

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DISERTAČNÍ PRÁCE

Energetická bilance v elektrické trakci

Studijní obor: Elektroenergetika

Plzeň 2012

Autor: Ing. Vlastislav Elstner

Školitel: prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě Disertační práci zpracovanou během mého doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne: _____

Podpis: _____

Upozornění

Využití a společenské uplatnění výsledku této práce, včetně uvádění vědeckých výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě autorské smlouvy a souhlasu Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat zejména mému školiteli prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackému, DrSc. a celému kolektivu pracovníků Katedry elektroenergetiky a ekologie za poskytnutí cenných rad a pracovního prostředí. Dále děkuji svému kolegovi Ing. Milanu Bělíkovi PhD, který se mnou spolupracoval na výzkumných úkolech pro PmDP. Poděkování patří i Ing. Jiřímu Šimánkovi PhD, zaměstnanci GŘ SŽDC a Ing. Lubošovi Paškovi, výrobně technickému řediteli PmDP, za odborné konzultace v oblasti bezpečnosti rekuperace a topologie trakční sítě. Cenné konzultace a podklady týkající se projektu jízdy a zatížení vozidla na reálné trati poskytl také doc. Michal Korecký, PhD. Samozřejmě děkuji mým blízkým, kteří mě po celou dobu mého dosavadního studia podporovali.

Práce byla zpracována za podpory programu MŠMT Praha - Projekt - Výzkumné centrum 1M 06059 a podpory Evropského fondu pro regionální rozvoj (ERDF) a MŠMT ČR v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094: Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE).

Anotace

Práce se zabývá energetickou bilancí pro městskou hromadnou dopravu a možnostmi snížení spotřeby energie. Pro úseky napájecího vedení jsou posouzeny možnosti umístění akumulátorů energie pro absorbování brzděné energie a její využití pro rozjezd (rekuperace energie). Jsou posouzeny mechanické a elektrické akumulátory energie z hlediska vhodnosti pro tramvajovou trať. Výsledky teoretických výpočtů jsou aplikovány u Plzeňských městských dopravních podniků na konkrétní tramvajovou linku. Je zkoumána detekce zkratu v napájecím úseku. Je analyzováno oteplení sběrače proudu moderního vozidla na základě modelu oteplení sběrače v Matlab Simulink a výsledky porovnány s experimentem na reálném sběrači.

Klíčová slova

Elektrická trakce, akumulátor energie, superkondenzátor, energetická bilance, rekuperace, náhradní schéma napájecího úseku, ekonomické přínosy, experiment.

Annotation

The work deals with energy balance in Urban Mass Transportation and with possibilities to reduce consumption of energy. The placement options of accumulators are assessed for the sections of the traction power line. The accumulator purpose is to absorb braking energy and it is used for acceleration of vehicle (recuperation of energy). Electrical and mechanical accumulators are compared from point of view usability in Tram line. The results of the theoretical calculations are applied to the tram line of Pilsner's transport Company with great elevation. The security field is examined in terms of correct detection during short circuits, when vehicles are regenerative braking. The temperature rise of the pantograph on modern vehicle is studied and model of this process is created in Matlab Simulink.

Key words

Electrical traction, accumulator of energy, supercapacitor, energy balance, regenerative braking, equivalent circuit of the power line section, economic benefits, tests.

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Cíle práce	10
2	Hospodaření s energií vozidel – současný stav	11
2.1	Energetický potenciál trati	11
2.2	Energetický potenciál vozidla	11
2.3	Základní fáze pohybu vozidel	11
2.4	Rekuperace elektrické energie	13
2.5	Problémy rekuperace a jejich řešení	13
3	Současný provoz u PmDP	14
3.1	Topologie linek elektrické trakce v Plzni	14
4	Akumulátory elektrické energie pro trakci - současný stav	15
4.1	Elektromechanické akumulátory	15
4.2	Elektrické akumulátory	17
4.3	Realizované projekty akumulčních zařízení pro rekuperovanou energii ...	19
5	Superkondenzátorový akumulátor pro městské dráhy	25
5.1	Základní princip superkondenzátoru	25
5.2	Složení superkondenzátoru	26
5.3	Superkondenzátorová baterie	27
5.4	Koncepce stacionárního superkondenzátorového akumulátoru	27
5.5	Systém řízení stacionárního superkondenzátorového akumulátoru	28
5.6	Varianty umístění stacionárního akumulátoru	30
5.7	Koncepce vozidlového superkondenzátorového akumulátoru	32
6	Trakční mechanika městské dráhy	33
6.1	Pohybová rovnice	33
6.2	Empirické vztahy pro výpočet celkového vozidlového odporu	33
6.3	Odpor ze zrychlení vozidla	35
6.4	Trakční mechanika a energetika	35
7	Teorie energetických výpočtů pro kolejová vozidla MHD	36
7.1	Cíle výpočtů	36
7.2	Výpočet redukovaného sklonu	36
7.3	Výpočet specifické spotřeby na krytí trakční práce	37
7.4	Specifická spotřeba el. energie	37

8	Aplikace výpočtové metodiky na reálnou linku MHD	38
8.1	Odůvodnění výběru linky	38
8.2	Rozdělení linky č. 4 PmDP	38
8.3	Měření v reálném provozu.....	39
8.4	Vyhodnocení tachogramu	43
8.5	Výpočet redukovaného sklonu zkoumaných úseků.....	43
8.6	Výpočet specifické spotřeby na krytí trakční práce	44
8.7	Výpočet specifické spotřeby elektrické energie.....	45
8.8	Výpočet skutečné spotřeby energie na krytí trakční práce	46
8.9	Zhodnocení výsledků výpočtu skutečné spotřeby na krytí trakční práce.....	46
8.10	Výpočet skutečné spotřeby	49
8.11	Zhodnocení výsledků výpočtů skutečné spotřeby el. energie	49
8.12	Možnosti optimalizace spotřeby elektrické energie na lince č.4	52
9	Energetická bilance tramvajové trati z hlediska pohonu vozidla.....	52
9.1	Porovnání skutečné spotřeby vozidel na lince č. 4 PmDP	52
10	Možné úspory elektrické energie na lince č. 4 PmDP	56
10.1	Možné úspory el. energie na lince č. 4 s přihlédnutím k provoznímu stavu	58
10.2	Závěry z výpočtů energetických úspor	58
11	Návrh trakční soustavy městské dráhy s ideální energetickou bilancí	58
11.1	Současná topologie trakční sítě městské dráhy z hlediska rekuperace	58
11.2	Idealizovaná topologie trakční sítě městské dráhy	59
12	Možná opatření pro zvýšení účinnosti rekuperace na stávajících městských drahách.....	60
12.1	Spínací stanice.....	61
12.2	Akumulátor rekuperované energie	61
12.3	Akumulátor rekuperované energie pracující do sousedních úseků vedení .	62
13	Možná opatření pro zvýšení účinnosti rekuperace na lince č. 4 PmDP	64
13.1	Spínací stanice Bory – Chodské náměstí	65
13.2	Stacionární akumulátor v úseku Hálkova	66
13.3	Akumulátor pracující do sousedních úseků Cizinecký dům a Košutka.....	66
14	Bezpečnost trakční sítě s rekuperujícími vozidly a akumulátory elektrické energie	66
14.1	Rizika při bezporuchovém stavu trakční sítě	66

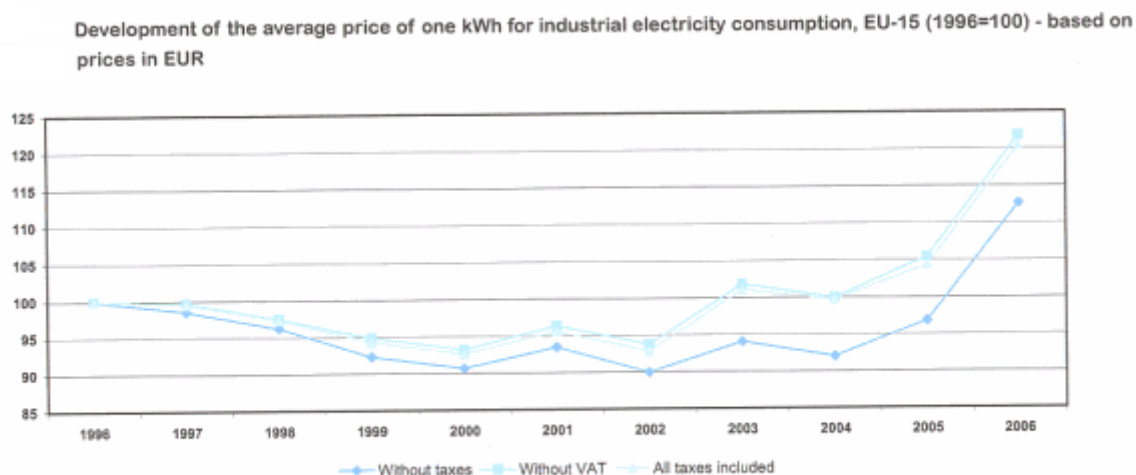
14.2	Rizika při poruchovém stavu trakční sítě.....	67
14.3	Závažnost vzdáleného zkratu v sítích městských drah	71
14.4	Ochranná opatření pro zabezpečení trakční sítě s rekuperací během zkratů	75
15	Model trakční sítě pro výpočty zkratových poměrů při rekuperaci	78
15.1	Elektrické parametry vedení trakční sítě	78
15.2	Měrné hodnoty elektrických veličin trakční sítě	86
15.3	Úplný model napájecího úseku	86
16	Aplikace modelu k posouzení závažnosti vzdáleného zkratu	88
16.2	Kritické stavy v napájecím úseku	89
16.3	Mezní výkon ostatních zdrojů v napájecím úseku	91
16.4	Zhodnocení závažnosti vzdáleného zkratu v napájecím úseku s rekuperací energie	94
17	Energetická bilance jako podklad k tepelnému dimenzování pantografového sběrače proudu	95
17.1	Cíle a důvody zkoumání, souvislosti s energetickou bilancí.....	95
17.2	Principy přenosu tepla.....	96
17.3	Teorie tepelné sítě	101
17.4	Rovnice tepelné bilance	102
17.5	Tepelná síť v Matlab Simulink s využitím knihovny Simscape	104
17.6	Výhody řešení tepelné sítě v Matlab Simulink.....	108
17.7	Proudová dráha sběrače typu AX	108
17.8	Model pantografu AX v Matlab Simulink	111
17.9	Verifikace modelu měřením.....	111
17.10	Aplikace modelu na reálné vozidlo	117
17.11	Závěr a zhodnocení výsledků.....	122
18	Závěr	123
18.1	Vlastní přínosy	123
19	Vlastní publikace	128
20	Práce na oponovaných vývojových projektech	129
21	Odborná praxe.....	130
22	Seznam obrázků	131
23	Příloha 1	133

