené odchylky jsou rozděleny do čtyř skupin podle obsazenosti tramvaje. Měření a následně i simulace byly provedeny pro obsazenosti 0, 5, 8 a 10 os/m². Protože měření pro různé obsazenosti bylo provedeno opakovaně (nejméně 3krát, nejvýše 5krát), jsou odchylky počítány z průměru změřených dat. V případě větší vypočtené odchylky byla

odchylka vypočtena i od změřeného maxima, popřípadě minima. V následující tabulce Tab. 16 jsou vypočtené relativní odchylky uvedeny. Brzdná energie E_B je dána součtem energie rekuperované E_R a energie mařené v brzdovém odporu E_{ODP} .

Tab. 16 Relativní odchylky simulačních výsledků od změřených hodnot

0 os/m ²			5 os/m ²			8 os/m ²			10 os/m ²		
E_C	E_S	E_B	E_C	E_S	E_B	E_C	E_S	E_B	E_C	E_S	E_B
Relativní odchylky od průměru změřených hodnot [%]											
4,9	2,4	1,8	20,0	9,2	8,3	15,1	9,1	20,1	-6,6	-8,1	-1,3
Relativní odchylky od minimální nebo maximální změřené hodnoty [%]											
-	-	-	14,9	-	-	11,7	-	13,0	-	-	-

Z výsledků relativních odchylek je patrná přesnost simulace, která dosahuje 20 % při vztážením k průměrným hodnotám měřených hodnot v reálném provozu. Při odchylkách větších jak 15 % byly spočteny odchylky od krajních změřených hodnot (maximum nebo minimum). Tyto odchylky jsou menší jak 15 %. Na Obr. 49 je uveden příklad průběhu rychlosti a dráhy při jízdě tramvaje z konečné *Bory* na *Košutku* a zpět.



Obr. 49 Příklad simulované rychlosti a dráhy

6 Strategie řízení akumulčního systému

V této kapitole je popsáno několik strategií založených na různých principech s různými výsledky úspor na tramvajové lince. Porovnávacím kritériem je spotřeba energie E_{total} způsobená hlavní simulovanou tramvají. V této spotřebě není zahrnuta pouze spotřeba tramvaje, ale i tramvají způsobené ztráty ve vedení dříve popsané v kapitole 5.3.3 a neméně důležitý rozdíl energie SC před a po jízdě ΔE_{SC} . V energii E_{total} nejsou započteny ztráty brzdového odporu E_{ODP} ani ztráty akumulčního systému E_{ESS} , protože tyto jsou již zahrnuty ve spotřebované energii z troleje E_S . V případě, že by byly výsledky simulace vztaženy pouze k odebrané energii z troleje E_S (tedy bez zahrnutí rekuperace a ztrát ve vedení), vycházela by úspora energie mnohem příznivěji. Takto dosažené hodnoty jsou sice uspokojivé, avšak zcela zavádějící z důvodu neuvažování dopadu na ostatní ztráty a bilanci v troleji.

Pro jednotlivé strategie je simulačně zjištěna závislost spotřeby na počtu SC modulů n_{SC} dříve popsaných v kapitole 5.4 (využitelná energie jednoho modulu při vybíjení do 50 % jmenovitého napětí je cca 100 Wh, přičemž kinetická energie tramvaje o hmotnosti 40 t jedoucí 50 km/h je přibližně 1 kWh). Pro snadnější porovnání je do grafů vynášena procentní úspora energie vztažená ke spotřebě E_{total} tramvaje bez akumulčního systému. Výsledky simulace pro tramvaj bez ESS jsou také uvedeny v Tab. 17 pro různé hmotnosti resp. obsazenosti.

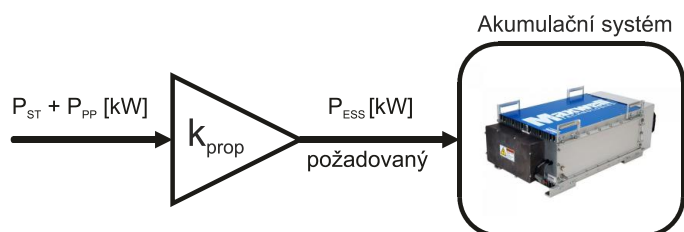
Aby bylo porovnávání strategií objektivnější, byly simulační výsledky získávány pro tři různé hladiny rekuperace - nejprve pro uměle zakázanou rekuperaci, poté pro poloviční rekuperaci a nakonec s rekuperací přirozenou (neomezenou), která odpovídá reálným poměrům na lince č. 4.

Tab. 17 Výsledky simulací tramvaje bez akumulčního systému

Bez akumulčního systému					
Obsazenost [os/m ²]		0	5	8	10
E_S	[kWh]	35,96	46,81	50,29	52,42
E_R	[kWh]	8,07	10,92	11,58	12,21
E_C	[kWh]	27,89	35,89	38,71	40,21
E_{ODP}	[kWh]	1,62	2,08	2,41	2,36
E_{VED}	[kWh]	2,67	3,25	3,33	3,54
E_{ESS}	[kWh]	0,00	0,00	0,00	0,00
ΔE_{SC}	[kWh]	0,00	0,00	0,00	0,00
E_{TOTAL}	[kWh]	30,56	39,14	42,04	43,74

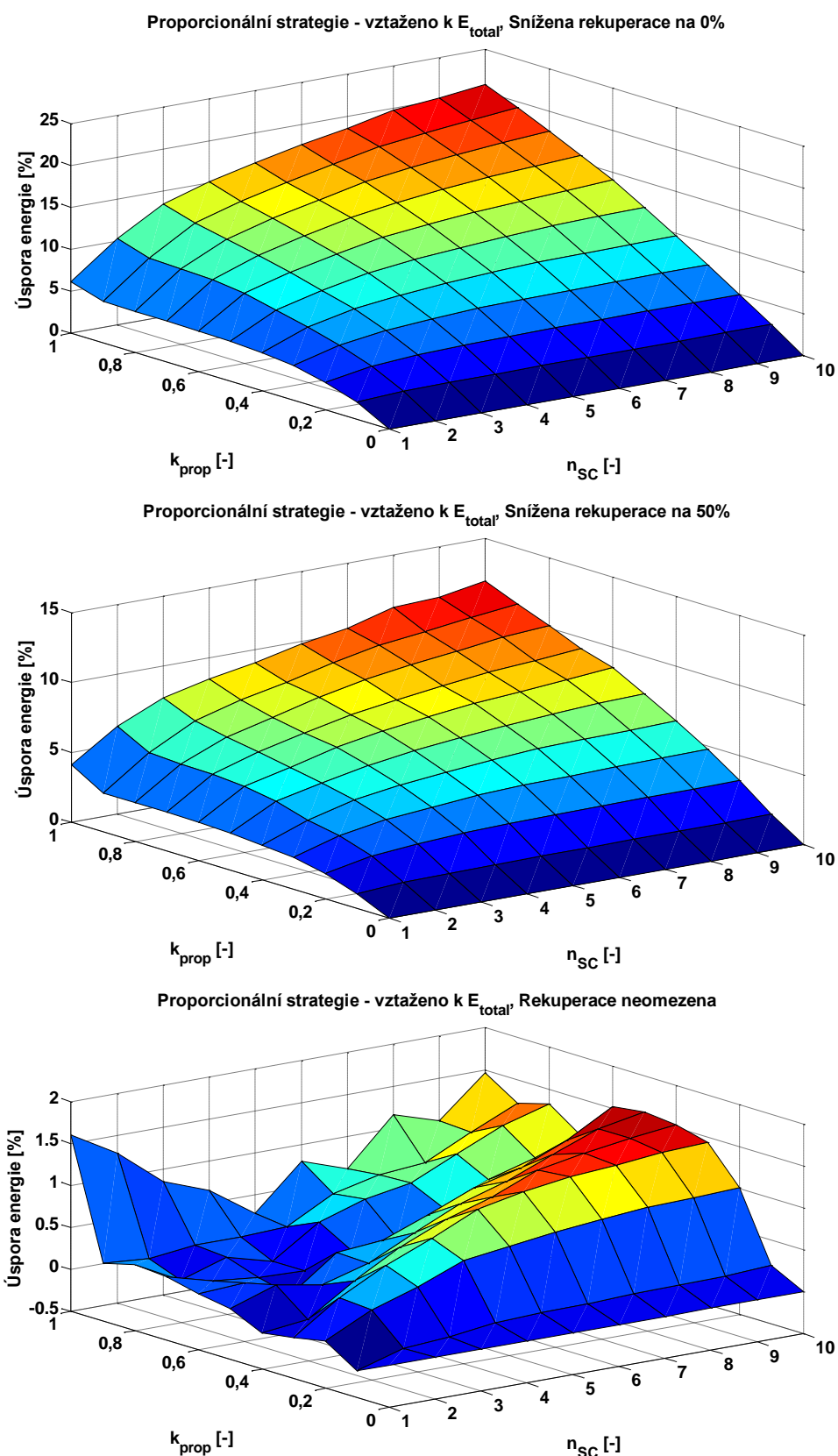
6.1 Proporcionální řízení

Tato strategie řízení akumulčního systému, používaná i v [51], vychází z pokrytí aktuálního požadavku trakčního střídače P_{ST} a spotřeby pomocných pohonů P_{PP} . Pomocí konstanty k_{prop} lze proporcionálně nastavovat účinek akumulčního systému. Na Obr. 50 je tento jednoduchý princip zobrazen.



Obr. 50 Princip proporcionální strategie řízení

Následující simulační výsledky na Obr. 51 zobrazují závislost úspor energie na počtu SC modulů n_{SC} a proporcionální konstantě k_{prop} pro tři různé hladiny rekuperace. Z grafu pro zakázanou rekuperaci (0%) je zřejmá a očekávaná úspora energie rostoucí se zvyšujícím se počtem SC n_{SC} a s rostoucí proporcionální konstantou k_{prop} . Úspora energie dosahuje až 21%. V případě povolení rekuperace na 50 % je již situace horší. Použití akumulčního systému svým principem snižuje možnou rekuperaci a tím se výsledná úspora energie zhorší na cca 12 %.



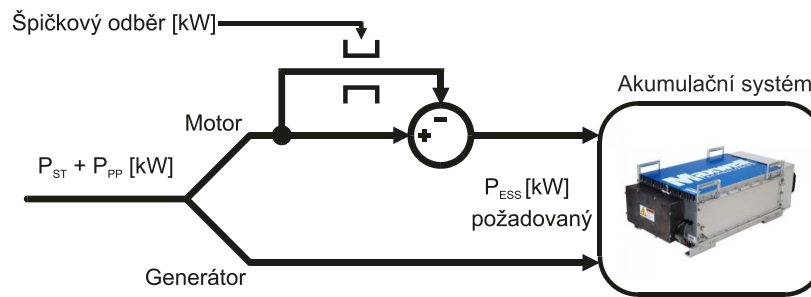
Obr. 51 Výsledek simulace proporcionální strategie řízení ESS pro různé hladiny rekuperace

Z grafu pro plnou (neomezenou) rekuperaci je patrna překvapivě nízká úspora energie a i tvar závislosti se již neshoduje s předpokládaným. Nízký výsledek, při objektivnějším vztažení k hodnotě E_{total} , je dán charakterem linky č. 4, kde je poměrně velká část odebrané energie zpět rekuperována. Konkrétní procentní hodnota rekuperované energie je až 25 %, kdežto energie mařená v brzdovém odporníku je pouze 4 %. Hlavní vlastností proporcionální strategie je snaha pokrývat rozjezdy, což sice snižuje ztráty v troleji a zmiňovanou spotřebovanou energii E_S , ale bohužel se tato strategie snaží zachytit i plnou energii při brzdě. V případě již plně nabitého SC nezbyvá než energii nabídnout prostřednictvím rekuperace, která však nemusí nastat. Tímto způsobem popisovaná strategie značně sníží rekuperovanou energii E_R a díky velkému vytížení ESS jsou dokonce ztráty v akumulacním systému (odpor SC, účinnost měniče) řádově srovnatelné se ztrátami v brzdovém odporníku tramvaje bez akumulacního systému. Účinnost popisované strategie bude samozřejmě vyšší na linkách s nižším procentem rekuperované energie a pro linku č. 4 tedy není příliš výhodná.

Z grafu pro neomezenou rekuperaci je mimo jiné patrna optimální hodnota proporcionální konstanty k_{prop} , která se pohybuje od 0,3 (pro nižší počet SC modulů) až po 0,4 (pro vyšší počet SC modulů).

6.2 Omezení špičkových odběrů

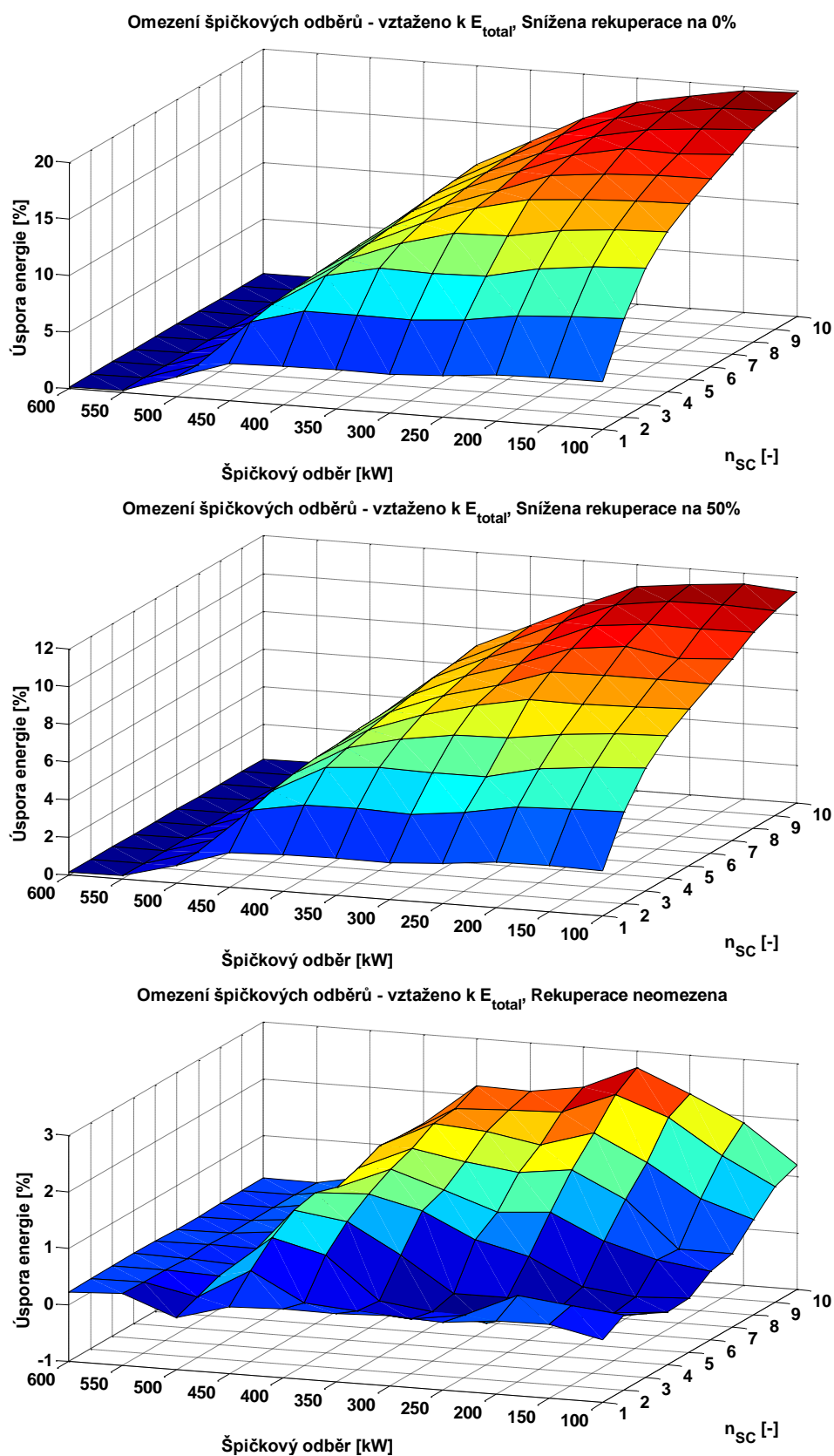
Principem této strategie, která je také používána v [51], je použití akumulované energie pro hrazení odběrů převyšujících nastavenou hladinu. Akumulacní systém tak vlastně ořezává výkonové špičky, které způsobují nadměrné ztráty v troleji. V motorickém režimu je oříznut výkon převyšující nastavenou hodnotu *Špičkový odběr* a při generátorickém režimu je požadováno akumulovat plný výkon, aby byl systém následně schopen odebírané špičky omezovat. Zmíněný princip je zobrazen na Obr. 52.



Obr. 52 Princip omezení špičkových odběrů

Pro zjištění optimální hodnoty konstanty *Špičkový odběr* byla opět použita simulace pro různý počet SC n_{SC} a pro několik hodnot *Špičkového odběru*. Velikost *Úspory energie* je opět vztažena k energii E_{total} pro tramvaj bez ESS. Výsledné závislosti jsou opět pro tři hladiny rekuperace zobrazeny na Obr. 53. Pro zakázanou rekuperaci vychází opět předpokládaný výsledek, a to takový, že se zvyšujícím se počtem SC a snižující se hladinou *Špičkového odběru* úspora energie roste (konkrétně až k 20 %). Pro omezení rekuperace na 50 % se úspora energie sníží na necelých 12 %, a to při očekávatelném nejvyšším počtu SC.

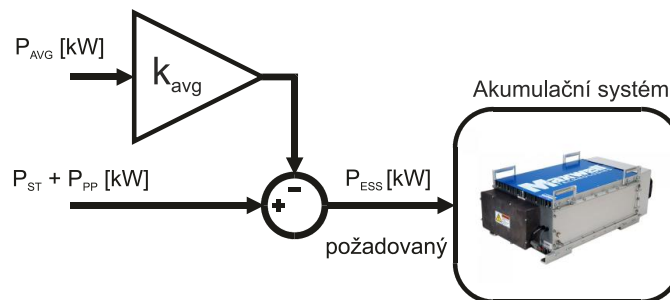
Důvodem nízké úspory při plné rekuperaci je opět podstatné snížení rekuperované energie E_R . Tato strategie bude mít zřejmě uplatnění v místech, kde je očekávána velká vzdálenost pro přenos energie, respektive velký odpor vedení. Těmito místy tedy mohou být konce vedení vzdálené od měnírny, úseky s opotřebovaným trolejovým vodičem nebo přestupní místa s vysokým počtem současných rozjezdů. Použití této strategie kompletně na celé lince č. 4 se nejeví jako výhodné. Z uvedené závislosti je patrna optimální hodnota *Špičkového odběru*, která se pohybuje pro nižší počet SC kolem 400 kW a pro větší počet SC kolem 200 kW. Pro další porovnání byla tedy zvolena hodnota 300 kW.



Obr. 53 Výsledek simulace strategie omezení špičkových odběrů

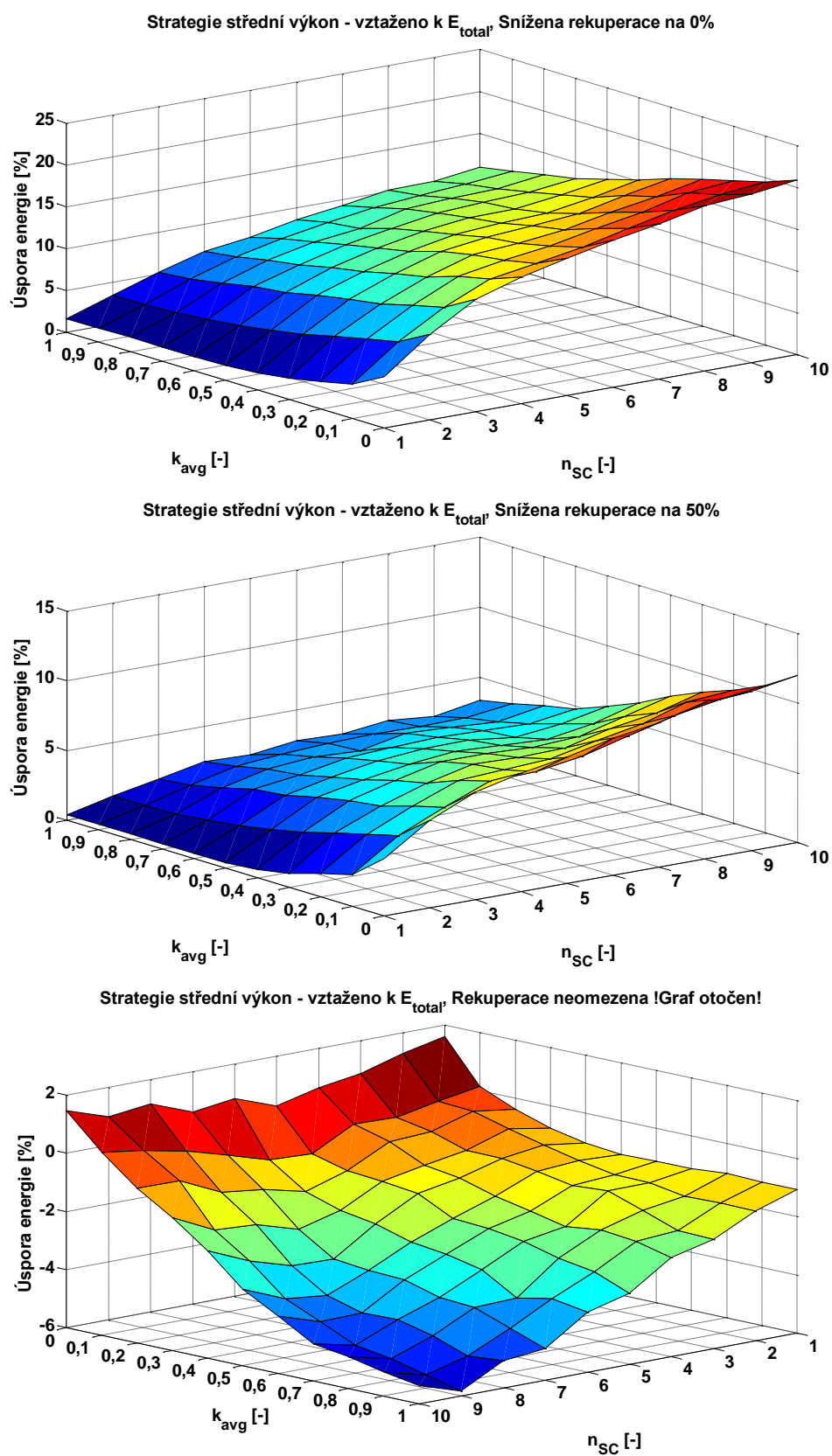
6.3 Střední hodnota odebíraného výkonu

Následující strategie, která je opět využívána v [51], se snaží udržet odběr tramvaje po celou dobu jízdy na konstantní hodnotě rovné střednímu výkonu pro celou dobu jízdy, tedy pro jednu cestu na druhou konečnou a zpět. Při dostatečné velikosti SC by tato strategie trvale odebírala konstantní výkon, který je potřeba na krytí průměrných ztrát. Výkonové špičky při rozjezdech a brzdění by plně hradil akumulací systém, který by byl jinak neustále dobíjen z troleje. Obr. 54 naznačuje princip strategie.



Obr. 54 Princip strategie středního výkonu

Na Obr. 55 jsou zobrazeny výsledky simulace opět pro tři hodnoty rekuperace. Již z grafu pro zakázanou rekuperaci je patrné nenaplnění předpokladu o výhodnosti této strategie. Nejvyšších úspor je totiž dosaženo pro $k_{avg} = 0$, což znamená bez odebrání středního výkonu. Jedná se pak o čistě proporcionalní strategii s $k_{prop} = 1$. Přidání odběru středního výkonu úsporu pouze snižuje, protože před brzděním tramvaje je SC dobíjen, a není proto připraven pojmout brzdovou energii, která musí být nabídnuta k rekuperaci (v případě zakázané rekuperace se tedy jedná o ztráty v brzdovém odporu). Po snížení rekuperace na 50 % vychází úspora energie opět nižší a nadále je patrná nevýhoda strategie s rostoucím k_{avg} .

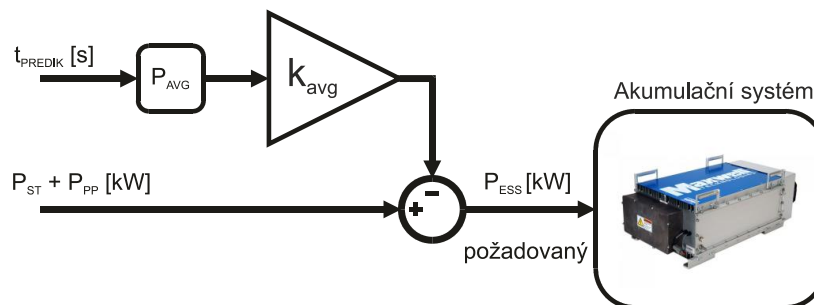


Obr. 55 Výsledek simulace strategie středního výkonu

V poslední závislosti při neomezené rekuperaci se při použití této strategie jedná již pouze o zvýšení ztrát a úspora energie je tedy záporná. Kvůli lepší viditelnosti byl tento graf otočen. Popisovaná strategie tedy nepřináší žádné úspory a naopak energetickou bilanci pouze zhoršuje.

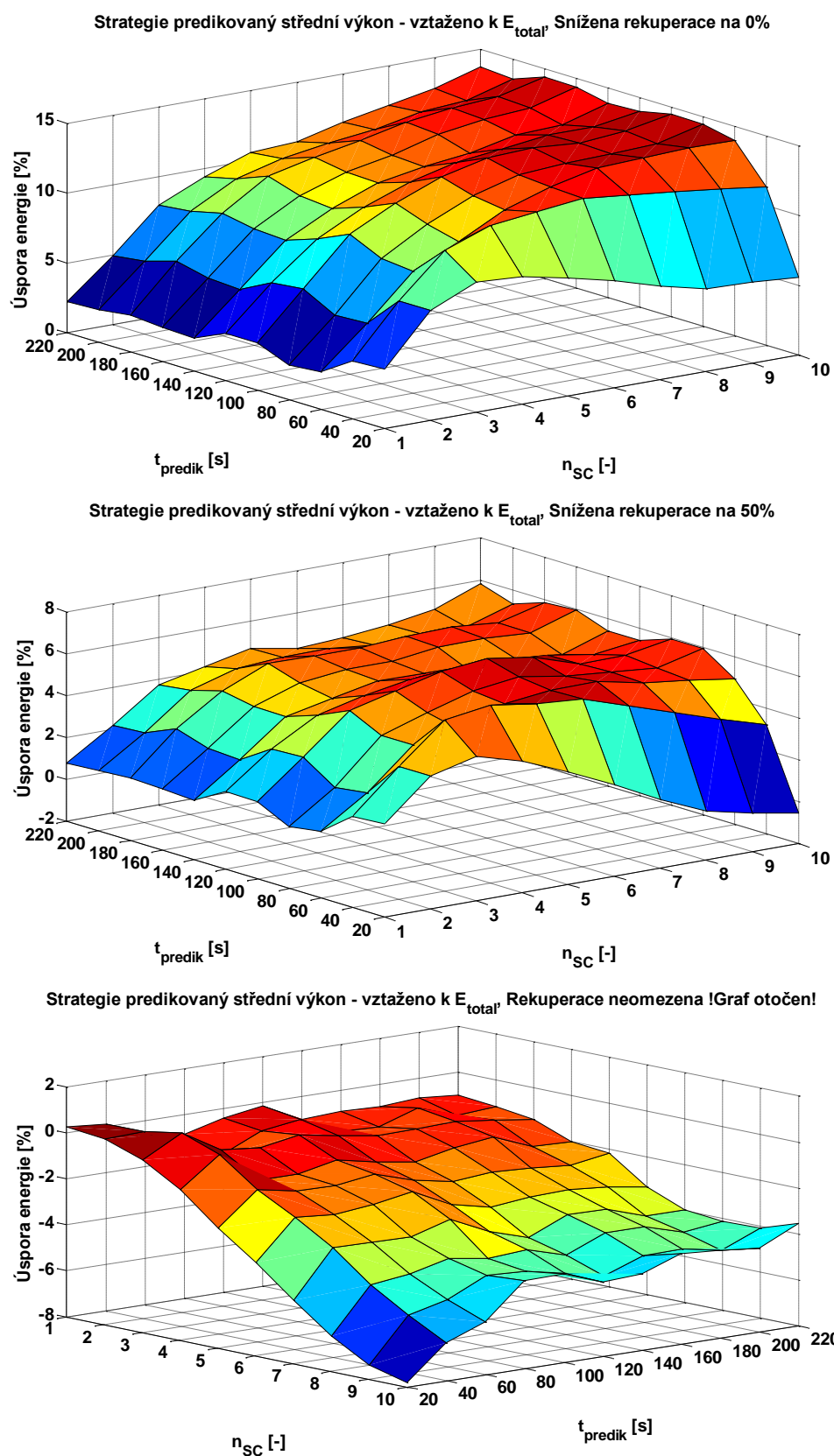
6.4 Střední hodnota odebíraného výkonu s predikcí

Tato strategie, uváděná opět v [51], spočívá ve vylepšení strategie středního výkonu. Její odlišnost je v hodnotě odebíraného středního výkonu. V tomto případě se již nejedná o střední výkon po celou dobu jízdy, ale o krátkodobější předpovídanou hodnotu pro různý časový horizont. Hodnoty výkonu pro předověď (predikci) jsou získány z předchozí simulace, kdy je ukládána spotřebovaná energie v závislosti na čase. Z rozdílu spotřebované energie v aktuálním čase t a spotřebované energie v čase $t + t_{PREDIK}$ je vypočten střední výkon pro zvolený časový horizont. Princip je zjednodušeně naznačen na Obr. 56.

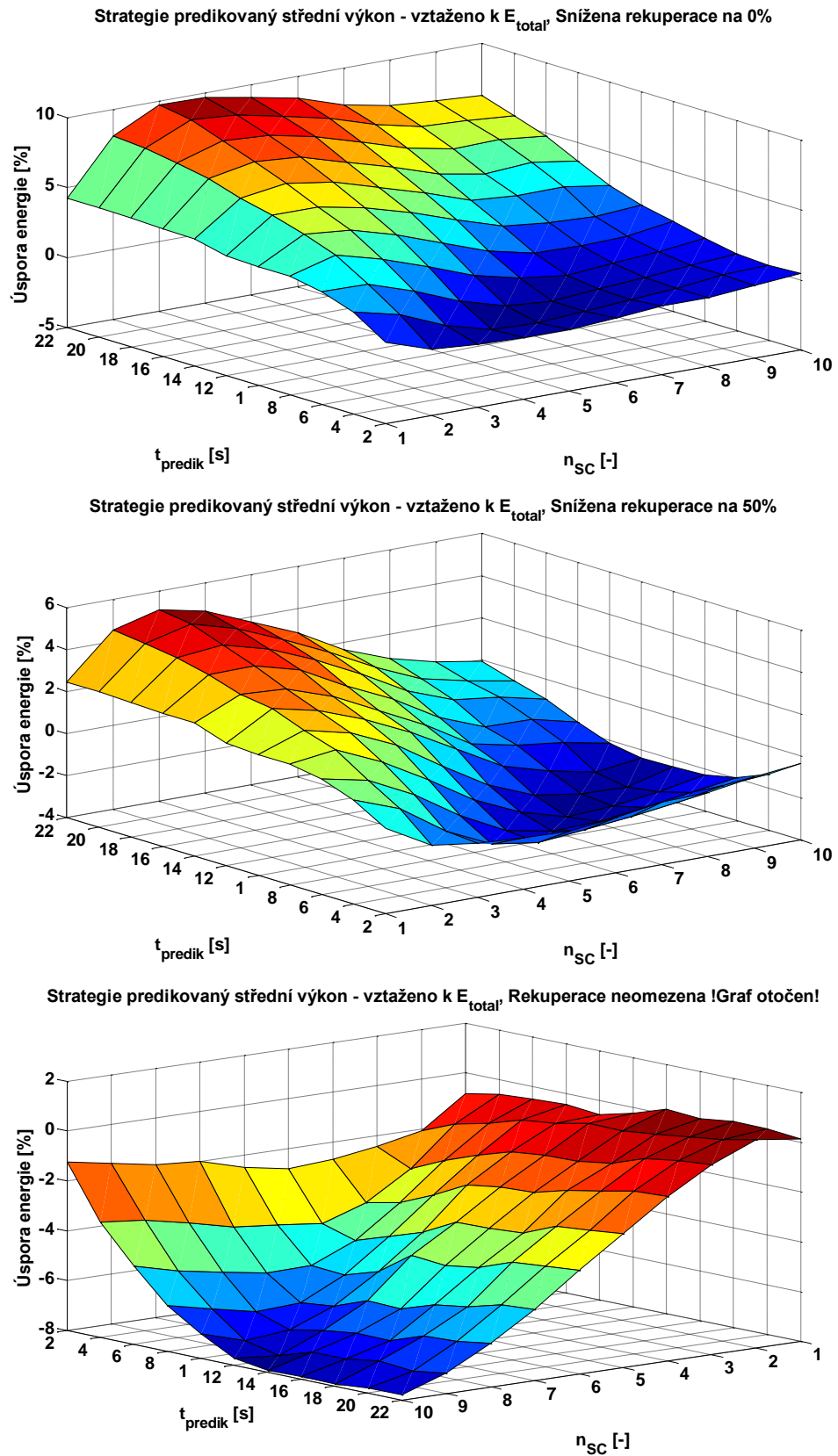


Obr. 56 Princip strategie středního výkonu s predikcí

Myšlenkou této strategie je příprava SC na budoucí příjem nebo výdej energie. Výsledky simulací pro tři hodnoty rekuperace jsou uvedeny na Obr. 57. Z grafů je patrné, že časový horizont t_{PREDIK} ovlivňuje úsporu energie. Bohužel tato strategie není pro linku č. 4 účinná jako předchozí zmiňované, což je patrné i z celkového poklesu úspory energie. Predikování výkonu může zlepšit úsporu pro nižší počet SC, avšak pro vyšší počty SC již úspora energie neroste adekvátně. Při pohledu na graf pro neomezenou rekuperaci je pozorována nevýhodnost i této strategie.