24	Příloha 2	134
25	Příloha 3	135
26	Příloha 4	136
27	Příloha 6	138
28	Příloha 7	139
29	Příloha 8	140
30	Příloha 9	141
31	Příloha 10	142
32	Příloha 11	148
33	Příloha 12	152

1 Úvod

Kolejová doprava s elektrickou trakcí má na našem území dlouhou a bohatou tradici. Její kořeny sahají až do počátku minulého století. První významnou dopravní stavbu realizoval František Křižík již v roce 1903, byla jí elektrická dráha Tábor - Bechyně. Na Křižíkův odkaz navázaly neméně úspěšně výrobní závody ČKD a Škoda Plzeň, které se významnou měrou podílely na zavádění elektrické trakce na československých železnicích a v českých městech.

Za dlouhou dobu vývoje elektrické trakce došlo ke značnému zdokonalení trakčních vozidel a zařízení. Zvyšující se požadavky na přepravní kapacitu, komfort cestujících a dynamiku provozu, vyvolaly i zvyšování výkonů samotných trakčních pohonů a pomocných zařízení. To samozřejmě vedlo ke zvýšení spotřeby elektrické energie celého trakčního systému a tím zvýšení nákladů. Vývoj ceny elektrické energie pro velkoodběratele v Evropě je patrný z *Obr. 1*.



Obr. 1. Vývoj cen el. energie

Na *Obr. 1*. (zdroj Eurostat) je znázorněn vývoj ceny elektrické energie v procentech, rok 1996 je považován za 100%. Tento vývoj cen platí průměrně pro celou EU a představuje nárůst ceny v období roku 1996 - 2006 o více než 22%, pro Českou republiku pak 21,6%. Proto oblast optimalizace provozu s ohledem na snižování spotřeby elektrické energie získává na svém významu. To je zdůrazněno i tím, že v globálním měřítku se v dopravě spotřebuje cca 15% el. energie vyrobené na Zemi.

1.1 Cíle práce

Práce si klade za cíl popsat možné způsoby úspory elektrické energie v prostředí trakčního systému a jejich přínos. První část práce se především zaměřuje na trakční systémy městských drah a pouze okrajově na železniční prostředí. Tyto dva zmíněné druhy dopravy jsou si však velice blízké a jejich problémy obdobné, proto je možno zjištěné skutečnosti z prostředí městských drah do značné míry aplikovat i na železnici. Důvodem bylo také to, že provoz městských drah byl předmětem spolupráce Západočeské univerzity v Plzni s Plzeňskými městskými dopravními podniky ve více výzkumných a vývojových projektech.

Práce má nalézt vhodnou metodiku pro hledání a hodnocení úseků městských drah vhodných pro umístění zařízení sloužících k akumulaci kinetické energie vozidel a navrhnout změny trakční napájecí soustavy, které povedou ke zvýšení účinnosti rekuperačních procesů na reálné lince PmDP. Touto problematikou se zabýval pro železniční prostředí i prof. František Jansa na jehož práci navazují a aplikují jeho poznatky pro prostředí městských drah. Praktickým výstupem práce je stanovení možné ušetřené energie pro linku č. 4 PmDP v jednotlivých napájecích úsecích.

Zvláštní pozornost je nutné věnovat bezpečnosti provozu vozidel s možností rekuperace a bezpečnosti provozu po instalaci stacionárních akumulátorů do stávajících napájecích úseků tramvajové trati. Za tímto účelem je nutno zjistit důležité elektrické parametry typické sestavy trakčního vedení městské dráhy používané nejen v Plzni, ale i na dalších drahách v ČR. Tyto parametry pak jsou použity pro tvorbu modelu napájecího úseku při simulaci kritických stavů během vzdálených zkratů.

Jedním z nových úkolů v souvislosti s režimy rekuperace je dimenzování proudové dráhy. Práce se zabývá modelováním oteplení pantografového sběrače proudu, jednoho z hlavních dílů, citlivého na rozdílné proudové zatížení oproti režimu jízdy bez rekuperace. Cílem bylo vytvořit teoretický model, jež umožní zkoumat zatížení a dimenzovat díly proudové dráhy reálného sběrače. Model využívá tepelnou síť vytvořenou v Matlab Simulink s užitím knihovny Simscape. Teoretický model byl verifikována měřením v akreditované elektrotechnické zkušebně.

2 Hospodaření s energií vozidel – současný stav

2.1 Energetický potenciál trati

Pro základní představu využijme jednoduchý fyzikální vztah pro potenciální energii tělesa na Zemi:

$$E_p = mgh, \quad [2.1.1]$$

kde:

m – hmotnost tělesa,

g – tíhové zrychlení ($9,81\text{ms}^{-1}$),

h – výška tělesa.

Pro náš případ je m hmotnost soupravy a h velikost převýšení mezi nejvyšším a nejnižším bodem trati, mezi kterými se vozidlo pohybuje dolů po spádu. Výsledná hodnota bude samozřejmě pouze teoretická, ale může být měřítkem pro verifikaci dále uváděných výpočtových metod, jako maximální, nedosažitelná hodnota. Tato energie je totiž využita k hrazení vozidlových ztrát a ztrát vznikajících v trakčních motorech a měničích.

2.2 Energetický potenciál vozidla

Energetickým potenciálem vozidla je uvažována kinetická energie jedoucí soupravy. Pro základní představu lze využít fyzikální vztah:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad [2.2.1]$$

kde:

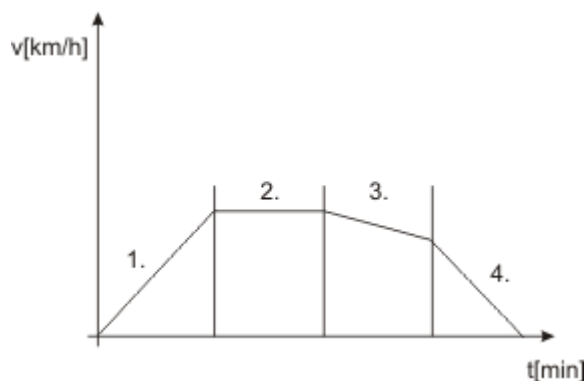
m – hmotnost soupravy,

v – rychlost soupravy.

Opět se jedná o teoretickou maximální hodnotu, které v praxi nelze dosáhnout. Tato hodnota však bude sloužit k verifikaci dále uvedené výpočtové metody.

2.3 Základní fáze pohybu vozidel

Pohyb všech kolejových vozidel, lze obecně rozdělit do čtyř základních fází. Fáze jsou znázorněny na Obr. 2.



Obr. 2. Fáze pohybu vozidla

Popis jednotlivých fází:

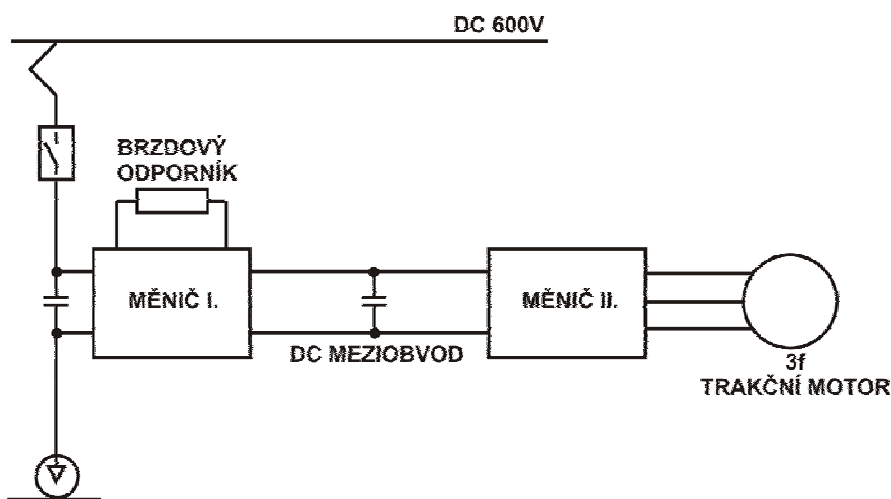
1. **Rozjezd** – jedná se o uvedení vozidla do pohybu a dosažení požadované dopravní rychlosti, překonávají se zde odpory kladené jízdě vozidla a jeho zrychlování. V této fázi dochází k přeměně elektrické energie v trakčním motoru na energii mechanickou. Prostor pro energetické úspory je v této fázi značný a spočívá v co nejhospodárnější regulaci trakčního motoru.
2. **Jízda rovnoměrnou rychlostí** – tažná síla kryje pouze trakční odpory. Prostor pro energetické úspory je opět v co nejhospodárnější regulaci trakčního motoru a jeho účinnosti.
3. **Výběh** – vozidlo nepůsobí tažnou silou a vlivem traťových a vozidlových odporů rychlost vozidla klesá. V této fázi nedochází ke spotřebovávání elektrické energie. Je velice vhodné tuto fázi pohybu udržovat pokud možno co nejdéle vhodným návrhem jízdního řádu.
4. **Brzdění** – umělé zvýšení vozidlového odporu za účelem snížení rychlosti či zastavení vozidla. V této fázi je možné kinetickou energii vozidla přeměnit zpět na elektrickou pomocí trakčního motoru. Tuto energii pak může vozidlo prostřednictvím trakční sítě předat dalšímu vozidlu nebo si ji uchovat a použít později buď k opětovné přeměně na kinetickou energii nebo pro napájení pomocných zařízení.