Obr. 57 Výsledek simulace strategie středního výkonu s predikcí pro horizont 20 ÷ 220 s



Obr. 58 Výsledek simulace strategie středního výkonu s predikcí pro horizont 2 ÷ 22 s

Protože kolem horizontu 20 s lze sledovat nejvyšší účinnost strategie, byly provedeny simulace i pro časy kratší a to 2 až 22 s. Jejich výsledky jsou uvedeny na Obr. 58. Bohužel je z grafu pro neomezenou rekuperaci zjevné, že tato strategie nepřináší žádné úspory ani pro kratší predikovaný čas. Při kratších časech se totiž akumulací systém nestihne na výkonové špičky včas připravit.

Velkou nevýhodou této strategie je, že vychází z časového průběhu výkonu. Strategie může být tedy výhodná, pouze když tramvaj jede dle jízdního řádu. Jakmile dojde ke zpoždění, bude příprava hladiny nabití SC reagovat nevhodně, a v některých případech dokonce i opačně.

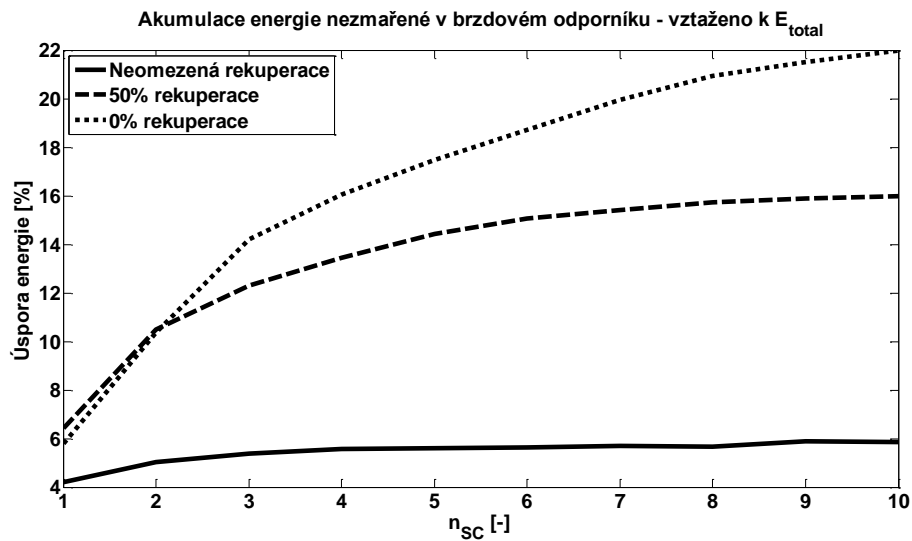
6.5 Určení hladiny SC dle predikce trati

Předkládaná strategie se skládá ze dvou základních principů. Prvním z nich je dobíjení SC pouze z energie, která by bez použití ESS byla nenávratně zmařena v brzdovém odporu. Tento princip přináší úspory díky snížení ztrát právě v ESS, protože fluktuace energie akumulací systémem je nižší než u předchozích strategií. Další výhodou tohoto principu je, že kapacita SC může být dimenzována nižší díky menším akumulovaným energiím. Tento princip tak umožňuje využívat dostupnou rekuperaci a cena investice se může pohybovat na realizovatelné úrovni.

Druhým principem předkládané strategie je příprava hladiny nabití SC dle předvídaného průběhu trati. Tento princip umožňuje připravit SC na očekávané výkonové špičky.

6.5.1 Akumulace energie jinak mařené v brzdovém odporu

Na Obr. 59 je zobrazena závislost úspory energie pro případ, kdy je akumulována veškerá energie, která by bez použití akumulací systému byla mařena v brzdovém odporu. Je tak umožněno rekuperovat stejné množství energie, jako v případě bez akumulací systému. Simulace byly provedeny opět pro tři hodnoty rekuperace a uváděná úspora energie je opět vztažena k E_{total} při stejných podmínkách pro tramvaj bez ESS.

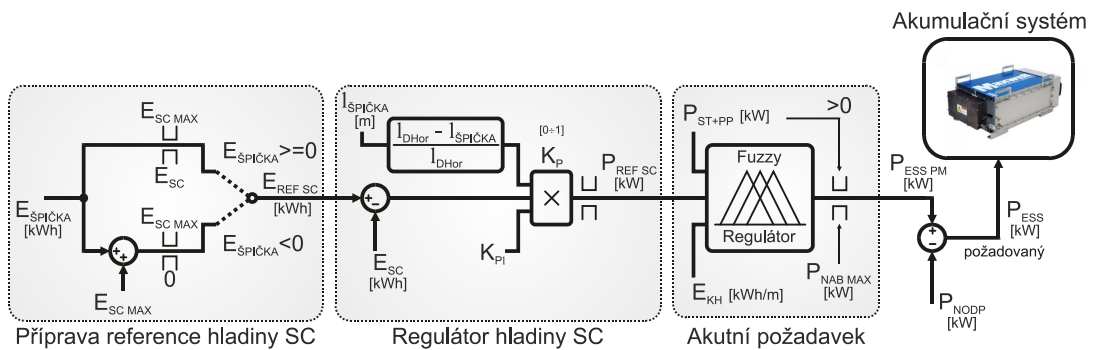


Obr. 59 Výsledky simulace při akumulaci energie jinak mařené v brzdovém odporníku

Úspora energie vychází samozřejmě nejlépe pro tramvaj, které není umožněno rekuperovat. Z průběhu grafu pro 0 % rekuperace je patrné, že dalším zvyšováním počtu SC lze stále zvyšovat úsporu, bohužel však další zvyšování již není ekonomicky výhodné. Naproti tomu při neomezené rekuperaci je z grafu zřejmé, že energie mařená v brzdovém odporníku je natolik malá, že na její akumulaci stačí pouze 4 SC a další navyšování jejich počtu je již zbytečné.

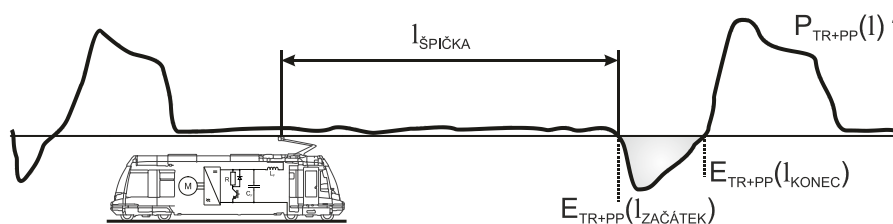
6.5.2 Příprava hladiny nabití SC dle trati

Tato část strategie umožňuje připravit hladinu SC tak, aby byl schopen pokrýt budoucí požadavek na výdej nebo akumulaci energie. Lze ji rozdělit na tři bloky: *Příprava reference hladiny SC*, *Regulátor hladiny SC* a *Akutní požadavek*. Principiální schéma strategie je uvedeno na Obr. 60.



Obr. 60 Strategie určení hladiny nabití superkondenzátoru dle predikce trati

Pro správnou funkci prvního bloku přípravy reference je důležité znát hodnotu energie $E_{\text{ŠPIČKA}}$, kterou obsahuje na trati následující špičkový kladný nebo záporný výkon. K získání této hodnoty bylo využito simulačních dat uložených během předchozí simulace. V simulaci byla ukládána energie střídače včetně pomocných pohonů $E_{\text{ST+PP}}(t)$, která byla následně vztažena k dráze linky $E_{\text{ST+PP}}(l)$. Získaná energie byla uložena do tabulky, ze které je v následujících simulacích použita pro predikování trakční energie. Díky zmíněnému vztažení energie ke vzdálenosti je energie spjata s pozicí tramvaje na trati. Tímto byla odstraněna nevýhoda časové závislosti energie, která může způsobovat velké odchylky od skutečnosti v případě zpoždění tramvaje. Hledaná energie $E_{\text{ŠPIČKA}}$ je získána rozdílem $E_{\text{ST+PP}}(l_{\text{konec}}) - E_{\text{ST+PP}}(l_{\text{začátek}})$, jak je naznačeno na Obr. 61.



Obr. 61 Detekce špičkového výkonu

Výstup bloku přípravy reference je hodnota $E_{\text{REF SC}}$, jejíž výpočet je rozdělen podle polaritě získané energie $E_{\text{ŠPIČKA}}$. V případě kladné energie (např. rozjezd) je referenční hodnota získána omezením na hodnoty $E_{\text{SC MAX}}$

(maximální uložitelná energie SC) a E_{SC} (aktuální energie SC). Aktuální energie E_{SC} byla použita proto, aby nedocházelo k nevýhodnému vybíjení SC v situacích, kdy je aktuální energie SC vyšší než energie následující výkonové špičky. Pro zápornou polaritu $E_{ŠPIČKA}$ (např. brzda) je postup obdobný a hodnota výstupní reference je právě tak velká, aby SC byl schopen absorbovat celou příchozí energii. Odlišností pro tuto polaritu je nastavení omezovače, který již nebrání dobíjení SC v situacích, kdy je prostor v SC více než dostatečný pro následující výkonovou špičku. Může být totiž výhodné udržovat hladinu SC na vyšší úrovni.

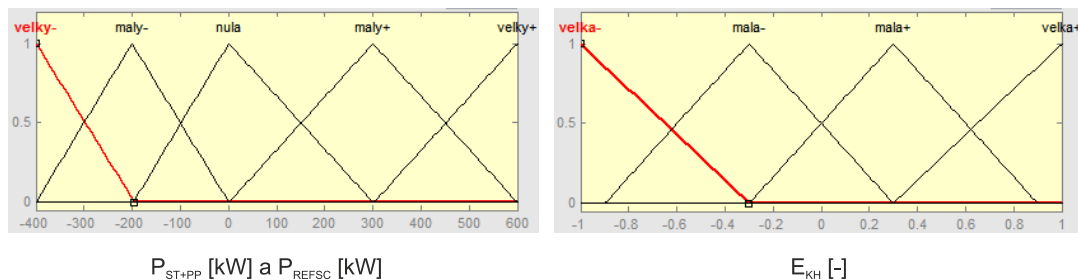
Vypočtená reference prvního bloku je právě tak velká, aby byl akumulací systém připraven na následující špičku, ať už kladnou či zápornou.

Dalším blokem této strategie je *Regulátor hladiny SC*, jehož výstupem je výkon $P_{REF SC}$ vedoucí k dosažení požadované hladiny SC. Jedná se o standardní P regulátor, jehož proporcionální konstanta K_P je závislá na vzdálenosti od následující výkonové špičky. Tato závislost může snížit Jouleovy ztráty, protože příprava SC je rovnoměrně rozložena na celou vzdálenost do špičky. Regulátor tedy zvyšuje svůj regulační účinek tím více, čím blíže je k následující výkonové špičce, ale v tuto chvíli je již malá regulační odchylka. Vzdálenost tramvaje od špičky $l_{ŠPIČKA}$ je také naznačena na Obr. 61. Maximální horizont vyhledávání výkonových špiček l_{DHor} je nastaven na 500 m. Pro delší vzdálenosti nejsou výkonové špičky detekovány a proporcionální složka regulátoru je tak nulová.

Třetí blok *Akutní požadavek* rozhoduje o výkonu požadovaném po akumulacím systému $P_{ESS PM}$ dle akutního požadavku na trakční výkon P_{ST+PP} , energie krátkého horizontu E_{KH} a výkon pro přípravu hladiny SC $P_{REF SC}$. Jako krátký horizont byla zvolena vzdálenost 60 m, která je dostatečně velká na to, aby obsáhla podstatnou část rozjezdu. Díky této informaci se může popisovaný blok *Akutní požadavek* lépe rozhodnout, jak naloží s uloženou energií.

Pro určení hodnoty výkonu $P_{ESS\ PM}$ byl použit nelineární fuzzy regulátor, jehož výstup byl omezen výkonem $P_{ST+PP} > 0$ (motorický režim) a maximálním nabíjecím výkonem $P_{NAB\ MAX}$. Po odečtení výkonu, který by byl jinak zmařen v brzdovém odporníku P_{NODP} , dostaneme konečný požadovaný výkon akumulčního systému P_{ESS} .

Použitý fuzzy regulátor je typu *Takagi-Sugeno*, který je detailně vysvětlen v [52]. Každému vytvořenému pravidlu odpovídá jedna výstupní množina typu singleton. Pravidla fuzzy regulátoru jsou vytvořena tak, aby regulátor mohl pokrývat požadované výkony při rozjezdu a ve vhodné okamžiky energii naopak akumulovat. Tímto způsobem regulátor rozhoduje, zda vyhoví přípravě hladiny SC nebo akutnímu požadavku na výdej energie pro trakci. Pro jeho správnou funkci je zapotřebí nastavit vstupní fuzzy množiny, které ukazuje Obr. 62 (P_{ST+PP} a $P_{REF\ SC}$ mají nastavení fuzzy množiny stejné a E_{KH} je normováno nejvyšší hladinou z celé trati). Poté je nastaveno celkem 10 pravidel, která jsou vypsána v následující tabulce Tab. 18.



Obr. 62 Vstupní fuzzy množiny

Tab. 18 Sestavená pravidla fuzzy regulátoru

$P_{ST+PP} = \text{malý}+$	&	$E_{KH} = \text{malá}+$	= F_1
$P_{ST+PP} = \text{malý}+$	&	$E_{KH} = \text{velká}+$	= F_2
$P_{ST+PP} = \text{velký}+$	&	$E_{KH} = \text{velká}+$	= F_3
$P_{ST+PP} = \text{velký}+$	&	$E_{KH} = \text{malá}+$	= F_4
$P_{REF SC} = \text{velký}-$	&	$P_{ST+PP} = \text{velký}-$	= F_5
$P_{REF SC} = \text{malý}-$	&	$P_{ST+PP} = \text{malý}-$	= F_6
$P_{REF SC} = \text{malý}-$	&	$P_{ST+PP} = \text{velký}-$	= F_7
$P_{REF SC} = \text{velký}-$	&	$P_{ST+PP} = \text{nula}$	= F_8
$P_{REF SC} = \text{malý}-$	&	$P_{ST+PP} = \text{nula}$	= F_9
$P_{REF SC} = \text{nula}$			= F_{10}

Optimální hodnoty výstupních konstant fuzzy regulátoru (F_1 až F_{10}) jsou hledány pomocí diferenciální evoluce popisované v následující podkapitole. Konečná výstupní veličina $P_{ESS PM}$ je vypočtena váženým průměrem těchto deseti konstant. Váhy jednotlivých pravidel odpovídají logické konjunkci příslušných vstupních fuzzy množin.

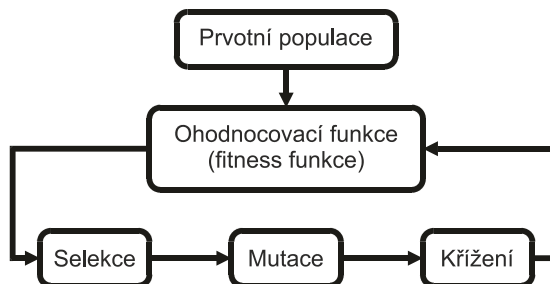
6.5.3 Ladění parametrů strategie pomocí diferenciální evoluce

Diferenciální evoluce (dále jen DE) je jedna z evolučních metod sloužící k nalezení řešení blízké se ke globálnímu extrému složité funkce, která nemá jednoduché analytické řešení. Protože evoluční metody vycházejí z přírodních zákonitostí, konkrétně genetiky, je pro ně vžita i stejná terminologie jako je jedinec, populace, generace, chromozom a další.

V tomto případě je DE použita pro nalezení optimálního nastavení fuzzy regulátoru a proporcionální konstanty P regulátoru K_{PI} . Hledáno je celkem 10 parametrů fuzzy regulátoru a jedna proporcionální konstanta. Hledaný jedinec je vektor jedenácti konstant neboli chromozom, který má tvar zobrazený na Obr. 63.

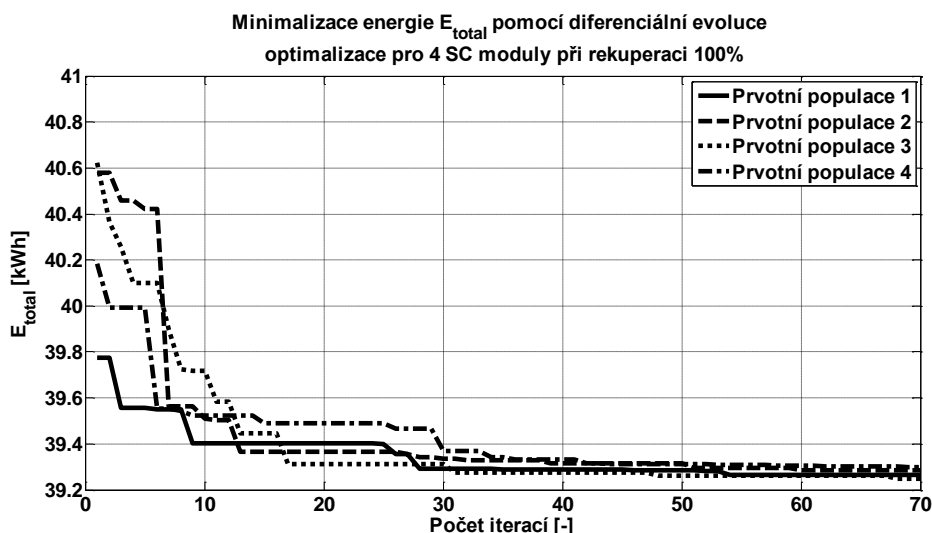
**Obr. 63 Skladba chromozomu hledaného jedince**

Diferenciální evoluci lze rozdělit do několika operací, kterými jsou *Prvotní populace*, *Ohodnocovací (Fitness) funkce*, *Selekce*, *Mutace* a *Křížení*. Podrobněji je DE včetně jednotlivých operací popsána v [53]. Základní princip DE je graficky znázorněn na Obr. 64.



Obr. 64 Základní princip diferenciální evoluce

V bloku *Prvotní populace* je vytvořen soubor určitého počtu jedinců s náhodně generovanými chromozomy. Pro tento případ bylo generováno 22 jedinců, což je dvojnásobek počtu hledaných konstant, jak je doporučeno v [54]. Pro všechny jedince z populace je spočtena *Ohodnocovací funkce*, která zjistí kvalitu jednotlivých jedinců. Tato funkce je vlastní výpočet modelu tramvaje na lince. Hodnotícím kritériem je hodnota výše zmiňované energie zohledňující ztráty v troleji E_{TOTAL} . Výskyt „overfittingu“ je minimalizován tím, že ohodnocovací funkce je simulace jízdy tramvaje celou linkou v obou směrech a nastává tak mnoho různorodých situací. V bloku *Selekce* je vybrána lepší polovina jedinců a ti jsou následně mutováni a kříženi v blocích *Mutace* a *Křížení*. Takto je vytvořena populace nová o stejném počtu jedinců. Nová populace je opět hodnocena *Ohodnocovací funkcí* a celý cyklus se opakuje, dokud není splněn zadaný počet iterací. V tomto případě bylo dostatečně kvalitního výsledku dosaženo po 70 iteracích. Průběh evoluce minimalizované energie E_{TOTAL} je uveden v následujícím grafu na Obr. 65. Jednotlivá zadání se liší pouze v prvotních populacích. Každá náhodně vygenerovaná prvotní populace má rozdílné konstanty. Extrém funkce je tedy hledán pokaždé z jiných výchozích počátečních podmínek.



Obr. 65 Průběh optimalizace pomocí diferenciální evoluce

Z průběhu je patrné, že výsledky všech čtyř evolucí konvergují ke stejné hodnotě. Nastavených 70 iterací bylo postačující pro nalezení hledaných úspor s dostatečnou přesností. Vyšší počet iterací by již nevedl k významnému zlepšení a neefektivně by prodloužil výpočetní čas, který byl pro 70 iterací téměř 19 h.

6.5.4 Dosažené úspory energie po optimalizaci

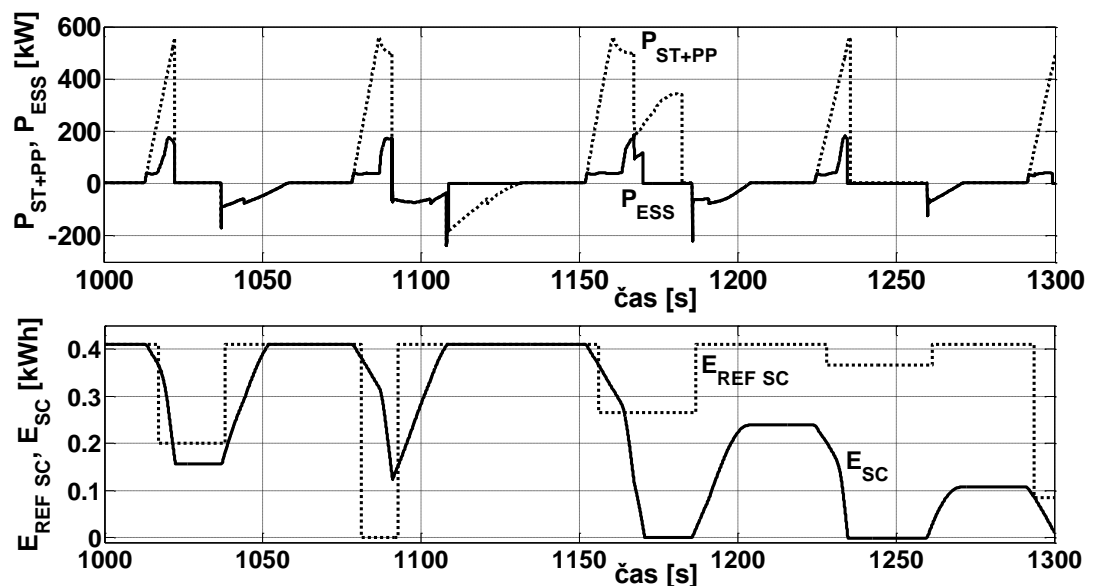
Pomocí výše zmíněné diferenciální evoluce byly optimalizovány parametry strategie pro dvě varianty velikosti energie akumulčního systému, a to 3 a 4 SC moduly. Tento počet SC modulů byl zvolen podle realizovatelné návratnosti investice, která je vyhodnocena v závěru práce. Vyšší počet SC modulů nedokáže ušetřit takové množství energie, které by bylo dostatečné pro návratnost investice. V následující tabulce jsou uvedeny výsledné úspory strategie po optimalizaci pro 3 a 4 SC moduly při plné rekuperaci (tedy 100 %). Výsledky optimalizované strategie jsou uvedeny i pro ostatní hodnoty rekuperace (0 % a 50 %).

Tab. 19 Úspory energie po optimalizaci

Optimalizace pro:	3 SC moduly			4 SC moduly		
	0%	50%	100%	0%	50%	100%
Úspora energie	13,8%	12,3%	6,4%	15,6%	14,1%	6,7%

Na následujícím Obr. 66 jsou zobrazeny průběhy klíčových veličin předkládané strategie. V horním grafu je zobrazen průběh trakčního výkonu P_{ST+PP} a výkonu akumulčního systému P_{ESS} . Na průbězích pro několik rozjezdů a zastavení je patrný princip strategie, která uloženou energii postupně uvolňuje a tím dosáhne snížení maximálního odebraného výkonu i ke konci rozjezdu. Jiné strategie díky malé kapacitě akumulčního systému často použijí veškerou energii na hrazení počátku rozjezdu, kdy je výkon nižší. Pro snížení maximálního odběru jim již energie nezbývá a ztráty ve vedení jsou tím zvýšeny.

Funkce druhé části principu předkládané strategie, kterou je určení reference hladiny SC, je patrna ze spodního grafu. Požadovaná hladina energie $E_{REF SC}$ je právě tak velká, aby byla schopna hradit nebo pojmout energii následujícího špičkového výkonu. Hodnota $E_{REF SC}$ se často pohybuje na horní hranici, protože energie rozjezdů bývá obvykle větší než maximální využitelná energie SC. Příprava pro příjem brzděné energie je realizována snížením požadované hladiny $E_{REF SC}$ právě o energii následující výkonové špičky.



Obr. 66 Simulace strategie - Určení hladiny SC dle predikce trati

6.6 Stabilizace trolejového napětí

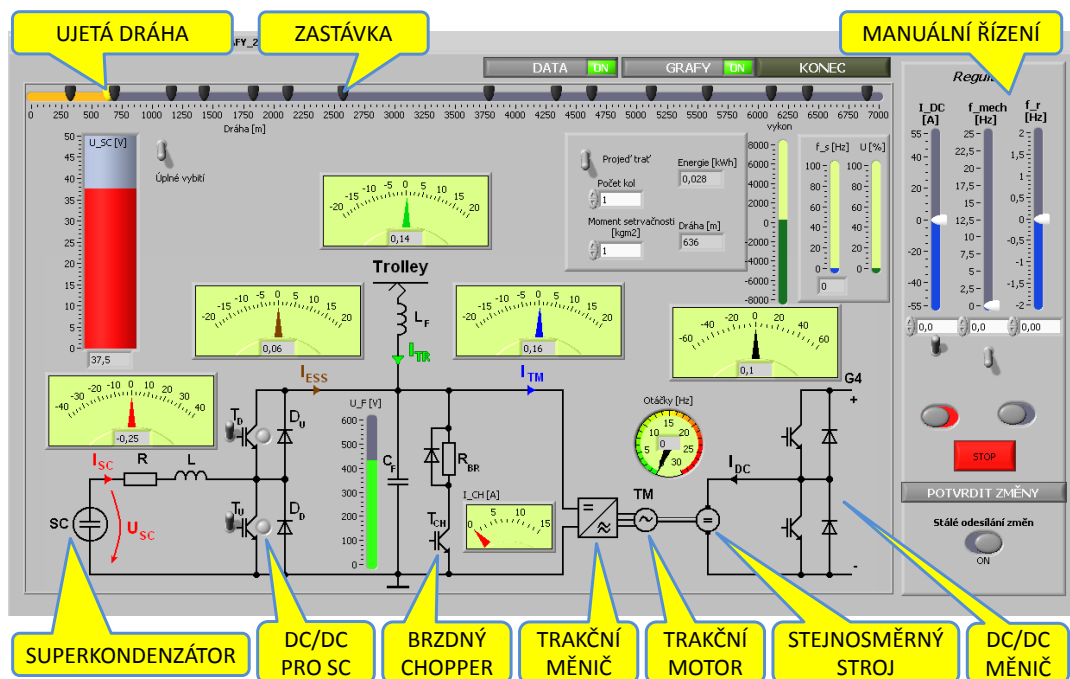
Tato strategie je zde uvedena pouze proto, že patří mezi základní varianty. Jejím hlavním účelem není úspora energie, jako tomu bylo v ostatních uváděných případech, ale podpora nepřetržitého provozu dopravní obslužnosti města. Při použití této strategie se snižuje riziko výpadku napájení vlivem podpětí způsobeným velkým odběrem. Tato strategie v případě poklesu napětí pod stanovenou mez začne dodávat energii. V případě přebytku energie, která se projeví zvýšeným napětím, je energie akumulována a tím ušetřena před zmařením v brzdových odporcích. Ze svého principu je strategie vhodná spíše pro stacionární verze právě v místech s problémovým napájením, jako jsou konce vedení nebo dopravní uzly, kde se často vyskytuje zvýšený počet vozidel. Podrobněji se problematikou stacionární verze akumulčního systému zabývá [25-29].

6.7 Měření vybraných strategií

Tato kapitola ukazuje princip vybraných strategií pomocí měření na fyzikálním modelu tramvaje s akumulčním systémem. Fyzikální model, který byl popsán v již kapitole 3.2.2, byl rozšířen o simulaci jízdních odporů a o zvýšení momentu setrvačnosti napodobující hmotnost tramvaje. Tyto funkce fyzikálního modelu zajišťuje stejnosměrný motor napájený z DC/DC měniče. Model obsahuje i vzdálenosti jednotlivých zastávek linky č. 4, a je tak možné napodobit jízdu tramvaje na konkrétní lince. Na Obr. 67 je zobrazena nadřazená řídicí jednotka v LabView, která slouží pro ovládání a měření modelu.

Použití modelu pro ověření kvality jednotlivých strategií není vhodné, protože nelze věrohodně napodobit tramvaj na lince včetně ztrát v troleji a vlivu ostatních tramvajů. Proto je na modelu pouze vysvětlen princip vybraných tří základních strategií. Měřená je strategie *Proporcionální, Omezení špičkových odběrů a Střední hodnota odebíraného výkonu*. Strategie *Střední hodnota odebíraného výkonu s predikcí* není měřena,

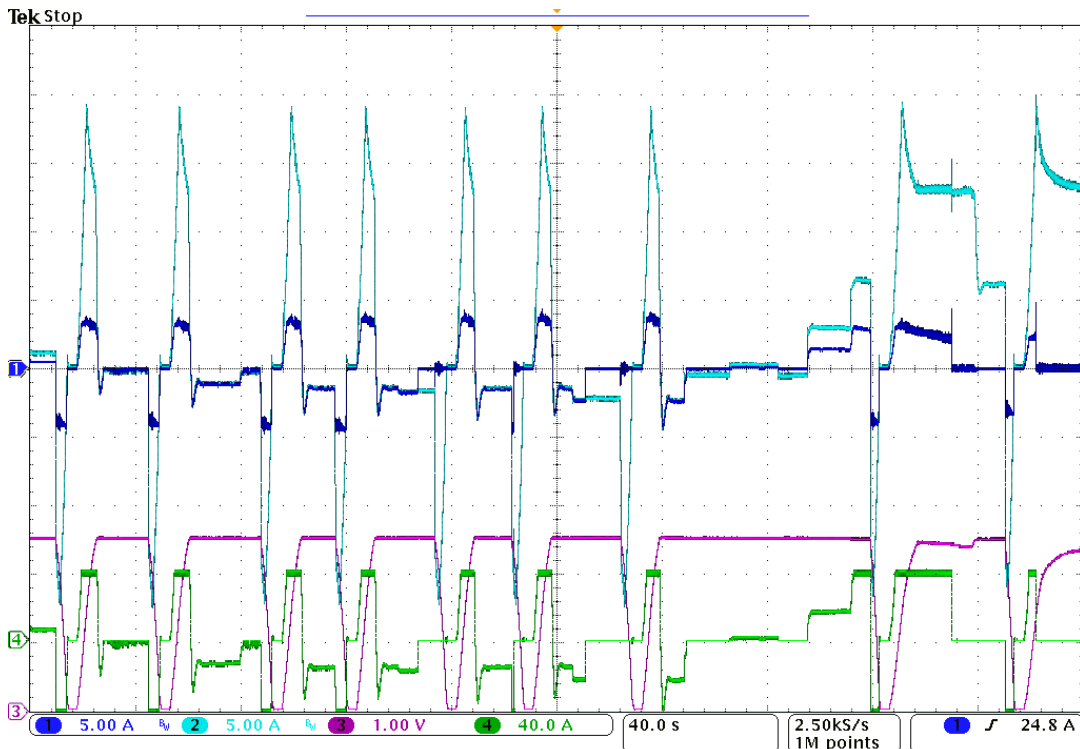
protože její princip je obdobný jako u varianty bez predikce, pouze s tím rozdílem, že se nejedná o konstantu. Měřena nebyla ani předkládaná strategie *Určení hladiny SC dle predikce trati*, protože je optimalizována dle poměrů v troleji, které fyzikální model neumožňuje měřit. Proto byla tato strategie představena pomocí simulace.



Obr. 67 Nadřazená řídicí jednotka fyzikálního modelu tramvaje s akumulacním systémem na lince č. 4

Příklad měření jízdy emulované tramvaje na lince č. 4 je zobrazen na Obr. 68. Kanál 1 (tmavě modrý) ukazuje průběh proudu dodávaného akumulacním systémem I_{ESS} . Kanál 2 (světle modrý) vykresluje průběh proudu trakčního měniče I_{TM} . Kanál 3 (fialový) ukazuje mechanickou frekvenci soustrojí f_{mech} (10 Hz/div), kde 25 Hz odpovídá rychlosti 50 km/h. Proud tekoucí superkondenzátorem I_{SC} je zobrazen na kanálu 4.

Z velikosti proudu I_{TM} během jízdy plnou rychlostí je patrný vliv sklonu, který je odvozen z reálné linky č. 4.