Z uvedeného popisu jednotlivých fází pohybu je zřejmé, že nejvýraznějších úspor lze dosáhnout ve fázi 4. - Brzdění a fázi 1. Rozjezd. Dnešní stav technického poznání již umožňuje velice hospodárný rozjezd pomocí trakčního střídače s pulzně-

šířkovým řízením v kombinaci s asynchronním trakčním motorem. Proto se tato práce nebude touto problematikou zabývat.

2.4 Rekuperace elektrické energie

Trakční vozidlo během fáze 4. - Brzdění, na městských drahách vždy, na železnici jen v některých případech, aplikuje elektrodynamické brzdění. Trakční motor v tomto případě pracuje jako generátor, který brzdí vozidlo a zároveň vyrábí elektrickou energii. Tato energie se u vozidel staré konstrukce s odporovou regulací výkonu maří v odporníku na odpadní teplo. U moderních vozidel, jako je na Obr. 3., lze tuto energii v určitých případech vrátet zpět do trakční sítě, tzv. rekuperovat.



Obr. 3. Trakční obvod moderního vozidla

Během rekuperace vyrábí trakční motor 3f střídavé napětí. Měnič II. pracuje v režimu 3f řízeného usměrňovače a napájí DC meziobvod. Tím začíná napětí v meziobvodu narůstat. Pokud je vyšší než napětí trakční sítě, lze meziobvod spojit s trakčním vedením a navracet tak elektrickou energii zpět do sítě.

Tímto způsobem lze teoreticky navrátit podle společnosti SIEMENS až 40% energie spotřebované na rozjezd vozidla. Prakticky se však doposud podařilo dosáhnout pouze hodnoty okolo 20%.

2.5 Problémy rekuperace a jejich řešení

Uskutečnění rekuperace elektrické energie má v elektrické trakci důležitou podmínku, vyráběná energie musí být okamžitě spotřebována. Pokud tato podmínka není splněna dojde k rychlému nárůstu napětí trakční sítě vysoko nad jmenovité hodnoty a poškození její izolace, proto se moderní trakční vozidlo zachová

tak, že svůj DC meziobvod odpojí od trakční sítě a Měnič I. (Obr. 3.) začne elektrickou energii mařit v brzdovém odporu. Řešením tohoto problému je vždy zajistit odběr elektrické energie jiným vozidlem nebo vhodným akumulacním zařízením připojeným k trakční síti nebo umístěným přímo ve vozidle, či umožnit aby měnírna napájející trakční vedení byla schopna vracet energii do rozvodné sítě.

Dalším významným problémem rekuperace v trakčních soustavách je chování rekuperujícího vozidla a měnírny ve chvíli zkratu trakčního vedení v bodě vzdáleném od vozidla i měnírny. Rekuperující vozidlo pak napájí zkratované vedení a může způsobit značné škody na zdraví osob, majetku a pevném trakčním zařízení.

3 Současný provoz u PmDP

Jak již bylo předesláno v úvodu, vyústěním celé práce bude aplikace teoretických poznatků na reálně provozovanou linku Plzeňských městských dopravních podniků, a.s.

3.1 Topologie linek elektrické trakce v Plzni

Páteřní dopravu v Plzni zajišťují 3 tramvajové linky, které jsou z hlediska napájení obdobně řešeny. Trakční vedení linky je rozděleno do navzájem izolovaných úseků o délce pohybující se okolo 900m. Každý úsek je napájen z nejbližší měnírny kabelovým vedením. Systém vedení je podrobně popsán v kapitole 5.4. Měnírny jsou společné pro tramvajové a trolejbusové linky. Schéma celého trakčního systému je zobrazeno v *Příloze 1*.

Linka č. 1. Bolevec – Slovany má délku 8,25 km a je částečně kopcovitá především v oblasti stoupání ke konečným stanicím. Na lince jsou vypravovány převážně sólo vozy T3M a T3P, nízkopodlažní vozy Astra a ve špičkách posilové vozy a soupravy T3, T3M, T3P, případně KT8D5.

Linka č. 2. Skvrňany – Světovar je délkou 8,6 km nejdelší tramvajová linka v Plzni a ze všech tramvajových linek má nejplošší profil. Na lince jsou vypravovány soupravy T3P, T3, a nízkopodlažní vozy Astra, výjimečně soupravy T3M.

Linka č. 4. Bory – Košutka má délku 7,05 km a je z tramvajových linek nejvíce kopcovitá (stoupání na Bory a na Lochotín). Na lince jsou vypravovány všechny typy vozů, přičemž nejvíce používané jsou vozy KT8D5 (zejména v pracovní dny) a dále soupravy T3M, T3, méně pak T3P nízkopodlažní vozy Astra.

4 Akumulátory elektrické energie pro trakci - současný stav

Obecně se pro akumulaci energie nabízí celá řada řešení a forem. Pro problém uložení velkého množství energie se nejvýhodněji jeví uložit tuto energii ve formě elektrického či magnetického pole, dále pak v chemické formě. Méně vhodné už je uložení ve formě kinetické energie tělesa či tlaku plynu. U posledně jmenovaných musí dojít k přeměně primární formy energie na jinou a z toho plyne zvýšené riziko ztrát.

Dále se budu zabývat pouze akumulátory, které jsou předurčeny svými vlastnostmi pro dobrou součinnost s trakční sítí městských drah. Nejsledovanějšími vlastnostmi těchto akumulátorů jsou, schopnost pojmout dostatečně velké množství energie (pro tramvaj alespoň 1 – 3 kWh), dostatečná dynamika při příjmu i výdeji energie (pro tramvaj alespoň 700 kW), vysoká účinnost, hustota energie [Wh/kg] a pro mobilní akumulátory i měrný výkon [kW/kg]. Těmto požadavkům nejlépe vyhovují akumulátory na bázi kondenzátorových baterií, superkondenzátorových baterií, elektrochemických článků a vysokootáčkových setrvačnicků.

4.1 Elektromechanické akumulátory

Elektromechanické akumulátory se již pro akumulaci trakční energie v minulosti používaly. Byly použity v tzv. Gyrobusech jako zdroj energie při pohybu vozidla podobného autobusu mezi zastávkami. V zastávkách pak docházelo k roztáčení setrvačnicku uvnitř vozidla, odtud Gyrobus. Setrvačnick byl řešen jako rotační válec uložený v kluzných ložiscích. Zmíněná koncepce byla záhy opuštěna, neboť vozidla vybavená rotujícím setrvačnickem o velké hmotnosti měla zhoršené jízdní vlastnosti. Celou éru Gyrobusů ukončila nehoda, kdy došlo k selhání ložiska setrvačnicku a následné destrukci vozidla.

V posledních letech došlo k posunu technologií a je možné již realizovat řešení a uspořádání akumulátorů, která se dříve pohybovala pouze v teoretické a experimentální rovině.

Princip elektromechanického akumulátoru spočívá v přeměně elektrické energie na energii kinetickou, rotační. Energie rotačního setrvačnicku je dána vztahem:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2, \quad [4.1.1]$$

kde J je moment setrvačnosti setrvačnicku a
 ω úhlová rychlost.

Odtud se odvíjí i současný trend vysokootáčkových setrvačnicků. Cílem vývoje, je vytvořit lehký setrvačnick s minimálními ztrátami a schopností pojmout velké množství energie. Moderní koncepce takového setrvačnicku využívá řadu vyspělých technických řešení.

Celé těleso setrvačnicku je uloženo v pevné vakuové skříni. Toto opatření snižuje ztráty akumulátoru třením tělesa setrvačnicku o vzduch a jeho víření. Těleso setrvačnicku je přizpůsobeno pro provoz ve vysokých otáčkách. Je vyrobeno z vláken z materiálu s velkou tržnou délkou l_t . Tržnou délkou je myšlen poměr:

$$l_t = \frac{\sigma_p}{\rho}, \quad [4.1.2]$$

kde σ_p je pevnost materiálu v tahu [MPa] a
 ρ je hustota materiálu [kg/m³].

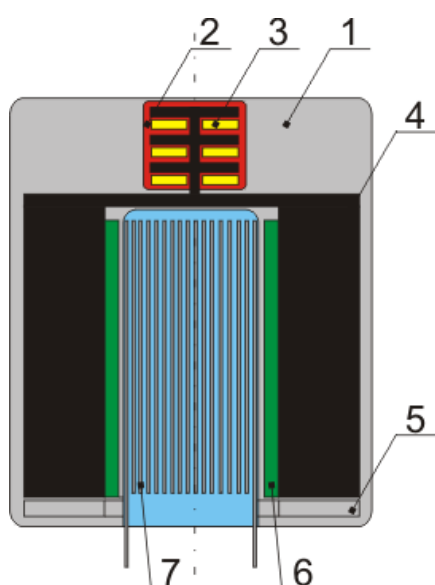
Takovými materiály jsou zejména kevlar, karbon, grafit a také sklo. Uspořádání setrvačnicku z vláken z vhodného materiálu umožňuje bezpečný provoz až do 100 000 ot/min, protože přetržení jednoho vlákna je schopna masivní skříň ustát bez poškození. Rotor setrvačnicku je na *Obr. 4*.