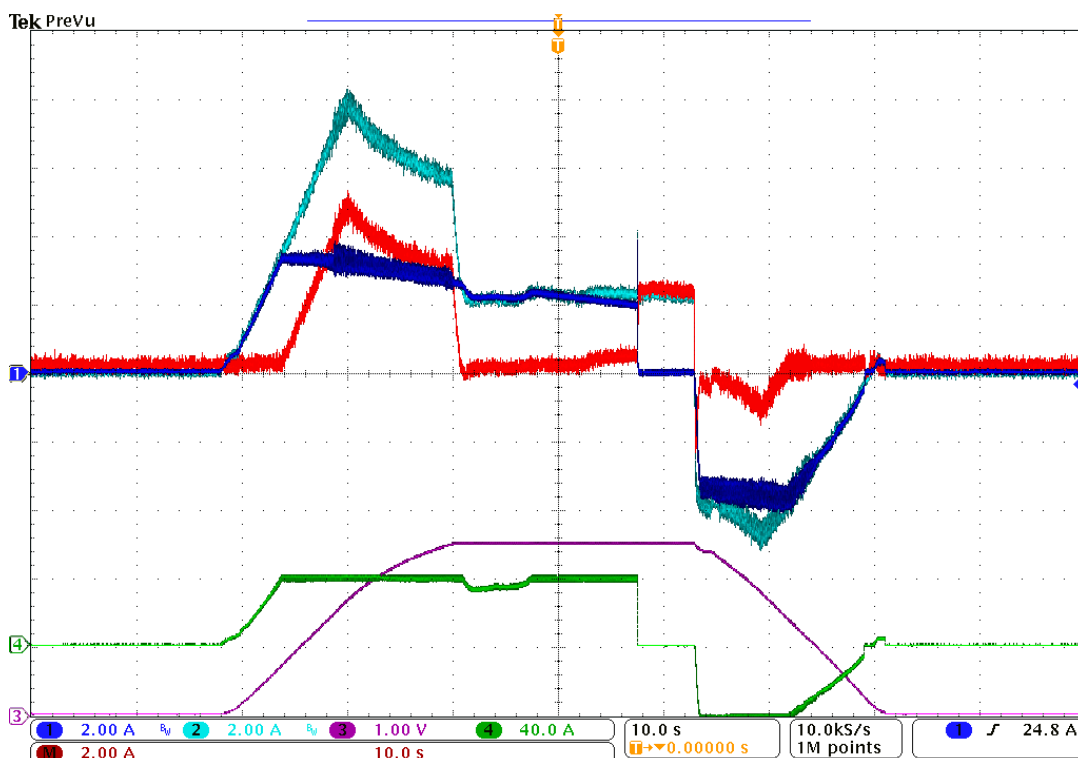


Obr. 68 Emulace tramvaje na lince č. 4 pomocí fyzikálního modelu

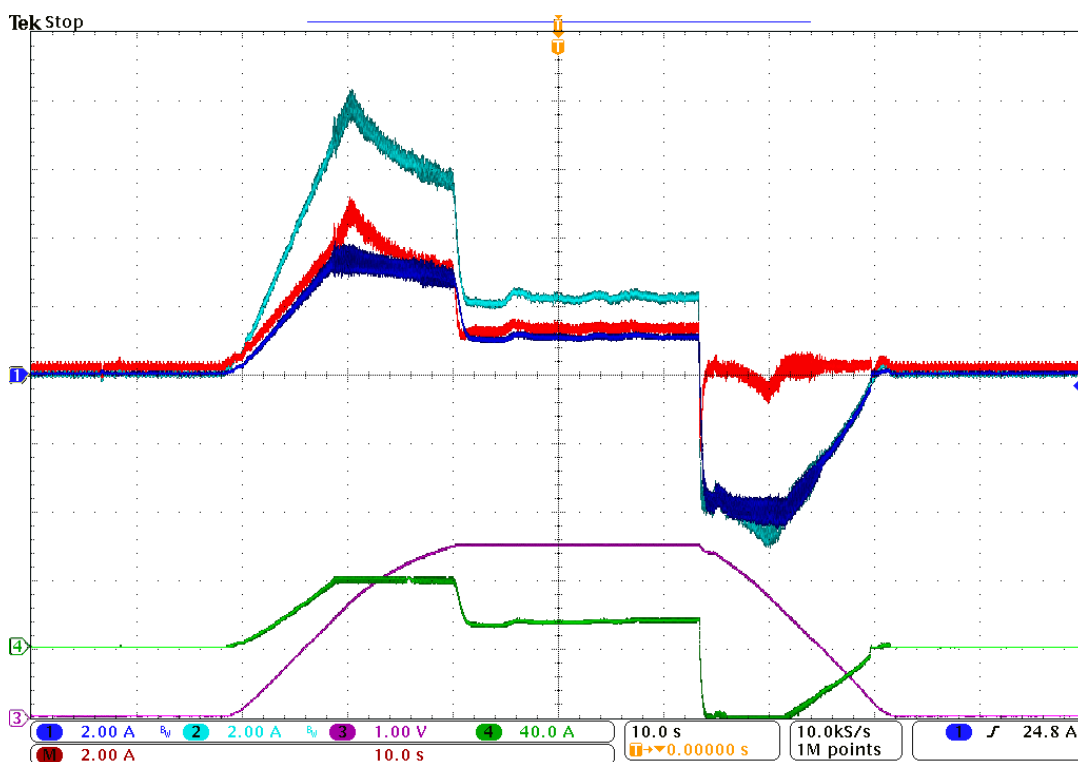
Na následujících oscilogramech na Obr. 69 až Obr. 73 je předveden princip vybraných strategií. Všechny oscilogramy zobrazují stejné výše zmíněné veličiny a kanál M, který zobrazuje průběh proudu odebíraného z troleje I_{TR} . Tento proud je osciloskopem vypočten jako rozdíl $I_{TM} - I_{ESS}$.

6.7.1 Proporcionální řízení

Na oscilogramech na Obr. 69 a Obr. 70 lze pozorovat funkci proporcionální strategie pro dvě hodnoty konstanty k_{prop} 1 a 0,5. Dokud není výkon ESS omezen maximálním proudem I_{SC} (v tomto případě maximálním proudem měniče) dodává ESS plný resp. poloviční proud trakčního měniče I_{TM} . Tímto je zajištěn nulový resp. poloviční odebíraný výkon z troleje I_{TR} (při uvažování konstantního napětí na filtračním kondenzátoru U_F). Před brzděním dochází k blokování ESS vlivem vybití SC pod hladinu U_{SCMIN} . Při brzdě se ESS snaží akumulovat plný brzdový výkon.



Obr. 69 Proporcionální strategie, $k_{prop} = 1$



Obr. 70 Proporcionální strategie, $k_{prop} = 0,5$

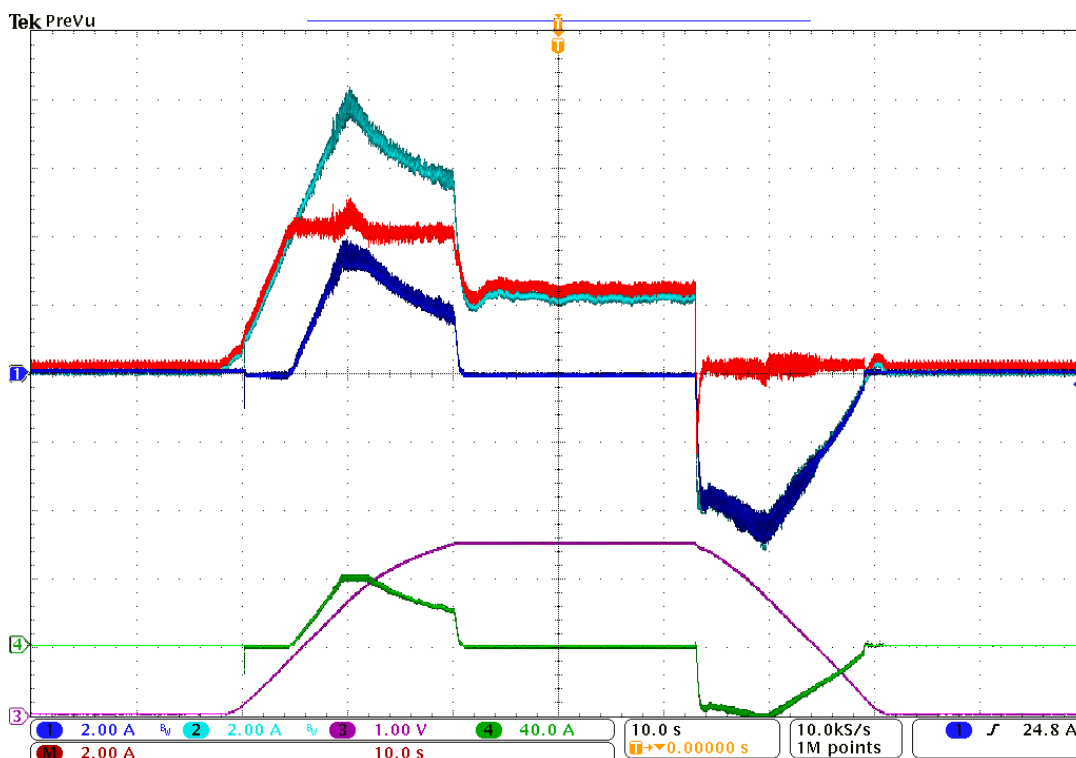
6.7.2 Omezení špičkových odběrů

Následující dva oscilogramy na Obr. 71 a Obr. 72 zobrazují průběh veličin při použití strategie *Omezení špičkových odběrů*. Jako špičkový odběr I_{TRMAX} jsou považovány dvě hodnoty 4 a 2 A. Což při uvažování konstantního napětí $U_F = 450$ V odpovídá výkonům 1,8 kW a 0,9 kW.

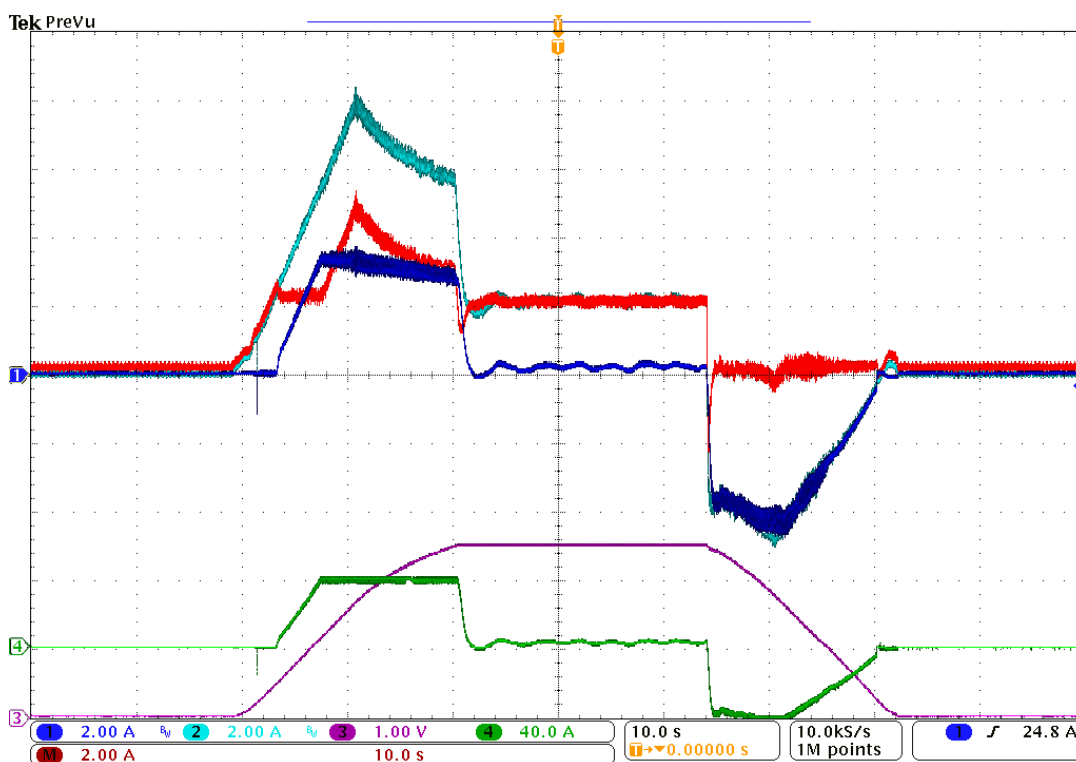
Rozjezd je hrazen pouze z troleje, dokud hodnota odebíraného proudu nedosáhne hodnoty nastaveného špičkového odběru (4 nebo 2 A). Část odebíraného proudu I_{TM} , která přesáhla hodnotu I_{TRMAX} , je hrazena akumulacním systémem.

V případě, kdy je nastaven $I_{TRMAX} = 4$ A, je ESS schopen hradit odběr téměř úplně. Výjimkou je pouze krátký okamžik, kdy je ESS omezen maximální hodnotou I_{SC} . Jízda konstantní rychlostí vyžaduje nižší odběr proudu než I_{TRMAX} a ESS jej tedy nehradí. V okamžiku brzdění je veškerý brzdňý výkon akumulován.

V případě $I_{TRMAX} = 2$ A je krátce po rozjezdu výkon ESS omezen vlivem I_{SCMAX} . ESS tedy není schopen omezit odebíraný proud na požadovanou hodnotu I_{TRMAX} . ESS dodává nepatrný proud i v průběhu jízdy konstantní rychlostí, protože odběr I_{TM} je srovnatelný s požadovaným proudem I_{TRMAX} . Při brzdění je veškerá energie opět akumulována.



Obr. 71 Omezení špičkových odběrů, $I_{TRMAX} = 4 \text{ A}$

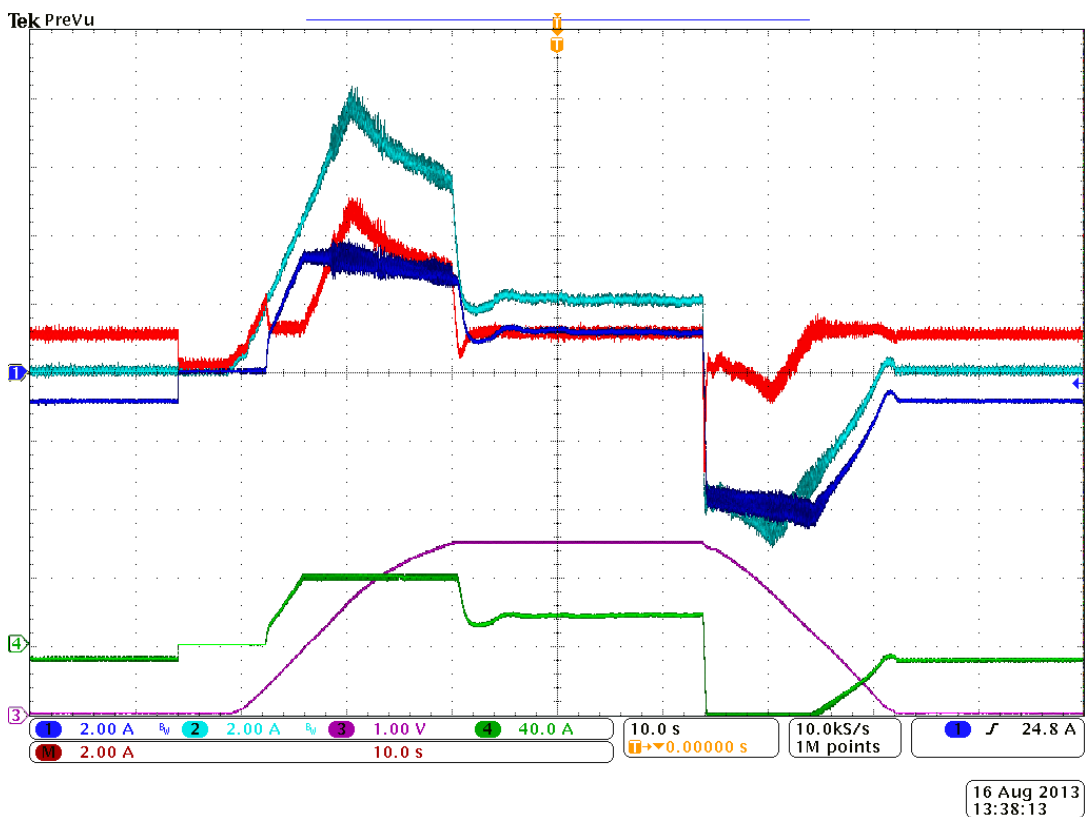


Obr. 72 Omezení špičkových odběrů, $I_{TRMAX} = 2 \text{ A}$

6.7.3 Střední hodnota odebíraného výkonu

Princip strategie *Střední hodnota odebíraného výkonu* je patrný z oscilogramu na Obr. 73. Snahou ESS je v tomto případě neustálý, pokud možno konstantní odběr z troleje. Pro dosažení konstantního odběru je však zapotřebí velká kapacita ESS, která je z ekonomických důvodů nevýhodná.

Před rozjezdem je patrné dobíjení středním výkonem (za předpokladu konstantního napětí $U_F = 450$ V), dokud ESS nedosáhne maximálního nabití (U_{SCMAX}). Proto je těsně před rozjezdem dobíjení ESS blokováno. První část rozjezdu je hrazena z troleje, protože hodnota odběru je nižší než střední hodnota. V okamžiku, kdy je odběr vyšší snaží se ESS hradit rozdíl, aby byla z troleje opět odebírána střední hodnota. Tato strategie se tedy snaží odebírat z troleje střední hodnotu i při brzdění, pokud však není ESS omezen maximálním proudem I_{SC} .