Obr. 4. Rotor moderního setrvačnicku

Rotor je uspořádán jako prstenec. Uvnitř prstence jsou umístěny permanentní magnety. Prstenec je navlečen na statoru s vinutím. Uspořádání odpovídá synchronnímu stroji s permanentními magnety. Pohon je tak zcela integrován do samotného setrvačnicku. Uspořádání je patrné na Obr. 5. s popisem.

Celý rotor je nesen supravodivým levitačním ložiskem umístěným v termoizolační skříni uvnitř hlavní skříň. Pro zvýšení bezpečnosti provozu je uložení rotoru doplněno dosedacím třecím ložiskem, používaným zároveň jako nouzová brzda.



1. Vakuová hlavní skříň
2. Termoizolační skříň s kryogenními podmínkami
3. Supravodivé levitační ložisko
4. Těleso setrvačnicku
5. Nouzové třecí a brzdící ložisko
6. Permanentní magnety
7. Stator s vinutím a vývody s vakuovými průchodkami

Obr. 5. Moderní elektromechanický akumulátor

Vysokootáčkové setrvačnický jsou v dnešní době velmi drahá a složitá zařízení. Jejich nasazení ve větším množství v okolí tratí elektrické trakce nebo přímo na vozidle, zatím není ekonomické. Pořizovací cena je natolik vysoká, že cena uspořené energie, při dané životnosti zařízení, pokryje pořizovací náklady za příliš dlouhou dobu. V budoucnu budou jistě využívány pro akumulaci velkých energií v řádech MWh v energetických sítích. Zde budou v menším měřítku plnit podobnou funkci jako přečerpávací elektrárny.

4.2 Elektrické akumulátory

Požadavkům městských drah nejlépe vyhovují akumulátory na bázi kondenzátorových baterií, superkondenzátorových baterií a elektrochemických článků.

Srovnání důležitých parametrů elektrických akumulátorů je možné v *tabulce 1*. Pro úplnou představu nároků na akumulátor uvádím v *tabulce 2* běžné parametry pro intervaly rozjezdu a brzdění tramvají a metra.

Parametr	Akumulátor na bázi kondenzátoru	Elektrochemický akumulátor	Akumulátor na bázi superkondenzátorů
Nabíjecí doba	$10^{-3} - 10^{-6}$ s	1 – 5 hod	0,3 – 30 s
Vybíjecí doba	$10^{-3} - 10^{-6}$ s	0,3 – 3 hod	0,3 – 30 s
Měrná energie	0,1 Wh/kg	10 – 100 Wh/kg	1 – 10 Wh/kg
Měrný výkon	100 000 W/kg	1 000 W/kg	10 000 W/kg
Životnost	500 000 a více cyklů	1 000 cyklů	500 000 cyklů
Účinnost nabíjení a vybíjení	95 a více %	70 – 85 %	85 – 98 %

Tabulka 1. Srovnání parametrů elektrických akumulátorů

Typ vozidla	Tramvaj	Metro
Doba rozjezdu [s]	12 -15	25 - 30
Doba brzdění [s]	10 - 13	20 - 25
Hmotnost [t]	do 70	do 360
Kinetická energie [kWh]	1 – 3	10 - 20

Tabulka 2. Běžné parametry pro vozidla městských drah

Z *Tabulky 1* jasně vyplývá nevhodnost klasického kondenzátoru, pro jeho nízkou hustotu energie. Akumulační zařízení na bázi klasického kondenzátoru by bylo velmi rozměrné a pro mobilní použití přímo ve vozidle nepoužitelné.

Elektrochemický akumulátor nespĺňuje požadavky na dynamiku, délka jeho nabíjecího a vybíjecího cyklu se pohybuje v řádech hodin a ani z hlediska měrného výkonu a účinnosti nabíjení není vhodný pro střednědobý, špičkový cyklus, který požadujeme.

Požadavkům na akumulátor pro trakci svými parametry nejlépe vyhovuje superkondenzátor. Podívejme se na životnost superkondenzátorové baterie hypoteticky umístěné stabilně u tramvajové trati, po které projede denně 270 souprav, což odpovídá frekventované diagonální lince, jako například linka č. 4 v Plzni. Životnost superkondenzátorového akumulátoru vychází na 5 let provozu. Za tuto dobu je zařízení nejen schopno pokrýt úsporami elektrické energie své pořizovací náklady, ale přinést i další užitek. Proto soudím, že má rozhodně smysl zabývat se praktickými aplikacemi superkondenzátorových akumulátorů v elektrické trakci a to zejména v případě frekventovaných tramvajových tratí.

4.3 Realizované projekty akumulčních zařízení pro rekuperovanou energii

Na úvod této kapitoly shrnuji přehled současných principů využití rekuperované energie, která nemá okamžitou spotřebu v trakční síti. Základními principy jsou:

- akumulční zařízení umístěné na vozidle
- akumulční zařízení stacionární
- napájecí stanice umožňující obousměrný tok energie

Akumulční zařízení využívají následující akumulční prvky:

- elektrochemické baterie
- superkondenzátory
- setrvačníky

Dále stručně představím realizovaná zařízení v prostředí městské kolejové dopravy.

Akumulční stanice společnosti TOYO DENKI

Princip: Stacionární akumulční stanice v systému 1,5 kV DC

Umístění: Japonské železnice, stanice Hiraizumi

Akumulční prvek: Lithium-ion baterie

Kapacita: 240 kWh

Rozměry: 6800 x 900 x 1900 mm

Hmotnost: 6400 kg

Na následujících obrázcích je pohled do jedné ze skříní akumulčního zařízení a pohled na jeden z modulů Lithium-ion baterie.



Obr. 6. Stacionární akumulční zařízení Toyo Denki



Obr. 7. Lithium-ion baterie použitá v akumulčním zařízení ToyoDenki

Alstom - SAFT

Princip: Akumulační zařízení umístěné ve vozidle 600 V DC

Umístění: Nice francie, Tramvaj

Akumulační prvek: Nikl-metal hydrid baterie

Akumulační zařízení je umístěno na střeše tramvaje a je využíváno k úplnému napájení vozidla v historickém centru města, kde není zřízeno trolejové vedení.

Délka úseku bez trolejového vedení je 8,8 km. Na zbytku trati je akumulární zařízení nabíjeno z troleje a rekuperačním brzděním do zastávek.

Kawasaki - Swimo

Princip: Akumulační zařízení umístěné na vozidle 600 V DC

Umístění: Japonsko, Sapporo

Akumulační prvek: NiMH baterie

Lehký tramvajový vůz pro provoz na trati bez trolejového vedení se nabíjí v koncových stanicích z trolejového systému 600V DC. Jsou použity baterie Kawasaki Gigacell, které jsou schopny absolvovat celý nabíjecí proces během 5 minut. Zatím existuje vozidlo Swimo pouze ve verzi prototypu. Předpokládaná délka tratě bez trolejového vedení činí 10km.

Kawasaki BPS

Princip: Stacionární akumulární stanice pro DC napájecí systémy

Umístění: Japonské železnice, NYCTA, WMATA

Akumulační prvek: NiMH baterie

Kapacita: 148 kWh pro 600 V DC, 185kWh pro 750 V DC, 370 kWh pro 1500 V DC

Rozměry: 2400 x 1400 x 1500 mm

Hmotnost: 5000 kg

Kinki Sharyo LFX-300

Princip: Akumulační zařízení umístěné na vozidle

Umístění: USA, Charlotte

Akumulační prvek: Lithium-ion baterie

Kapacita: 40 kWh

Jde o hybridní nízkopodlažní tramvaj, která je schopna provozu cca 8km bez trolejového vedení. Zároveň využívá akumulárního zařízení ke stabilizaci napětí a ukládání energie z rekuperačního brzdění. V dnešní době existuje funkční prototyp.

Bombardier - Mitrac

Princip: Akumulační zařízení umístěné na vozidle 600V DC

Umístění: Německo, Mannheim, Heidelberg

Akumulační prvek: Superkondenzátor Maxwell

Kapacita: 850 Wh

Rozměry: 1900 x 950 x 455 mm

Hmotnost: 477 kg

Akumulační zařízení ve formě kontejneru na střeše tramvaje, je určen především k rychlé akumulaci brzděné energie. I přes svoji malou kapacitu dosahuje tramvaj v dlouhodobém provozu o 30% nižší spotřebu energie než shodné vozidlo bez tohoto akumulačního zařízení.

Bombardier - EnerGstor

Princip: Stacionární akumulační zařízení pro DC systémy

Umístění: Německo, zkušební provoz

Akumulační prvek: Superkondenzátor Maxwell

Kapacita: 1 kWh

Rozměry: 1800 x 1800 x 2000 mm

Akumulační zařízení sloužící pro pojmání brzděné energie jediného vozidla a pro stabilizaci napětí ve vzdálených místech sítě od měření.

Siemens Sitras MES a HES

Princip: Akumulační zařízení umístěné na vozidle 600V DC

Umístění: Portugalsko, Lisabon

Akumulační prvek: Superkondenzátor + NiMH baterie

Kapacita: 850 Wh superkondenzátor + 18 kWh NiMH baterie

Rozměry: 2000 x 1520 x 630 mm superkondenzátor, 1670 x 1025 x 517 mm NiMH baterie

Hmotnost: 820 kg superkondenzátor, 826 kg baterie

Akumulační zařízení MES obsahuje pouze superkondenzátorový akumulátor a je určeno pro akumulaci brzděné energie. Zařízení HES kombinuje superkondenzátorový akumulátor s NiMH baterií a je určen pro hybridní vozidlo, které je schopno provozu bez trolejového vedení zhruba na dráze 2,5 km. Při ověřovacím provozu v lisabonském metru byla zjištěna úspora energie na vozidle s akumulátorem MES 10,8% oproti shodnému vozidlu bez tohoto akumulátoru. Obě akumulační zařízení jsou znázorněna na následující fotografii.