Obr. 73 Střední hodnota odebíraného výkonu, $P_{AVG} = 450$ W ($I_{AVG} = 1$ A)

7 Závěr

Tato disertační práce se zabývá popisem nalezené strategie řízení akumulčního systému, která byla vyvinuta a testována pomocí matematického pravděpodobnostního modelu reálné linky. Pro možnost porovnání byly testovány i jiné strategie publikované v odborné literatuře. Jejich výsledné srovnání je uvedeno v Tab. 20. Konkrétní hodnoty všech vypočtených energií pro všechny strategie jsou uvedeny v příloze 1 a 2 (popis veličin byl vysvětlen v úvodu kapitoly 6). Konečné dvě varianty velikosti akumulčního systému se skládaly z 3 a 4 SC modulů. Tento počet byl vybrán s ohledem na finanční realizovatelnost. Vyšší počet SC modulů již nemůže být z finančního hlediska výhodný, jak bude vysvětleno pomocí následujících grafů návratnosti investice. Strategie uváděné v tabulce jsou vhodně nastaveny pro daný počet SC modulů (3 nebo 4) a pro neomezenou rekuperaci (neomezená rekuperace je totiž nejbližší k reálné situaci). Z tabulky úspor je patrné, že díky velké rekuperované energii na lince č. 4 (sloupec 100 %), nelze ušetřit významné množství energie. Některé strategie dokonce mohou ztráty zvýšit. Předkládaná strategie *Určení hladiny SC dle trati* dokáže ušetřit největší množství energie, a to ve všech případech.

Tab. 20 Porovnání úspor energie jednotlivých strategií

Počet SC modulů	3 SC moduly			4 SC moduly		
	0%	50%	100%	0%	50%	100%
Rekuperace	12,5%	6,9%	0,4%	14,0%	7,9%	0,7%
Proporcionální	12,5%	6,9%	0,4%	14,0%	7,9%	0,7%
Omezení špičkových odběrů	6,3%	3,8%	1,0%	6,6%	4,0%	1,2%
Střední výkon	10,4%	5,3%	-0,6%	12,9%	6,6%	-0,7%
Střední výkon s predikcí	9,4%	4,9%	-0,5%	9,1%	4,3%	-1,5%
Určení hladiny SC dle trati	13,8%	12,3%	6,4%	15,6%	14,1%	6,7%

Pro realizaci projektu vybavení tramvajím akumulčním systémem je jistě zapotřebí provést finanční rozvahu. Tato rozvaha by měla vzít v potaz všechny nutné investice a na základě množství ušetřené energie a její ceny

zhodnotit návratnost. Grafické znázornění návratnosti investice je uvedeno na Obr. 74, Obr. 75 a Obr. 76 opět pro tři varianty rekuperace.

Jedním z důležitých parametrů pro odhad návratnosti investice do akumulčního systému je nepochybně cena elektrické energie, kterou má smluvně sjednanou dopravní podnik s dodavatelem. V následující tabulce Tab. 21 jsou uvedeny veřejně dostupné ceny různých českých dopravních podniků. Jedná se o zveřejněné ceny silové elektřiny, což je jedna ze složek konečné ceny. Tyto ceny jsou uvedeny v [55-59]. Další složkou ceny elektrické energie je regulovaná část, kterou určuje Energetický regulační úřad. Tato část se skládá z poplatku za distribuci a systémové služby, z příspěvku na podporu obnovitelných zdrojů a z poplatku za činnost zúčtování operátora trhu. Dále je k ceně přičtena daň z elektřiny a DPH. Celková konečná cena se pohybuje na hranici 2 Kč za kWh. Pro výpočet je proto použita cena 2 Kč.

Tab. 21 Ceny silové elektrické energie pro dopravní podniky

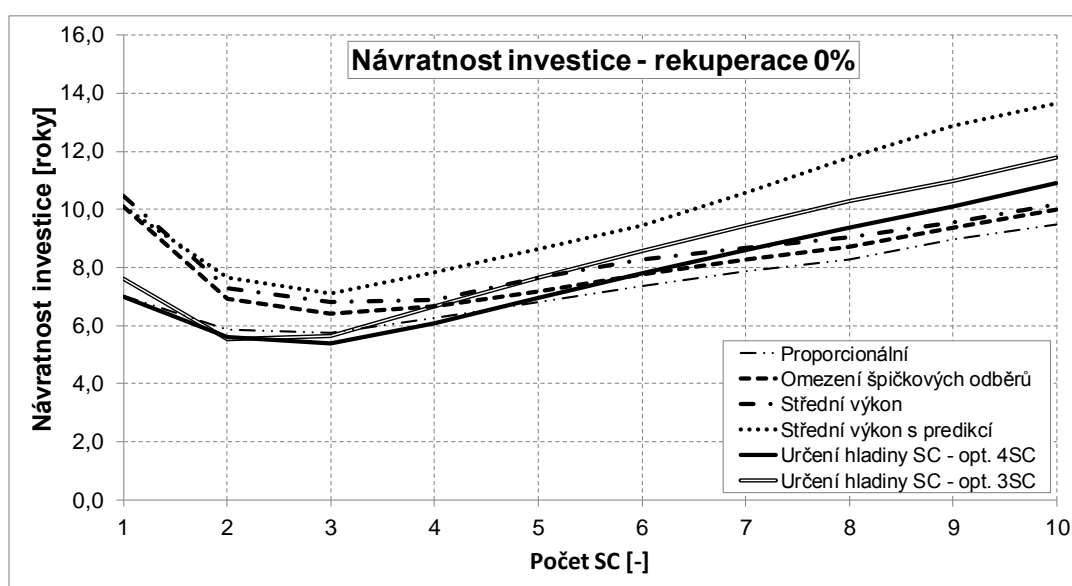
Dopravní podnik	Cena za MWh [Kč]	pro rok
DP města Hradce Králové, a.s.	1099	2014
DP měst Liberce a Jablonce nad Nisou, a. s.	1000	2014
DP města Pardubic, a.s.	1100	2014
DP města Olomouce, a.s.	1320	2013
DP města Ústí nad Labem, a.s.	1468	2011

Pro výpočet investice je nutné odhadnout ceny jednotlivých komponent. Cena jednoho SC modulu, platná v červenci 2013, je 133 500 Kč. Měnič akumulčního systému, včetně zástavby byl ohodnocen na 200 000 Kč. Dalším důležitým parametrem je využitost tramvaje s akumulčním systémem, která byla dle grafikonu stanovena na 20 cyklů denně, 365 dní v roce.

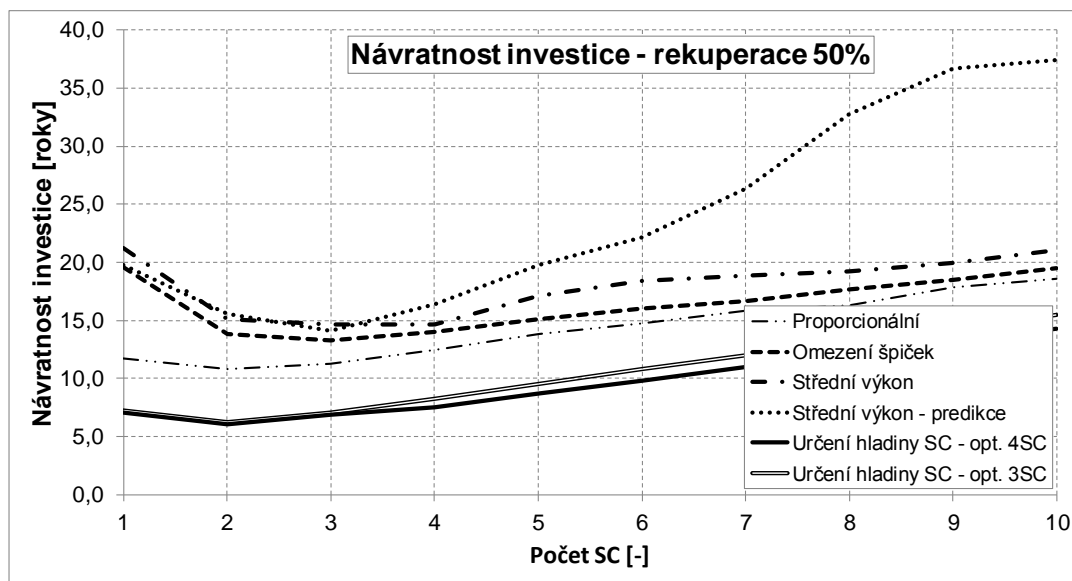
Následující grafy vykreslují návratnost investice jednotlivých strategií v závislosti na počtu použitých SC modulů. Nastavení parametrů strategií vychází z nejlepšího výsledku pro neomezenou rekuperaci a daný počet SC modulů. U strategie *Určení hladiny SC dle trati* byly testovány dvě varianty

optimalizace, a to pro 3 a 4 SC moduly. Optimalizace byly také prováděny při neomezené rekuperaci.

Z grafu pro nulovou rekuperaci (Obr. 74) je patrné, že by se investice do dvou nebo tří SC modulů mohla za daných podmínek vrátit do šesti let. Bohužel pouze na tratích, kde rekuperace nenastává. Při pohledu na rekuperaci 50 % (Obr. 75) je již patrnější rozdíl mezi jednotlivými strategiemi. Návratnost investice vychází nejlépe při použití pouze dvou SC modulů.

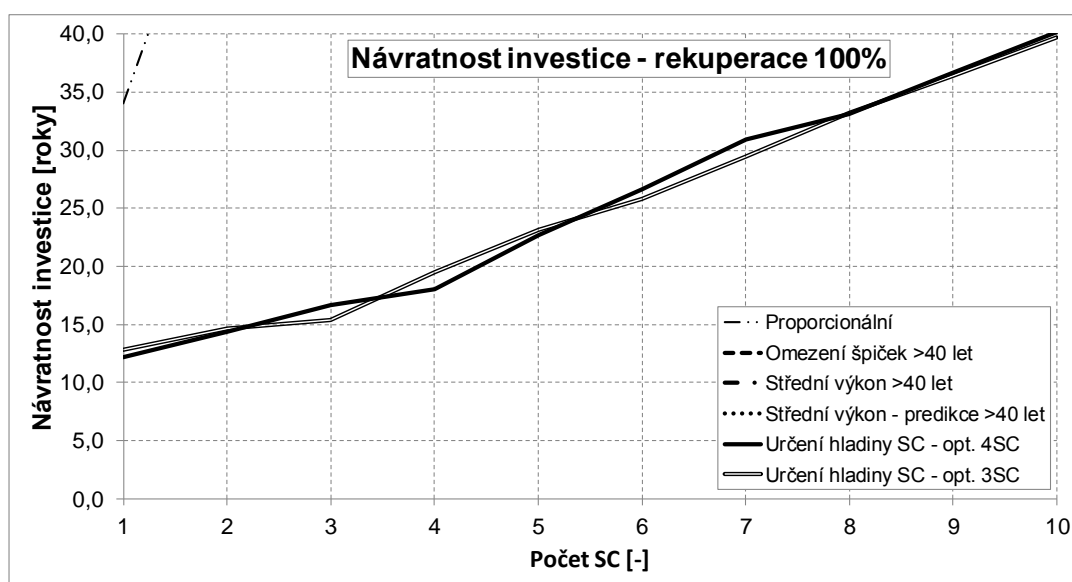


Obr. 74 Návratnost investice strategií při rekuperaci 0 %



Obr. 75 Návratnost investice strategií při rekuperaci 50 %

V posledním grafu pro neomezenou rekuperaci, která nejvíce odpovídá lince č. 4, je zřejmá nevýhodnost některých strategií. Jejich doba návratnosti investice je mnohonásobně vyšší, než je životnost technologie. K hranici životnosti technologie se blíží pouze návratnost investice předkládané strategie *Určení hladiny SC dle trati*, která byla vyvinuta právě za účelem ušetření malé energie, která je k dispozici na lince s velkým podílem rekuperace.



Obr. 76 Návratnost investice pro jednotlivé strategie při neomezené rekuperaci

Vypočtené návratnosti investic ukázaly, že použití akumulčního systému je výhodné pouze pro tratě s nižším podílem rekuperované energie. Výsledky pro neomezenou rekuperaci vyšly za hranicí životnosti i přesto, že parametry výpočtu návratnosti investice byly v rámci možností voleny ve prospěch nasazení systému. Nasazení systému pro linku č. 4 zřejmě nenajde opodstatnění. Simulace totiž ukázaly, že ztráty ve vedení mohou být srovnatelné se ztrátami v akumulčním systému. Návrh akumulčního systému je silně závislý na specifikách konkrétní linky a je proto důležité navrhnout velikost i strategii akumulčního systému na míru.

Jiná situace nastává v případě výstavby nové linky, kde je předpokládáno využití akumulce energie na všech tramvajích. Pak je možno snížit nároky na dimenzování napájecího řetězce. Akumulční systém umožní snížení špičkových odběrů, a proto lze napájecí řetězec dimenzovat na menší výkony. Díky tomu může být snížen i celkový počet měníren. Toto bude mít pozitivní vliv nejen na snížení pořizovacích nákladů, ale i na snížení části ceny energie, která zohledňuje připojení do distribuční sítě s požadovaným výkonem. V případě stávající linky by nasazení tramvaj s akumulčním systémem umožnilo navýšení počtu tramvaj nebo prodloužení linky bez nutnosti provedení zásadních změn v napájecím řetězci.

7.1 Hlavní přínosy práce

Prvním hlavním přínosem práce je zhotovení matematického pravděpodobnostního modelu tramvaje jedoucí na konkrétní lince včetně metodiky pro jeho vytvoření. Tento model umožňuje, na rozdíl od analytických výpočtů energetické bilance, simulaci průběhů klíčových veličin, což je nezbytné pro vývoj sofistikovaných dopravních systémů. Model může být upraven i pro jiné linky, ať už stávající či nové.

Druhým hlavním přínosem je představení vyvinuté strategie umožňující přizpůsobení dané trati díky predikci. Práce popisuje princip

strategie a uvádí i možnost optimalizace jejích parametrů. Dle daného postupu lze nastavit danou strategii i na jiné linky.

Dalším důležitým přínosem je porovnání stávajících strategií řízení akumulčních systémů na konkrétní lince. Důležitým závěrem z jejich porovnání je zjištění, že některé strategie nejsou vhodné na linky s velkým podílem rekuperace.

7.2 Perspektivní směry dalšího výzkumu

Předkládaná prediktivní strategie může být obohacena o adaptaci Takagi-Sugeno fuzzy regulátoru v bloku *Akutní požadavek* (popsaném v kapitole 6.5.2), který umožní naladění strategie dle časově proměnných veličin. Tramvaj by se byla schopna přizpůsobit na danou linku a vhodně by dokázala využívat akumulční systém v různou denní dobu, den v roce a roční období. Tramvaj by byla schopna se přizpůsobit i na případné změny linky, protože by se neustále „učila“.

Mezi perspektivní oblasti v dané problematice může patřit i vývoj inteligentních strategií řízení akumulčního systému tramvaje, který bude minimalizovat ztráty v troleji za pomoci vyhodnocení pravděpodobných míst odběru nebo dodávky energie. V případě, že by byl aplikován systém sběru a distribuce dat z jednotlivých tramvajů, který by informoval o aktuálních polohách a odběrech jednotlivých tramvajů, bylo by možné upravit regulační zásahy systému akumulace tak, aby vyhověl aktuálním poměrům v troleji. Tento způsob by mohl přinést další úspory oproti metodě vyhodnocování pravděpodobných míst odběrů nebo dodávek energie. Dopravní infrastruktura města vybavená tímto komunikačním systémem může být začleněna do „Smart Grid“, kde poslouží jako říditelný zdroj krátkodobě vysokého výkonu v případě potřeby stabilizace napájecí sítě.

Dalším perspektivním směrem může být vývoj strategie, která kombinuje úspory energie se stabilizací napájecího napětí. Tato strategie by se skládala z několika zmiňovaných principů a byla by vhodně přepínána dle polohy na lince. Tramvaj by šetřila energii a v problémových místech by automaticky mohla vytvářet podporu napájení. Z ekonomického hlediska je výhodnější udržet napájení v provozu, než ušetření malého množství energie.