Obr. 8. Akumulátory Siemens Sitras MES a HES

Siemens Sitras SES

Princip:	Stacionární akumulární zařízení 600, 750 V DC
Umístění:	Německo - Bochum, Cologne, Drážďany, Španělsko - Madrid, Čína - Peking
Akumulační prvek:	Superkondenzátor
Kapacita:	1,7 kWh - 600 V DC, 2,5 kWh 750 V DC
Rozměry:	1400 x 700 x 2700 mm
Hmotnost:	4300 kg

Akumulační zařízení je v praxi použito jak pro stabilizaci napětí v síti, tak k akumulaci brzděné energie, detaily naleznete v Příloze 4.

CAF - ACR system

Princip:	Akumulační zařízení umístěné na vozidle 600 V DC
Umístění:	Seville
Akumulační prvek:	Superkondenzátor
Kapacita:	1 kWh
Rozměry:	2455 x 1600 x 750 mm
Hmotnost:	800kg

Akumulační zařízení je modulární a je primárně určeno pro městskou hromadnou dopravu. Při plném osazení superkondenzátory může sloužit i jako zdroj pro hybridní vozidlo s dojezdem 1200m, které se nabíjí během pobytu v zastávce.

Woojin Industrial - Seoul metro stationary system

Princip:	Stacionární akumulární zařízení pro systémy 750 V DC a 1500 V DC
Umístění:	Korea - Soul, USA - New York
Akumulační prvek:	Superkondenzátor

Kapacita: 10,5 MJ
Rozměry: 2370 x 1840 x 1750 mm

Akumulační zařízení určené pro linky metra k akumulaci brzděné energie ve stanici. Měřeními ve zkušebním provozu v metru v Soulu byla zjištěna úspora el. energie ve výši 23,4% oproti spotřebě před instalací akumulátorů.

Alstom On-Board Flywheel

Společnost Alstom prováděla testy tramvaje s instalovaným setrvačnickovým akumulátorem v městské dopravě v Rotterdamu. Projekt byl z technických důvodů ukončen.

Piller - Powerbridge

Princip: Stacionární akumulční zařízení pro systémy 600 V DC a 750 V DC
Umístění: Německo - Hanover
Akumulační prvek: Setrvačnick
Kapacita: 7,3 kWh
Rozměry: 1325 x 3300 x 2600 mm
Hmotnost: 10 000 kg

Stacionární akumulční zařízení určené pro městské dráhy se skládá z měniče a setrvačnicku a je plně srovnatelné svou dynamikou se statickými akumulátory na bázi baterií a superkondenzátorů.

Na závěr této přehledové kapitoly uvádím seznam typů reverzibilních usměrňovačů, které jsou základem napájecí stanice s možností zpětného toku energie. Všechna uvedená zařízení se vyznačují společnou snahou docílit vysokou kvalitu navracené energie, zejména co do obsahu vyšších harmonických složek.

Alstom - Hesop

Siemens Sitras TCI

Ingeteam

Je zřejmé, že všichni velcí světoví výrobci kolejových vozidel a pevných trakčních zařízení již zařadily do svého výrobního programu zařízení pro akumulaci rekuperované energie. Jde o pestrou škálu různých variant a kombinací výše uvedených akumulčních prvků.

5 Superkondenzátorový akumulátor pro městské dráhy

5.1 Základní princip superkondenzátoru

Svým elektrickým chováním se superkondenzátor nejvíce blíží elektrolytickému kondenzátoru. Vztah pro kapacitu je shodný:

$$C = \left| \frac{Q}{U} \right| [\text{F}] \quad [5.1.1]$$

kde Q je náboj jedné z elektrod kondenzátoru a U rozdíl potenciálů elektrod.

Vztah pro výpočet kapacity z geometrických rozměrů kondenzátoru a elektrických vlastností dielektrika je také obdobný. Samotný vztah samozřejmě závisí na vnitřním uspořádání elektrod a dielektrika. Uvádím jen základní vztah pro jednoduchý deskový kondenzátor s velmi tenkou dielektrickou vrstvou (neuvažuje se okrajový jev).

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}, \quad [5.1.2]$$

kde ε_0 je permitivita vakua [F/m],

ε_r je relativní permitivita,

S – aktivní plocha elektrod,

d – vzdálenost elektrod.

Energii, která je uložena v superkondenzátoru lze stanovit podle vztahu:

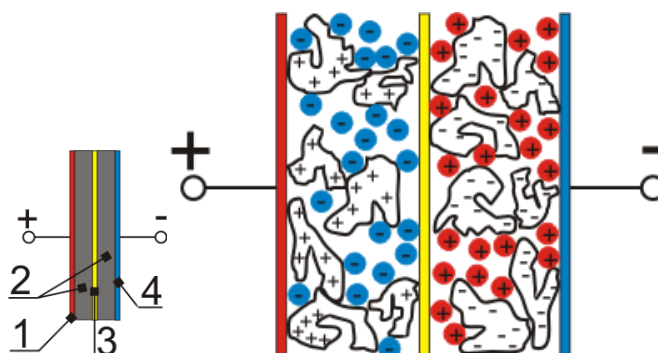
$$W_e = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \quad [5.1.3]$$

K vlastnostem kondenzátoru jako součástky elektrického obvodu lze říci, že pokud je kondenzátor zapojen do obvodu se stejnosměrným zdrojem začne se na elektrodách kondenzátoru hromadit elektrický náboj. Kondenzátor se nabíjí a obvodem teče elektrický proud. Ve chvíli kdy se vyrovná potenciál elektrody s příslušným pólem zdroje, nabíjecí proces končí a proud v obvodu zaniká. Průběh napětí kondenzátoru během nabíjení má charakter exponenciální funkce. Obdobně lze popsat i vybíjecí proces. Omezujícím faktorem vybíjecího procesu je velikost

vybíjecího proudu. Pokud zkratujeme svorky superkondenzátoru, vystoupá vybíjecí proud vysoko nad únosnou mez a může dojít k tepelnému poškození, jak vnitřní struktury kondenzátoru, tak vývodů elektrod.

5.2 Složení superkondenzátoru

Jedná se o dvouvrstvý elektrochemický kondenzátor, který se podobá spíše klasickému kondenzátoru než elektrochemickému článku. Je založen na elektrostatickém uložení náboje. Typická dvouvrstvá struktura superkondenzátoru je na Obr. 9. Skládá se z kladné elektrody tvořené hliníkovou fólií 1., vrstvami aktivních elektrod 2., separátorem 3. a zápornou elektrodou 4. také z hliníkové fólie.



Obr. 9. Struktura superkondenzátoru

V nenabitém stavu jsou ionty rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, tekutém nebo gelovém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvojrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Velikost přiloženého napětí je omezena hodnotou disociačního napětí. Velikost průrazného napětí je velmi nízká, provozní napětí je proto nejčastěji 2,3 V.

Aktivní elektroda na vnitřní straně hliníkových elektrod je tvořena aktivním uhlíkem. Ten se vyznačuje vysokou porézností a tím i velkou plochou povrchu zrn. Lze dosáhnout povrchu elektrod až $200 \text{ m}^2/\text{g}$ při tloušťce dvojrstvy do 10 nm. To představuje kapacitu tisíců F ve velmi malém objemu. Současně také zaručuje velmi nízký odpor přívodních elektrod. Tato vlastnost zaručuje vysokou rychlost nabíjecího a vybíjecího procesu a nízké ohmické ztráty při provozu. Například superkondenzátor s parametry 600 F / 2.3 V má rozměry 4 x 6 x 9 cm a váží pouze 290 g. Jeho měrný

výkon (vztažený k objemu i hmotnosti) je tak v porovnání s elektrolytickým kondenzátorem přibližně 100 x vyšší.

Aktivní uhlík je tvořen uhlíkovým aerogelem. Jde o pevný materiál s nízkou hustotou vzniklý nahrazením tekuté složky gelu vzduchem. Dalším používaným materiálem jsou uhlíkové polymery. Materiálem budoucnosti jsou uhlíkové nanotrubičky, jež ještě podstatně zvyšují povrch částic.

Detail polarizace struktury superkondenzátoru je naznačen na *Obr. 9.* vpravo.

5.3 Superkondenzátorová baterie

Maximální napětí superkondenzátoru závisí na druhu použitého elektrolytu a pohybuje se v rozmezí 1,2 – 3V. Pro použití superkondenzátoru ve spolupráci s výkonovým měničem napětí a sítí elektrické trakce je nutné mít kondenzátorovou baterii na podstatně vyšší napětí. Tento problém se řeší sériovým spojením superkondenzátorů na úkor jejich kapacity. Protože každý superkondenzátor může mít lehce jinou kapacitu, je nutné pro rovnoměrné rozložení napětí doplnit kondenzátory paralelními rezistory nebo aktivním děličem napětí. Sledovanou vlastností superkondenzátoru je proto velikost vnitřního sériového odporu. Stárnutí superkondenzátoru se projevuje zvyšováním vnitřního sériového odporu a snižováním kapacity.

V praktických provedeních pro elektrickou trakci se používají sérioparalelní zapojení superkondenzátorů na napětí okolo 600 V s kapacitou v rozmezí 60 - 80 F.

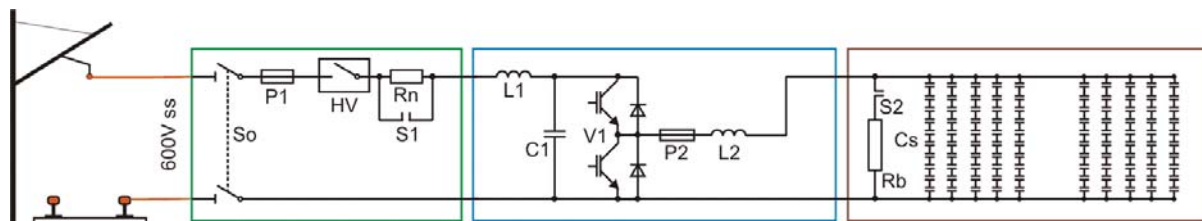
5.4 Koncepce stacionárního superkondenzátorového akumulátoru

Stacionárním superkondenzátorovým akumulátorem je myšleno samostatné akumulční zařízení umístěné v blízkosti trakčního vedení nebo v měničce, které je možno přímo připojit k trakční síti.

Superkondenzátorový akumulátor samozřejmě nemůže být tvořen pouze samotnou superkondenzátorovou baterií. Pro využití veškeré energie uložené v baterii je nutný vhodný polovodičový měnič, který je schopen pracovat v režimu zvyšování napětí – odčerpávání energie z baterie, i režimu snižovacím pro regulaci nabíjení baterie. Nabíjecí a vybíjecí výkon superkondenzátorové baterie je omezen oteplením superkondenzátorového článku.

Obvodová schémata jednotlivých bloků s popisem jsou patrná na *Obr. 10.* Celé zařízení lze rozdělit do tří základních bloků. Zeleně označený blok představuje vstupní obvody s elektrickými přístroji. Modře označený blok představuje část měniče

s polovodičovými prvky a filtry a konečně hnědě označený blok představuje vlastní baterii superkondenzátorů s nouzovými el. přístroji.



- So – Odpojovač akumulátoru
- P1 – Hlavní pojistka silových obvodů
- HV – Hlavní vypínač – stejnosměrný rychlovypínač
- Rn – Nabíjecí odpor
- S1 – Provozní stykač k přemostění Rn
- L1 – Tlumivka filtru
- C1 – Kapacitor filtru
- V1 – Měnič napětí – blok IGBT tranzistorů a diod
- P2 – Ochranná pojistka
- L2 – Tlumivka pro zvyšovací chod měniče
- S2 – Stykač nouzového vybití kondenzátorové baterie
- Rb – Vybíjecí odporník pro nouzové vybití
- Cs – Sada superkondenzátorů

Obr. 10. Schéma stacionárního superkondenzátorového akumulátoru

Z Obr. 10. je patrná jistá analogie s trakčním obvodem samotného vozidla. Tato skutečnost přináší možnost využít stejné elektrické přístroje, např. hlavní vypínač HV, jako jsou použity na hnacím vozidle. Stejně tak je tomu u měniče, lze použít shodný modul s IGBT tranzistory a zpětnými diodami jaký je použit u trakčního střídače.

Technická data reálného superkapacitorového akumulátoru vyráběného společností Siemens naleznete v Příloze 4.

5.5 Systém řízení stacionárního superkondenzátorového akumulátoru

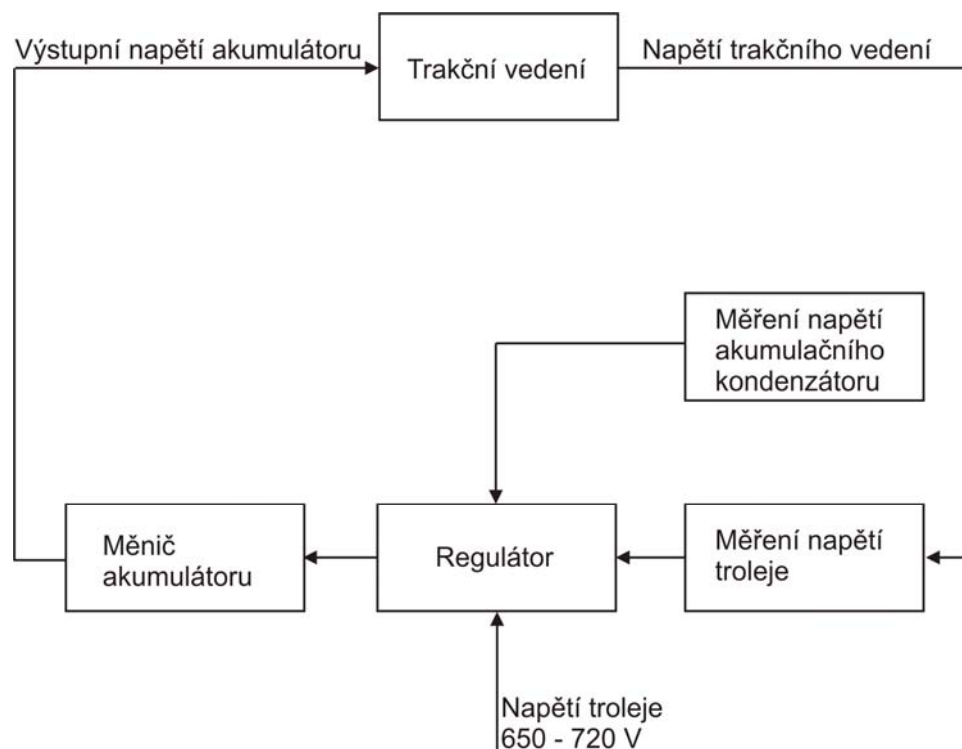
Nejjednodušším způsobem řízení stacionárního superkondenzátorového akumulátoru je řízení podle napětí v trakční síti v místě připojení akumulátoru. V podstatě postačí když se akumulátor bude řídit na konstantní napětí v síti.

Následující tabulka znázorňuje princip řízení pro tři základní režimy akumulátoru – nabíjení, vybití a nečinnost. Tabulka je navržena pro napájecí systém 600 V, kde je napájecí napětí měřírny nastaveno na 720 V.

Napětí v místě akumulátoru	Popis situace	Pracovní podmínka	Režim akumulátoru
650 - 720V	Napájecí úsek je zcela odlehčen, nenachází se v něm žádné vozidlo	Žádná	Nečinnost
< 650V	V napájecím úseku vznikl úbytek napětí, pravděpodobně se v něm nachází vozidlo, které odebírá trakční proud	Akumulátor je alespoň částečně nabit	Vybíjení
>720V	V trakčním vedení je krátkodobé přepětí, pravděpodobně v napájecím úseku rekuperuje nějaké vozidlo	Akumulátor je alespoň částečně vybit	Nabíjení

Tabulka 3. Podmínky řízení stacionárního akumulátoru

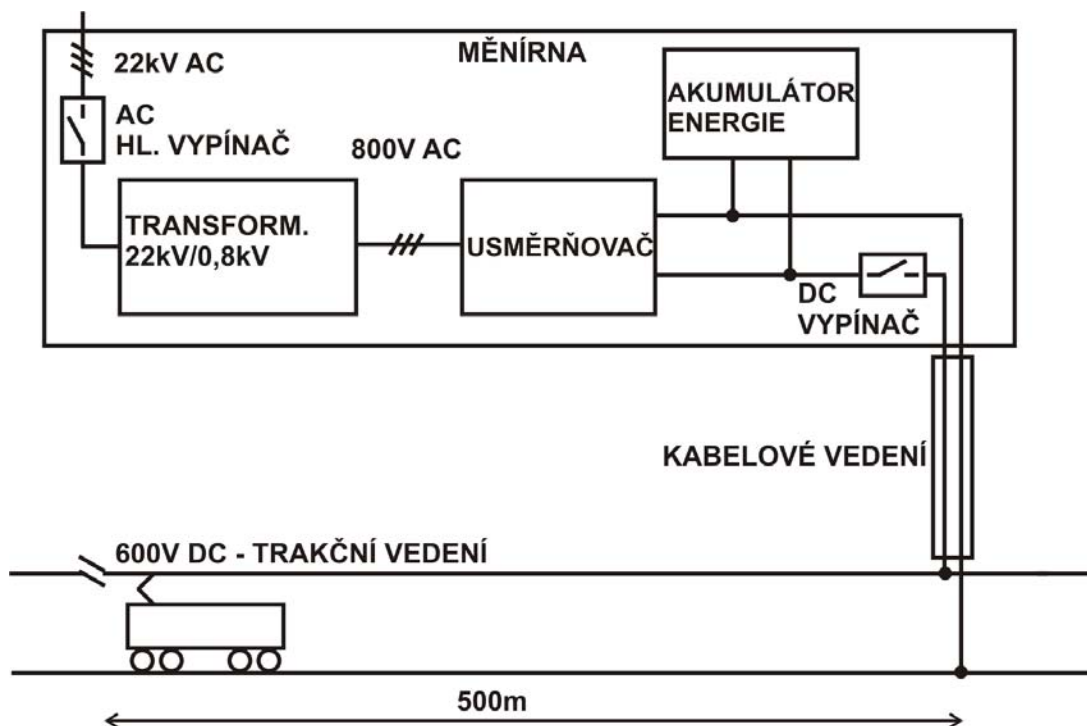
Regulační smyčka, která zajistí požadovanou funkci je na následujícím regulačním schématu.



Obr. 11. Regulační smyčka stacionárního akumulátoru

5.6 Varianty umístění stacionárního akumulátoru

Tato kapitola má přinést podrobnější rozbor hlavních aspektů, které vyvstanou při otázce, kam nejlépe umístit stacionární akumulátor. První variantou je umístění v měničně, viz. Obr. 12.