8 Literatura

- [1] STEINER, Michael; SCHOLTEN, Johannes. Energy storage on board of railway vehicles. In: *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*. IEEE. p. 10 pp.-P. 10.
- [2] OKUI, A., et al. Application of energy storage system for railway transportation in Japan. In: *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*. IEEE, 2010. p. 3117-3123.
- [3] STEINER, Michael; SCHOLTEN, Johannes. Energy storage on board of DC fed railway vehicles PESC 2004 Conference in Aachen, Germany. In: *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*. IEEE, 2004. p. 666-671.
- [4] STEINER, Michael; KLOHR, Markus; PAGIELA, Stanislaus. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles. In: *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*. IEEE, 2007. p. 1-10.
- [5] DESTRAZ, B., et al. Study and simulation of the energy balance of an urban transportation network. In: *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*. IEEE, 2007. p. 1-10.
- [6] BARRERO, R.; TACKOEN, X.; VAN MIERLO, J. Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles. In: *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*. IEEE, 2008. p. 1512-1517.
- [7] BARRERO, Ricardo; MIERLO, J.; TACKOEN, Xavier. Energy savings in public transport. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, 2008, 3.3: 26-36.
- [8] DEWEI, Wang, et al. Power distribution control strategy of on-board supercapacitor energy storage system of railway vehicle. In: *Materials for Renewable Energy & Environment (ICMREE), 2011 International Conference on*. IEEE, 2011. p. 664-668.
- [9] SZENASY, Istvan. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. In: *Vehicle Power and*

- Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE. IEEE, 2009. p. 181-187.*
- [10] RUFER, Alfred, et al. Sequential supply for electrical transportation vehicles: Properties of the fast energy transfer between supercapacitive tanks. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 2004, 13.04: 941-955.
- [11] ALLEGRE, A.-L., et al. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2010, 57.12: 4001-4012.
- [12] BOUSCAYROL, A., et al. Experimental set-up to test the power transfer of an innovative subway using supercapacitors. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE. IEEE, 2010. p. 1-6.*
- [13] ALLEGRE, A.-L., et al. Reduced-scale-power hardware-in-the-loop simulation of an innovative subway. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2010, 57.4: 1175-1185.
- [14] GOIA, Catalin, et al. Supercapacitors used as an energy source to drive the short urban electric vehicles. In: *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2011 7th International Symposium on. IEEE, 2011. p. 1-6.*
- [15] MOSKOWITZ, J.-P.; COHUAU, J.-L. STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE. IEEE, 2010. p. 1-5.*
- [16] MIYATAKE, Masafumi; HAGA, Hiroto; SUZUKI, Satoshi. Optimal speed control of a train with on-board energy storage for minimum energy consumption in catenary free operation. In: *Power Electronics and Applications, 2009. EPE'09. 13th European Conference on. IEEE, 2009. p. 1-9.*
- [17] MIYATAKE, Masafumi; MATSUDA, Kunihiko. Optimal speed and charge/discharge control of a train with onboard energy storage devices for minimum energy operation. In: *Power Electronics,*

- Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on. IEEE, 2008. p. 1211-1216.*
- [18] MIYATAKE, Masafumi; HAGA, Hiroto. Optimization of speed profile and quick charging of a catenary free train with on-board energy storage. In: *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2010. IEEE, 2010. p. 1-6.*
- [19] CICCARELLI, Flavio; IANNUZZI, Diego; TRICOLI, Pietro. Speed-based supercapacitor state of charge tracker for light railway vehicles. In: *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on. IEEE, 2011. p. 1-12.*
- [20] IANNUZZI, Diego. Improvement of the energy recovery of traction electrical drives using supercapacitors. In: *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th. IEEE, 2008. p. 1469-1474.*
- [21] OGASA, M.; TAGUCHI, Y. Power electronics technologies for a lithium ion battery tram. In: *Power Conversion Conference-Nagoya, 2007. PCC'07. IEEE, 2007. p. 1369-1375.*
- [22] BARRERO, Ricardo; TACKOEN, Xavier; VAN MIERLO, Joeri. Quasi-static simulation method for evaluation of energy consumption in hybrid light rail vehicles. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE. IEEE, 2008. p. 1-7.*
- [23] BARRERO, Ricardo; TACKOEN, Xavier; VAN MIERLO, Joeri. Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE. IEEE, 2008. p. 1-8.*
- [24] D'AVANZO, S., et al. A sample application of supercapacitor storage systems for suburban transit. In: *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2010. IEEE, 2010. p. 1-7.*
- [25] LEE, Hanmin, et al. A study on energy storage system for Gold Line of LA Metro. In: *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009. IEEE, 2009. p. 1-4.*

- [26] KIM, Gildong; LEE, Hanmin. A Study on the Application of ESS on SeoulMetro Line 2. In: *Information and Multimedia Technology, 2009. ICIMT'09. International Conference on*. IEEE, 2009. p. 38-42.
- [27] LEE, Hanmin. A study on ESS installation Order for SeoulMetro lines. In: *Circuits and Systems (MWSCAS), 2011 IEEE 54th International Midwest Symposium on*. IEEE, 2011. p. 1-3.
- [28] LEE, Hanmin, et al. A study on the effects of energy storage system. In: *Information and Multimedia Technology, 2009. ICIMT'09. International Conference on*. IEEE, 2009. p. 28-32.
- [29] BRENNAN, M., et al. Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems. In: *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07. International Conference on*. IEEE, 2007. p. 69-73.
- [30] Capacitors | Energy without Carbon. ANTHROPOSANE. *Welcome | Energy without Carbon* [online]. 2013 [cit. 2013-8-15]. Dostupné z: <http://www.energy-without-carbon.org/Capacitors>
- [31] DU, Lingling. Study on supercapacitor equivalent circuit model for power electronics applications. In: *Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), 2009 2nd International Conference on*. IEEE, 2009. p. 51-54.
- [32] HAMMAR, A., et al. Study of accelerated aging of supercapacitors for transport applications. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2010, 57.12: 3972-3979.
- [33] MEINERT, Michael. New mobile energy storage system for rolling stock. In: *Power Electronics and Applications, 2009. EPE'09. 13th European Conference on*. IEEE, 2009. p. 1-10.
- [34] CEJNAR, Pavel. *Komplexní model přenosu výkonu na nezávislém vozidle s asynchronními trakčními motory*. Praha, 2008. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] CHYMER, Martyn, et al. Simplified Power Converter for Integrated Traction Energy Storage. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2011, 60.4: 1374-1383.
- [38] ZEMAN, Karel; PEROUTKA, Zdeněk; JANDA, Martin. *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*. Západočeská univerzita, 2004.
- [39] ŠKUBAL, Jaroslav. ŠKODA TRANSPORTATION. *Protokol: Měření spotřeby elektrické energie tramvaje LTM 10.08*. Plzeň, 1998.
- [40] Astra. SKD PRAHA, spol. s r. o. SKD [online]. [cit. 2013-8-15]. Dostupné z: <http://www.skd.cz/astra/prehled.php>
- [41] Databáze nivelačních bodů. ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD. *Odbor geodetických základů* [online]. [cit. 2013-8-15]. Dostupné z: <http://bodovapole.cuzk.cz/>
- [42] CRR - Mapový server [online]. [cit. 2013-8-15]. Dostupné z: <http://mapy.crr.cz>
- [43] ELSTNER, Vlastislav. *Energetická bilance v elektrické trakci*. Plzeň, 2012. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [44] JANSÁ, František. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Nadas, 1980.
- [45] DRÁBEK, Jiří. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. ALFA-vydavatelství technické a ekonomické, 1981.
- [46] BEDNAŘÍK, Jaroslav. *Výpočet energetické dostatečnosti napájení tratí DPMB*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.
- [47] MAI, Jaroslav. *Obecný program pro energetické výpočty napájení tratí DPMB*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v

Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.

- [48] MAXWELL TECHNOLOGIES. *BMOD0063 P125: 125V Modules Datasheet*. Dostupné z:
<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/products/125v-trans-modules>
- [49] MAXWELL TECHNOLOGIES. *BMOD0063 P125: 125V Modules Manual*. Dostupné z:
<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/products/125v-trans-modules>
- [50] AL SAKKA, Monzer, et al. *Batteries and Supercapacitors for Electric Vehicles*. 2012.
- [51] 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.
- [52] TAKAGI, Tomohiro; SUGENO, Michio. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 1985, 1: 116-132.
- [53] TALLA, Jakub. *Estimace vybraných veličin elektrických pohonů a aktivních filtrů*. Plzeň, 2012. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky.
- [54] OVASKA, Seppo J.; VAINIO, Olli. Evolutionary-programming-based optimization of reduced-rank adaptive filters for reference generation in active power filters. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2004, 51.4: 910-916.
- [55] DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA HRADCE KRÁLOVÉ, a. s. *Závěrkový list*. Dostupné z:
https://ezak.mmhk.cz/document_642/11952137cb215a40-Dopravn%C3%AD%20podnik%20mHK.pdf

- [56] Dopravní podnik šetří opakovanými nákupy silové elektřiny na energetické burze - Statutární město Liberec. *Internet města Liberce - Statutární město Liberec* [online]. [cit. 2013-8-15]. Dostupné z: <http://www.liberec.cz/cz/aktuality/zpravy-z-mesta/dopravni-podnik-setri-opakovanymi-nakupy-silove-elektriny-energeticke-burze.html>
- [57] MHD Olomouc - Dopravní podnik ušetří na energii. *MHD Olomouc* [online]. [cit. 2013-8-15]. Dostupné z: <http://www.mhd-olomouc.cz/articles/dopravni-podnik-usetri-na-energii>
- [58] Dopravní podnik ušetřil miliony za elektřinu - Pardubický deník. *Pardubický deník* [online]. [cit. 2013-8-15]. Dostupné z: http://pardubicky.denik.cz/zpravy_region/dopravni-podnik-usetril-miliony-za-elektřinu-20130528.html
- [59] Statutární město Ústí nad Labem: Dotaz Český rozhlas SEVER, 18.10.: Gabriela Hauptfogelová. *Statutární město Ústí nad Labem: Statutární město Ústí nad Labem* [online]. [cit. 2013-8-15]. Dostupné z: <http://www.usti-nad-labem.cz/cz/seznamy-zprav/dotazy-novinaru/dotaz-cesky-rozhlas-sever-18-10-gabriela-hauptfogelova.html>

9 Seznam autorových publikací

Publikace v časopise

- [A1] DRÁBEK, Pavel; STREIT, Luboš. The Energy Storage System for Light Trails Applications Based on the Supercapacitors. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 284: 1141-1145.

Kapitola v knize

- [A2] DRÁBEK, Pavel, Luboš STREIT a Vojtěch BLAHNÍK. *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids: Practical Application of Electrical Energy Storage System in Industry*. Croatia: Intech, Rijeka, Croatia, 2011, s. 379-400. ISBN 978-953-307-269-2.

Seznam autorových publikací prezentovaných na mezinárodních konferencích (chronologicky)

- [A3] STREIT, L., ŠTĚPÁNEK, J., ELIS, L., BEDNÁŘ, B. Electric Kart as a Student Project. In *EPE 13 ECCE Europe. New York: IEEE*, 2013. s. "P.1"- "P.6". ISBN: 978-90-75815-17-7
- [A4] JANÍK, D., KOŠAN, T., ZEMAN, M., STREIT, L., PEROUTKA, Z. Active Voltage Balancing Control with Phase Disposition PWM for 4-level Flying Capacitor Converter. In *EPE 13 ECCE Europe. New York: IEEE*, 2013. s. "P.1"- "P.8". ISBN: 978-90-75815-17-7
- [A5] STREIT, L., DRÁBEK, D. Simulation Model of Tram with Energy Storage System. In *2013 International Conference on Applied Electronics. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni*, 2013. s. 287-290. ISBN: 978-80-261-0166-6 , ISSN: 1803-7232

- [A6] BEDNÁŘ, B., STREIT, L., KOŠAN, T. Diagnostic tool for Lithium and Lead-Acid Battery. In *4th International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact*. New York: IEEE, 2013. s. 84-86. ISBN: 978-1-4673-4430-2
- [A7] STREIT, L., DRÁBEK, P. Simulation and Emulation of Tram with on-board Supercapacitors on Pilsen Tram Line. In *4th International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact*. New York: IEEE, 2013. s. 769-772. ISBN: 978-1-4673-4430-2
- [A8] ŠTĚPÁNEK, J., BEDNÁŘ, B., STREIT, L., ELIS, L. Electric Kart "FeLis" with LiFeYPO₄ Batteries. In *4th International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact*. New York: IEEE, 2013. s. 151-154. ISBN: 978-1-4673-4430-2
- [A9] DRÁBEK, P., STREIT, L. The Energy Storage System for Light Trails Applications Based on the Supercapacitors. In *ICETI : proceedings of the International Conference on Engineering and Technology Innovation 2012*. TAETI, 2012. s. 61.
- [A10] KOŠAN, T., MOLNÁR, J., STREIT, L., POLÁČEK, L., PEROUTKA, Z. Complete Design of Down-Scale Prototype of Mining Machine Converter based on Four-Level Voltage-Source Converter with Flying Capacitors. In *EPE PEMC 2012 ECCE Europe - 15th International Power Electronics and Motion Conference and Exposition*. New York: IEEE, 2012. s. DS2b.4-1 - DS2b.4-6. ISBN: 978-1-4673-1971-3
- [A11] STREIT, L., DRÁBEK, P. Energy Efficiency of Tram Emulation with Energy Storage System. In *EPE PEMC 2012 ECCE Europe - 15th International Power Electronics and Motion Conference and Exposition*. New York: IEEE, 2012. s. DS1e.6-1-DS1e.6-3. ISBN: 978-1-4673-1971-3
- [A12] STREIT, L., ŠTĚPÁNEK, J., BEDNÁŘ, B., KUBÍK, M., ELIS, L. Electric Kart with LiFeYPO₄ Batteries. In *2012 International Conference on Applied Electronics*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 305-308. ISBN: 978-80-261-0038-6 , ISSN: 1803-7232

- [A13] DRÁBEK, P., STREIT, L. The Energy Storage System for Light Traction based on the Supercapacitors. In *SPEEDAM 2012. Sorrento: University of Naples*, 2012. s. 1496-1500. ISBN: 978-1-4673-1300-1
- [A14] STREIT, L., KUBÍK, M., HOLEČEK, J., HOŘAN, M. Concept of Electric Kart with LiFeYPO₄ Batteries. In *2011 International Conference on Applied Electronics. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni*, 2011. s. 389-392. ISBN: 978-80-7043-987-6 , ISSN: 1803-7232
- [A15] DRÁBEK, P., STREIT, L. Power Electronics in the Energy Storage Systems for Public Transport. In *LVEM 2011 proceeding. Brno: VUT Brno, FEKT*, 2011. s. 1-5. ISBN: 978-80-214-4362-4
- [A16] DRÁBEK, P., STREIT, L. The Energy Storage System based on the Supercapacitors. In *IEEE ISIE proceedings. Gdansk, Polsko: Polytechnika Gdansk*, 2011. s. 1-5. ISBN: 978-1-4244-9311-1
- [A17] STREIT, L., DRÁBEK, P., LOS, M. The Energy Storage System with Supercapacitor. In *2010 14th International Power Electronics and Motion Control Conference. New York: IEEE*, 2010. s. T9-39 - T9-43. ISBN: 978-1-4244-7856-9
- [A18] SKALA, B., LOS, M., STREIT, L. Generator driven by manpower : generation of electricity is drudgery. In *Low Voltage Electrical Machines. Brno: BUT*, 2009. s. 31-32. ISBN: 978-80-214-3975-7
- [A19] DRÁBEK, P., STREIT, L. The Energy storage System for Public Transport Vehicles. In *EPE 2009. New York: IEEE*, 2009. s. 5658-5667. ISBN: 978-1-4244-4432-8
- [A20] DRÁBEK, P., STREIT, L. The energy storage system with superapacitor for public transport. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway: IEEE*, 2009. s. 1826-1830. ISBN: 978-1-4244-2601-0

Seznam autorových publikací prezentovaných na českých konferencích (chronologicky)

- [A21] STREIT, L., DRÁBEK, P., KOŠAN, T. Simulace tramvaje se systémem akumulace energie. In *Elektrické pohony. Praha: Česká elektrotechnická společnost, ÚOS Elektrické pohony*, 2013. s. 1-8. ISBN: 978-80-02-02457-6
- [A22] STREIT, L., ZAVŘEL, M., MAJORSZKÝ, J. Jednofázový střídač pro Teslův transformátor. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni*, 2012. s. 123-124. ISBN: 978-80-261-0119-2
- [A23] STREIT, L. Měření energetické účinnosti modelu tramvaje s akumulačním systémem. In *Elektrotechnika a informatika 2011. Část druhá. Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita*, 2011. s. 97-98. ISBN: 978-80-261-0015-7
- [A24] STREIT, L. Stavba výkonového pulzního MOSFETového měniče. In *Elektrické pohony. Praha: Česká elektrotechnická společnost, ÚOS Elektrické pohony*, 2011. s. 1-4. ISBN: 978-80-02-02308-1
- [A25] STREIT, L. Přípravek pro měření vlastností akumulátorů. In *Elektrotechnika a informatika 2010. Část druhá. Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita*, 2010., ISBN: 978-80-7043-914-2
- [A26] STREIT, L., DRÁBEK, P. Experimentální konstrukce vysokonapětového 1f maticového měniče. In *Elektrické pohony. Praha: Český svaz vědeckotechnických společností*, 2009. s. 1-7. ISBN: 978-80-02-02151-3
- [A27] STREIT, L., DRÁBEK, P. Problematika akumulace elektrické energie vozidel lehké trakce. In *Elektrické pohony. Praha: Český svaz vědeckotechnických společností*, 2009. s. 1-6. ISBN: 978-80-02-02151-3
- [A28] STREIT, L. Prototyp systému akumulace energie trakčního vozidla. In *Elektrotechnika a informatika 2009. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita*, 2009. s. 113-116. ISBN: 978-80-7043-809-1

- [A29] STREIT, L. Systém akumulace energie trakčního vozidla. In *Elektrotechnika a informatika 2008. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008.* s. 101-102. ISBN: 978-80-7043-701-8
- [A30] LOS, M., STREIT, L., CÉDL, M. Řízení přímého měniče kmitočtu. In *Elektrotechnika a informatika 2008. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008.* s. 75-76. ISBN: 978-80-7043-701-8
- [A31] CÉDL, M., LOS, M., STREIT, L. Simulace trakčního pohonu se středofrekvenčním transformátorem. In *Liberecké elektrické pohony. Liberec: Technická univerzita, 2007.* s. 200-205. ISBN: 978-80-7372-272-2
- [A32] CÉDL, M., LOS, M., STREIT, L. Simulace trakčního pohonu se středofrekvenčním transformátorem a jednofázovým maticovým měničem. In *Elektrotechnika a informatika 2007. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2007.* s. 5-8. ISBN: 978-80-7043-571-7
- [A33] STREIT, L., CÉDL, M., LOS, M. Výkonový obvod přímého měniče kmitočtu. In *Elektrotechnika a informatika 2007. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2007.* s. 97-100. ISBN: 978-80-7043-571-7
- [A34] LOS, M., STREIT, L., CÉDL, M. Řízení přímého měniče kmitočtu. In *Elektrotechnika a informatika 2007. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2007.* s. 57-60. ISBN: 978-80-7043-571-7

Seznam autorových výzkumných zpráv (chronologicky)

- [A35] DRÁBEK, P., STREIT, L. *Výzkum problematiky systémů akumulace energie v drážních vozidlech a drážní infrastruktře.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. 20 s.
- [A36] STREIT, L. *Možnosti sériového a paralelního řazení výkonových polovodičových prvků.* Plzeň: ČKD ELEKTROTECHNIKA, a.s., 2012. 33 s.
- [A37] STREIT, L. *Elektrovýzbroj motokáry.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. 10 s.