Obr. 12. Schéma trakční sítě s akumulátorem v měničně

Napájení úseku trakčního vedení do středu kabelovým vedením z měničny, je často užívaná topologie trakční sítě u městských tramvajových drah. Zjevnou výhodou tohoto řešení, je umístění akumulátoru ve stávajícím prostoru pro pevná trakční zařízení, v jejich bezprostřední blízkosti. Není nutno řešit, například zastřešení nebo zabezpečení neoprávněného přístupu osob.

Hlavní nevýhodou tohoto řešení je ta skutečnost, že veškerá energie vyrobená vozidlem, která nebude spotřebována musí putovat k akumulátoru po dlouhém trakčním a kabelovém vedení a je tak zatížena ztrátami na těchto vedeních. Často užívaná konfigurace trakčního vedení jsou dva prosté trolejové dráty, nad každou kolejí jeden. Pro kabelová vedení jsou používány jednožilové kabely. Parametry těchto vedení jsou uvedeny v Tabulce 14. Odpor zpětného kolejového vedení lze vzhledem k velikosti odporu trakčního nadzemního vedení zanedbat.

Pro orientaci uvádím jednoduchý příklad. Mějme vozidlo v koncové části úseku tramvajového trakčního vedení, které rekuperuje výkonem 180kW. Trakční

vedení je tvořeno dvojicí trolejových drátů o průřezu 150mm^2 , které jsou galvanicky propojeny. Vzdálenost vozidla k místu napájení kabelovým vedením je 500m. Kabelové vedení do měničny k akumulárnímu zařízení je dlouhé 500m. Napětí trakční sítě je 600V DC.

Pak činí odpor trakčního vedení:

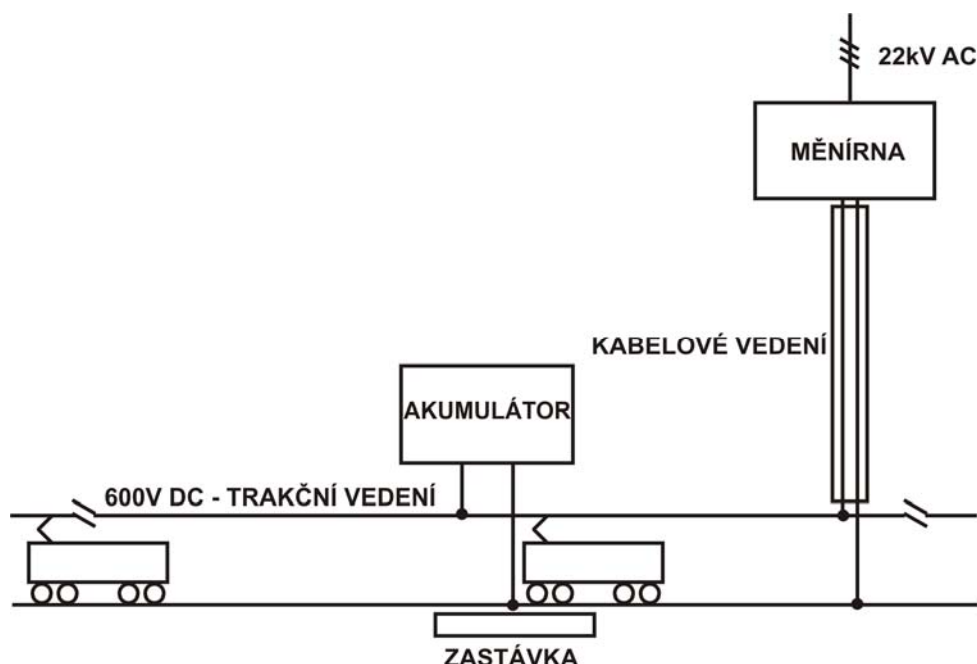
$$R_{tv} = \frac{R_v}{2} \cdot l = \frac{0,1195}{2} \cdot 0,5 = 0,03\Omega$$

a odpor kabelového vedení:

$$R_{kv} = 2 \cdot R_k \cdot 0,5 = 2 \cdot 0,0625 \cdot 0,5 = 0,063\Omega$$

Proud tekoucí vedeními bude 300A. To způsobí ztráty na trakčním vedení 2,7kW, což činí 1,5% z celkového rekuperovaného výkonu a ztráty na kabelovém vedení 5,67kW, což představuje 3,15% z celkového rekuperovaného výkonu.

Celkové ztráty na vedeních tedy činí 4,65% a dá se říci, že převyšují ztráty v moderních trakčních měničích. Z uvedeného vyplývá, že tato varianta umístění akumulátoru není zcela optimální. Větší ztráta je způsobena na kabelovém vedení, proto se nabízí varianta umístění akumulátoru přímo v blízkosti trati. Pro snížení ztrát na trakčním nadzemním vedení je vhodné vytipovat místo, kde vozidla pravidelně brzdí a generují energii a zde v bezprostřední blízkosti umístit akumulátor. Schéma této varianty je na *Obr. 13*.

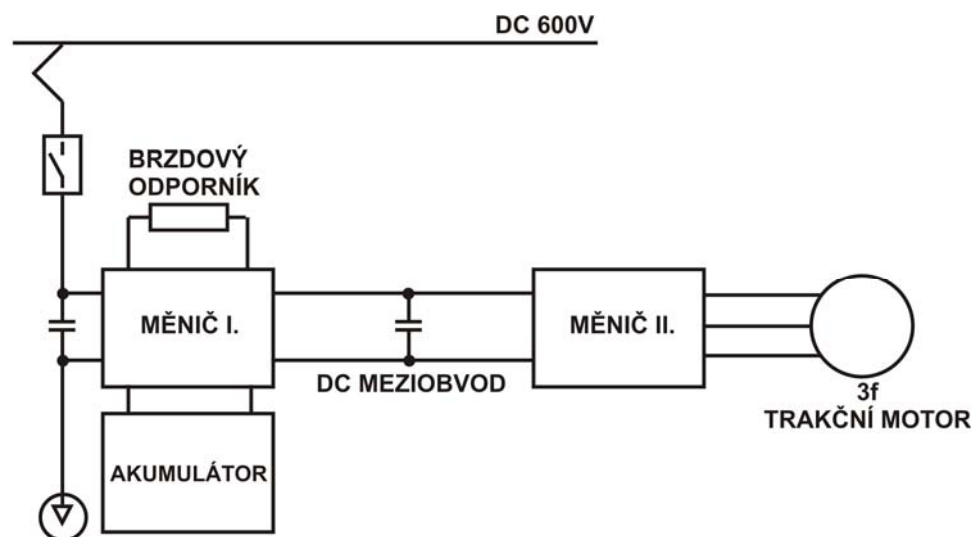


Obr. 13. Schéma trakční sítě s akumulátorem u trati

Jak již bylo uvedeno, při vhodném umístění akumulátoru odpadne většina ztrát na vedeních. Tato varianta si však vyžádá stavbu volně stojícího VN zařízení s nutností zajistit bezpečnost veřejnosti, ochranu proti povětrnostním vlivům a protipožární opatření. Toto řešení je však velice vhodné pro stávající tratě i vozový park, protože není nutná rekonstrukce měřičů ani modernizace vozidel. Důležitým aspektem je správně stanovit pozici akumulátoru u trati, aby byl optimálně využit. Touto problematikou se zabývá jedna z dalších kapitol práce.

5.7 Koncepte vozidlového superkondenzátorového akumulátoru

Ideální z hlediska ztrát je zástavba akumulátoru přímo do trakčního obvodu vozidla, viz *Obr. 14*. Důležitou podmínkou je dostatek prostoru ve vozidle pro stále ještě poměrně rozměrný a těžký akumulátor. Tato varianta je velice výhodná v tom, že není třeba zvláštních vstupních obvodů s drahými elektrickými přístroji. Akumulátor se v tomto případě sestává pouze ze superkondenzátorové baterie, která je připojena k Měniči I., který zajistí řízení nabíjecího a vybíjecího proudu. Tato koncepce si vyžádá složitější řešení Měniče I. a jeho algoritmus řízení, který musí být schopen pracovat ve zvyšovacím režimu. Z toho plyne potřeba hmotné a drahé tlumivky. Pokud pojedou vozidlo delší dobu ze spádu a trakční síť nebude schopna přijímat energii a zároveň bude již plně nabit mobilní akumulátor, přejde vozidlo do režimu elektrodynamického brzdění do odporníku.



Obr. 14. Umístění akumulátoru ve vozidle

6 Trakční mechanika městské dráhy

Pro další úvahy o umístování akumulátorů energie a optimalizaci topologie trakční sítě se zaměřím na městskou tramvajovou dopravu.

Je nutno definovat rozhodující odpory vozidla, které je nutno nenávratně pokrýt a odpory trati, z nichž některé jsou zdrojem energie pro rekuperaci.

Tato kapitola si klade za cíl teoreticky pojednat o silách působících proti smyslu pohybu vozidla, tedy silách, které musí vozidlo překonat, aby se pohybovalo buď rovnoměrnou rychlostí nebo s požadovaným zrychlením či zpomalením. Touto problematikou se zabývá řada publikací, ovšem pouze v kontextu s železniční dopravou. Zde bude kladen důraz výhradně na problematiku vozidel a tratí tramvajové dopravy a vyčlenění nejvýraznějších činitelů trakčního odporu. Z uvedených vztahů a úvah je možno po dosazení hodnot pro konkrétní vozidla a trať získat potřebný výkon vozidla pro průjezd uvažovanou tratí v požadovaných jízdních dobách.

6.1 Pohybová rovnice

Trakční odpor se skládá z řady dílčích odporů, tyto odpory pro zjednodušení a zpřehlednění výpočtů používáme v jednotném tvaru měrného odporu p [N/kN].