- [A38] STREIT, L. *Oteplovací zkouška baterie Valence UEV-18XP*. Plzeň: ŠKODA ELECTRIC a.s., 2011. 22 s.
- [A39] HOŘAN, M., STREIT, L., CHALOUPKA, L. *Realizace výkonových měničů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. 10 s.
- [A40] STREIT, L., LOS, M., DRÁBEK, P. *Stavba Teslova transformátoru s audio modulací*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. 10 s.
- [A41] STREIT, L., DRÁBEK, P. *Laboratorní prototyp pohonu s ESS se superkondenzátory: Experimentální studie*. Plzeň, 2010.
- [A42] JANDA, M., ŽÁK, J., STREIT, L. *Matematický model navrženého hybridního pohonu*. Plzeň, 2010.
- [A43] STREIT, L., DRÁBEK, P., BLAHNÍK, V. *Model baterie - Experimentální studie*. Plzeň, 2010.
- [A44] STREIT, L., DRÁBEK, P. *Návrh a simulace asynchronního pohonu s ESS se superkondenzátory*. Plzeň, 2010.
- [A45] STREIT, L. *Stavba prototypu výkonového měniče*. Plzeň, 2010.
- [A46] BLAHNÍK, V., DRÁBEK, P., STREIT, L. *Trakční baterie pro hybridní bus Škoda*. Plzeň, 2009.
- [A47] BLAHNÍK, V., DRÁBEK, P., STREIT, L. *Úvodní studie superkondenzátorů a jejich měničů pro hybridní bus Škoda*. Plzeň, 2009.
- [A48] STREIT, L., DRÁBEK, P. *Stavba experimentálního modelu 1F maticového měniče - sekundární měniče*. Plzeň, 2008.
- [A49] STREIT, L., DRÁBEK, P. *Stavba prototypu 1F maticového měniče - primární měniče*. Plzeň, 2008.
- [A50] STREIT, L., DRÁBEK, P. *Systém akumulace energie pro vozidla lehké trakce*. Plzeň, 2008.

Seznam autorových funkčních vzorků a softwaru (chronologicky)

- [A51] MOLNÁR, J., KOŠAN, T., STREIT, L. *Sestava tříhladinového NPC frekvenčního měniče*. 2013
- [A52] STREIT, L., CHALOUPKA, L. *Budicí obvody 4f výkonového střídače*. 2012.

- [A53] STREIT, L., ZAVŘEL, M. *Jednofázový střídač s fázovým závěsem*. 2012.
- [A54] STREIT, L. *Měřicí software pro zatěžování stejnosměrného motoru*. 2012.
- [A55] MOLNÁR, J., KOŠAN, T., STREIT, L. *Tříhladinový NPC napěťový pulzní usměrňovač*. 2012.
- [A56] MOLNÁR, J., KOŠAN, T., STREIT, L. *Tříhladinový NPC napěťový střídač*. 2012.
- [A57] STREIT, L., ELIS, L. *Zobrazovací jednotka elektrické motokáry*. 2012.
- [A58] STREIT, L., ŠTĚPÁNEK, J., HOŘAN, M. *Budící obvody pro MOSFETový měnič*. 2011.
- [A59] STREIT, L., ELIS, L. *Interface k procesoru AT90CAN*. 2011.
- [A60] STREIT, L., LOS, M. *Jednofázový střídač pracující na frekvenci 400kHz*. 2011.
- [A61] STREIT, L., ŠTĚPÁNEK, J. *MOSFETový měnič pro elektromotokáru*. 2011.
- [A62] MOLNÁR, J., KOŠAN, T., KRÁL, V., STREIT, L. *Měnič 4L-FLC 20kW*. 2011.
- [A63] STREIT, L., LOS, M. *Teslův transformátor*. 2011.
- [A64] STREIT, L. *Zařízení pro testování vlastností akumulátorů*. 2011.
- [A65] JANDA, M., ŽÁK, J., STREIT, L. *Simulační model hybridního autobusu*. 2010.
- [A66] STREIT, L. *Funkční vzorek pohonu s asynchronním motorem a ESS*. 2010
- [A67] STREIT, L., DRÁBEK, P. *Ovládací obvod 1-fázového maticového měniče s obvody HCPL 316*. 2009.
- [A68] STREIT, L., DRÁBEK, P., LOM, A. *Ovládací obvod univerzálního nepřímého měniče kmitočtu s driverem SKHI 71*. 2009.
- [A69] STREIT, L., DRÁBEK, P. *Výkonový obvod 1-fázového maticového měniče*. 2009.
- [A70] STREIT, L., DRÁBEK, P., LOM, A. *Výkonový obvod univerzálního nepřímého měniče kmitočtu s IGBT prvky IXYS*. 2009.

Příloha 1

Optimální nastavení všech strategií pro 3 SC moduly																								
	Bez ESS				Proporcionální				Omezení špičkových odběrů				Rekuperace 100 %											
	Obsazenost		Obsazenost		Obsazenost		Obsazenost		Střední výkon		Obsazenost		Střední výkon s predikcí		Obsazenost									
	5	8	10	0	5	8	10	0	5	8	10	0	5	8	10	0	5	8	10	os/mm ²				
E _s	35,96	46,81	50,29	52,42	30,16	40,16	43,57	45,75	33,62	43,61	46,99	49,12	31,28	41,32	44,78	46,88	32,35	42,05	45,38	47,59	30,66	40,45	43,66	45,73
E _r	-4,04	-5,46	-5,79	-6,11	-1,09	-2,06	-2,40	-2,71	-2,95	-3,92	-4,22	-4,52	-1,50	-2,44	-2,78	-3,07	-1,95	-2,84	-3,14	-3,41	-4,04	-5,46	-5,79	-6,11
E _c	31,92	41,35	44,50	46,31	29,07	38,10	41,17	43,04	30,67	39,69	42,77	44,60	29,78	38,88	42,00	43,81	30,40	39,20	42,24	44,18	27,71	36,27	39,17	40,90
E _{dp}	5,66	7,54	8,19	8,46	1,50	2,87	3,42	3,75	4,08	5,39	5,94	6,20	2,00	3,40	3,98	4,22	2,67	3,83	4,35	4,71	1,01	1,88	2,20	2,36
E _{nd}	2,28	2,74	2,79	2,99	2,05	2,51	2,71	2,79	2,02	2,58	2,73	2,76	2,13	2,63	2,75	2,77	2,07	2,43	2,54	2,57	1,62	1,83	2,05	2,30
E _{ssc}	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	1,14	1,16	1,16	0,17	0,28	0,31	0,33	1,10	1,18	1,22	1,24	1,10	1,18	1,21	1,24	0,37	0,49	0,55	0,58
E _{desc}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,16	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,21	0,19	0,20	0,19	0,21	0,24	0,24	0,25
E _{total}	34,21	44,09	47,29	49,30	31,27	40,78	44,04	46,00	32,69	42,27	45,50	47,36	31,99	41,53	44,77	46,61	32,69	41,83	44,97	46,95	29,53	38,34	41,45	43,45
Úspora	0	0	0	0	8,58	7,51	6,87	6,70	4,44	4,12	3,79	3,94	6,66	5,81	5,33	5,46	4,44	5,13	4,90	4,78	13,66	13,05	12,34	11,86
Rekuperace 50 %																								
E _s	35,96	46,81	50,29	52,42	30,16	40,16	43,57	45,75	33,62	43,61	46,99	49,12	31,28	41,32	44,78	46,88	32,35	42,05	45,38	47,59	30,66	40,45	43,66	45,73
E _r	-4,04	-5,46	-5,79	-6,11	-1,09	-2,06	-2,40	-2,71	-2,95	-3,92	-4,22	-4,52	-1,50	-2,44	-2,78	-3,07	-1,95	-2,84	-3,14	-3,41	-4,04	-5,46	-5,79	-6,11
E _c	31,92	41,35	44,50	46,31	29,07	38,10	41,17	43,04	30,67	39,69	42,77	44,60	29,78	38,88	42,00	43,81	30,40	39,20	42,24	44,18	27,71	36,27	39,17	40,90
E _{dp}	5,66	7,54	8,19	8,46	1,50	2,87	3,42	3,75	4,08	5,39	5,94	6,20	2,00	3,40	3,98	4,22	2,67	3,83	4,35	4,71	1,01	1,88	2,20	2,36
E _{nd}	2,28	2,74	2,79	2,99	2,05	2,51	2,71	2,79	2,02	2,58	2,73	2,76	2,13	2,63	2,75	2,77	2,07	2,43	2,54	2,57	1,62	1,83	2,05	2,30
E _{ssc}	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	1,14	1,16	1,16	0,17	0,28	0,31	0,33	1,10	1,18	1,22	1,24	1,10	1,18	1,21	1,24	0,37	0,49	0,55	0,58
E _{desc}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,16	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,21	0,19	0,20	0,19	0,21	0,24	0,24	0,25
E _{total}	34,21	44,09	47,29	49,30	31,27	40,78	44,04	46,00	32,69	42,27	45,50	47,36	31,99	41,53	44,77	46,61	32,69	41,83	44,97	46,95	29,53	38,34	41,45	43,45
Úspora	0	0	0	0	8,58	7,51	6,87	6,70	4,44	4,12	3,79	3,94	6,66	5,81	5,33	5,46	4,44	5,13	4,90	4,78	13,66	13,05	12,34	11,86
Rekuperace 0 %																								
E _s	35,96	46,81	50,29	52,42	30,16	40,16	43,57	45,75	33,62	43,61	46,99	49,12	31,28	41,32	44,78	46,88	32,35	42,05	45,38	47,59	30,66	40,45	43,66	45,73
E _r	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E _c	35,96	46,81	50,29	52,42	30,16	40,16	43,57	45,75	33,62	43,61	46,99	49,12	31,28	41,32	44,78	46,88	32,35	42,05	45,38	47,59	30,66	40,45	43,66	45,73
E _{dp}	9,70	13,00	13,98	14,57	2,58	4,92	5,82	6,46	7,04	9,31	10,16	10,72	3,50	5,84	6,76	7,29	4,62	6,68	7,49	8,12	3,65	5,65	6,29	6,78
E _{nd}	2,28	2,74	2,79	2,99	2,05	2,51	2,71	2,79	2,02	2,58	2,73	2,76	2,13	2,63	2,75	2,77	2,07	2,43	2,54	2,57	1,62	1,83	2,05	2,30
E _{ssc}	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	1,14	1,16	1,16	0,17	0,28	0,31	0,33	1,10	1,18	1,22	1,24	1,10	1,18	1,21	1,24	0,37	0,49	0,55	0,58
E _{desc}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,16	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,21	0,19	0,20	0,19	0,21	0,24	0,24	0,25
E _{total}	38,24	49,55	53,08	55,41	32,36	42,88	46,44	48,71	35,64	46,19	49,72	51,88	33,43	43,97	47,55	49,67	34,63	44,67	48,11	50,35	32,15	42,48	45,77	48,07
Úspora	0	0	0	0	15,39	13,55	12,50	12,09	6,80	6,78	6,33	6,37	12,59	11,27	10,42	10,35	9,44	9,85	9,36	9,12	15,92	14,26	13,77	13,24

Příloha 2

		Optimální nastavení všech strategií pro 4 SC moduly																								
		Rekuperece 100 %					Rekuperece 50 %																			
		Bez ESS		Proporcionální		Omezení špičkových odběrů		Střední výkon		Střední výkon s predikcí		Určení hladiny SC dle trati														
		Obsazenost		Obsazenost		Obsazenost		Obsazenost		Obsazenost		Obsazenost														
		0	5	8	10	0	5	8	10	0	5	8	10													
		os/mm ²																								
E _S	35,96	46,81	50,29	52,42	29,60	39,25	42,56	44,73	33,62	43,50	46,87	48,99	30,48	40,13	43,41	45,49	32,33	42,12	45,47	47,55	31,20	40,93	44,13	46,21		
E _R	-4,04	-5,46	-5,79	-6,11	-0,99	-1,76	-2,05	-2,29	-2,98	-3,90	-4,20	-4,50	-1,03	-1,76	-2,06	-2,33	-1,70	-2,67	-2,97	-3,20	-4,03	-5,46	-5,79	-6,11		
E _C	31,92	41,35	44,50	46,31	28,61	37,49	40,51	42,43	30,65	39,60	42,66	44,49	29,45	38,38	41,35	43,16	30,63	39,44	42,50	44,35	27,17	35,47	38,35	40,10		
E _{OpP}	5,66	7,54	8,19	8,46	1,34	2,44	2,94	3,33	4,11	5,37	5,91	6,18	1,35	2,48	2,91	3,13	2,41	3,61	4,13	4,39	4,42	1,07	1,40	1,61		
E _{OpD}	2,28	2,74	2,79	2,99	1,97	2,46	2,80	2,74	2,04	2,52	2,72	2,83	2,16	2,71	2,69	2,66	2,01	2,44	2,47	2,49	1,50	1,87	1,96	2,08		
E _{SS}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	1,00	1,02	1,02	0,21	0,23	0,24	1,45	1,56	1,61	1,64	1,46	1,56	1,61	1,65	0,50	0,55	0,59	0,60			
ΔE _{SC}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,26	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,11	0,12	0,13	0,26	0,29	0,30	0,29	0,31	0,35	0,34	0,35		
E _{total}	34,21	44,09	47,29	49,30	30,83	40,20	43,58	45,44	32,68	42,12	45,38	47,32	31,76	41,19	44,16	45,95	32,90	42,18	45,27	47,14	28,99	37,68	40,64	42,53		
Úspora	0	0	0	0	9,89	8,81	7,85	7,82	4,45	4,47	4,04	4,02	7,15	6,57	6,61	6,80	3,82	4,34	4,28	4,39	15,26	14,53	14,06	13,73		
		Rekuperece 0 %																								
E _S	35,96	46,81	50,29	52,42	29,60	39,25	42,56	44,73	33,62	43,50	46,87	48,99	30,48	40,13	43,41	45,49	32,33	42,12	45,47	47,55	31,20	40,93	44,13	46,21		
E _R	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
E _C	35,96	46,81	50,29	52,42	29,60	39,25	42,56	44,73	33,62	43,50	46,87	48,99	30,48	40,13	43,41	45,49	32,33	42,12	45,47	47,55	29,42	39,31	42,61	44,69		
E _{OpP}	9,70	13,00	13,98	14,57	2,34	4,20	4,99	5,62	7,09	9,27	10,11	10,68	2,39	4,24	4,97	5,46	4,11	6,28	7,10	7,59	2,23	4,47	5,26	5,79		
E _{OpD}	2,28	2,74	2,79	2,99	1,97	2,46	2,80	2,74	2,04	2,52	2,72	2,83	2,16	2,71	2,69	2,66	2,01	2,44	2,47	2,49	1,44	1,66	1,91	2,06		
E _{SS}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88	1,00	1,02	1,02	0,12	0,21	0,23	0,24	1,45	1,56	1,61	1,64	1,46	1,56	1,61	1,65	0,76	0,81	0,83	0,84		
ΔE _{SC}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,26	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,11	0,12	0,13	0,26	0,29	0,30	0,29	0,27	0,28	0,28	0,29		
E _{total}	38,24	49,55	53,08	55,41	31,82	41,96	45,63	47,74	35,66	46,02	49,58	51,82	32,79	42,95	46,22	48,28	34,60	44,85	48,23	50,33	31,13	41,24	44,80	47,04		
Úspora	0	0	0	0	16,84	15,31	14,03	13,84	6,76	7,12	6,59	6,48	14,25	13,32	12,92	12,87	9,53	9,49	9,13	9,16	18,61	16,77	15,59	15,10		
		%																								