Pro všechny fáze pohybu vozidla nebo soupravy lze psát rovnici ve tvaru:

$$F_t = G(p_t + p_v \pm p_z) \quad [6.1.1]$$

F_t – tažná síla vozidla [kN]

G – tíha vozidla [kN]

p_v – měrné vozidlové odpory [N/kN]

p_t – měrné traťové odpory [N/kN]

p_z – měrný odpor ze zrychlení [N/kN]

Ve fázích pohybu 2. a 3. je složka p_z nulová, ve fázi 1. je kladná a ve fázi 4. záporná.

Detailní rozbor fyzikální podstaty a výpočtu traťových odporů naleznete v Příloze 11 a vozidlových odporů v Příloze 12.

6.2 Empirické vztahy pro výpočet celkového vozidlového odporu

Vyjádření vozidlového odporu jako algebraického součtu odporu v ložiskách, odporu valení a odporu vzduchu podle předchozích úvah je velmi pracné a

vypočítané hodnoty je nutno prakticky ověřovat. Vozidlový odpor ovlivňuje řada faktorů, jejichž vliv je matematicky velmi obtížně popsitelný.

Proto doporučuji pro výpočty vozidlového odporu použít empirické vzorce vzniklé na základě vyhodnocení měření na konkrétních vozidlech. Všeobecný tvar těchto vzorců je níže uvedený polynom druhého stupně.

$$p_v = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \left[\frac{N}{kN} \right], \quad [6.2.1]$$

kde a, b, c jsou koeficienty polynomu vypočítané metodou nejmenších čtverců z naměřených hodnot a V je rychlost pohybu zkoumaného vozidla v km/h.

Pro vozidla MHD jsou dostupné tyto vztahy:

a) dvounápravové tramvaje o hmotnosti do 20t

$$p_v = 5 + b \cdot V + 0,00096 \cdot V^2 \left[\frac{N}{kN} \right] \quad [6.2.2]$$

b) dvounápravové tramvaje o hmotnosti do 44t

$$p_v = 4,4 + b \cdot V + 0,00064 \cdot V^2 \left[\frac{N}{kN} \right] \quad [6.2.3]$$

c) čtyřnápravové tramvaje s uspořádáním podvozků B' o B' o lehké konstrukce s proudnicovým tvarem s koly s gumovými pružnými vložkami.

$$p_v = 3,65 + \frac{14,5}{A_0} + 0,045 \cdot V + \frac{44 \cdot S \cdot V^2}{A_0 \cdot n_n} \cdot 10^{-4} \left[\frac{N}{kN} \right] \quad [6.2.4]$$

A_0 – nápravové zatížení [t]

V – rychlost vozidla [km/h]

S – velikost průmětu čelní plochy vozidla [m²]

n_n – počet dvojkolí [-]

d) článková tramvaj typu KT 4D s uspořádáním dvojkolí B' o B' o o hmotnosti 19,9t

$$p_v = 5 + 0,072 \cdot V + 0,00144 \cdot V^2 \left[\frac{N}{kN} \right] \quad [6.2.5]$$

e) tramvaj typu T5 s uspořádáním dvojkolí B' o B' o o hmotnosti 17,6t

$$p_v = 5 + 0,00552 \cdot V + 0,00305 \cdot V^2 \left[\frac{N}{kN} \right] \quad [6.2.6]$$

6.3 Odpor ze zrychlení vozidla

Tento odpor se projevuje pouze při jízdě nerovnoměrnou rychlostí, kdy k pasivním traťovým a vozidlovým odporům přistupuje ještě reakce hmoty způsobená její setrvačností. Síly potřebné ke zrychlení či zpomalení hmoty vozidla jsou tzv. urychlující či zpomalující síly F_z . Odpor zrychlení p_z je mnohonásobně větší než pasivní odpory na vodorovné trati při rovnoměrném pohybu. Nejvíce jej ovlivňují hmotnost vozidla a velikost zrychlení.

Odvození síly F_z :

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a \quad [N; kg, m \cdot s^{-2}] \\ F_z &= 1000 \cdot m \cdot \frac{a}{3,6} \quad [N; t, km / h, s] \\ F_z &= 277,7 \cdot m \cdot a = 277,7 \cdot \frac{G}{g} \cdot a \\ F_z &= \pm 28,32 \cdot G \cdot a \quad [N; kN, km / h \cdot s] \end{aligned}$$

$$p_z = \pm 28,32 \cdot a \left[\frac{N}{kN} \right] \quad [6.3.1]$$

Při respektování součinitele rotačních hmot ρ zohledňujeme zvýšení měrného odporu vozidla při zrychlení či zpomalení, protože u vozidel existují značné rotující hmoty (dvojkolí, kotvy trakčních motorů, převodovky, klikové mechanismy). Tyto hmoty zvyšují potřebnou zrychlující či zpomalující sílu F_z .

Pro tramvaje je vhodná hodnota součinitele rotačních hmot $\rho = 1,2 - 1,25$, pak dostáváme výsledný tvar vztahu pro odpor zrychlení:

$$p_z = \pm 28,32 \cdot \rho \cdot a \quad [6.3.2]$$

6.4 Trakční mechanika a energetika

Z předchozích statí získáváme všechny veličiny figurující v pohybové rovnici tramvajové soupravy, tím získáváme pro konkrétní místo trati a rychlost

požadovanou tažnou sílu a tím i potřebný výkon tramvaje. Pokud započítáme účinnost trakčních zařízení tramvaje a přičteme odběry pomocných pohonů, dostáváme příkony vozidla v jednotlivých místech trati. Při řešení vhodným algoritmem můžeme získat model spotřeby vozidla na lince a tím i přehled o množství přebytečné energie, kterou je možno rekuperovat při jízdě vozidel ze spádu. Velikost tažné síly je samozřejmě limitována adhezními podmínkami, dovoleným zrychlením či zpomalením soupravy a maximálním výkonem vozidla.

Nabízí se také úvaha, že při delších soupravách se každá část soupravy nachází v jiné partii trati a je tak vystavena rozdílným traťovým odporům. Tento problém se řeší pouze v železniční dopravě, kde jsou délky souprav v řádech stovek metrů, pro krátké tramvajové soupravy a vozidla, lze tuto skutečnost zanedbat.

7 Teorie energetických výpočtů pro kolejová vozidla

MHD

7.1 Cíle výpočtů

Cílem výpočtu je stanovit celkovou elektrickou energii, kterou spotřebuje či vyrobí jediné vozidlo nebo souprava při průjezdu tramvajovou linkou v obou směrech. Celková elektrická energie bude součtem energií spotřebovaných či vyrobených v dílčích úsecích linky. Za dílčí úseky linky se jeví nejvhodnější stanovit jednotlivé izolované úseky trakčního vedení, viz. *Příloha 1*.

V těchto úsecích je nutno provést měření sklonových poměrů, zaměření zastávek a měření dynamiky vozidla ve skutečném provozu - tachogram.

Pro každý úsek je nutno vypočítat specifickou spotřebu na krytí trakční práce a specifickou spotřebu energie pro vozidlo jedoucí podle naměřeného tachogramu. Z těchto poměrných veličin je možno dopočítat skutečné spotřeby pro konkrétní obsazenost, vozidlo a konkrétní způsob regulace výkonu vozidla.

Dále je nasnadě provést vyhodnocení spotřeb v jednotlivých úsecích. Z těchto poznatků navrhnout změny vedoucí ke snížení spotřeby el. energie. Výhodnost těchto změn je zhodnocena provedeným výpočtem a srovnáním se současnou situací.

7.2 Výpočet redukováného sklonu

Cílem výpočtu redukováného sklonu je pro jednotlivé úseky určit průměrný sklon se zřetelem na délku sklonu. Pro výpočet je použit následující vztah:

$$s_{red} = \frac{s_1 \cdot l_1 + s_2 \cdot l_2 + \dots + s_n \cdot l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \left[\frac{N}{kN}; \frac{N}{kN}, m \right], \quad [7.2.1]$$

kde s je sklon a l je délka úseku s příslušným sklonem.

7.3 Výpočet specifické spotřeby na krytí trakční práce

Tato veličina vyjadřuje, kolik energie ve Wh se spotřebuje na krytí trakční práce pro jeden tkm. Trakční práci se rozumí krytí odporu ze stoupání, odporu v oblouku a vozidlového odporu při dané účinnosti pohonu. Odvození použitých vztahů, viz. Literatura [1].

Výpočet se provede s použitím následujícího empirického vztahu:

$$a = 2,724 \cdot \frac{p_0 + s}{\eta} \left[\frac{kW}{tkm}; \frac{N}{kN}, \frac{N}{kN}, - \right], \quad [7.3.1]$$

kde

a je specifická spotřeba na krytí trakční práce,

p_0 je vozidlový odpor – pro tramvaje se používá hodnota 7,5 N/kN,

s je sklon v promilích, ve výpočtech použijeme dříve vypočtený redukovaný sklon,

η je účinnost pohonu, která se u tramvají obecně blíží hodnotě 0,8

7.4 Specifická spotřeba el. energie

Specifická spotřeba energie vyjadřuje elektrickou energii ve Wh, která je potřeba k průjezdu úseku se zastaveními v zastávkách a následnými rozjezdy na traťovou rychlost, tedy zahrnuje nejen traťové a vozidlové odpory, ale i spotřebu energie na rozjezdy a brzdění.

Odvození použitého vztahu, viz Literatura [1].

$$w = a + n \cdot \frac{v_r^2 \cdot b}{l} \left[\frac{kWh}{tkm} \right], \quad [7.4.1]$$

kde

w je specifická spotřeba energie,

a je specifická spotřeba energie na krytí trakční práce,

n je počet zábrzdňných a rozjezdových pochodů v úseku

v_r je rozjezdová rychlost – rychlost na kterou se vozidlo rozjíždí ze zastávky

b je součinitel ztrát spouštěním a brzděním

l je vzdálenost zastavení

Součinitel ztrát spouštěním a brzděním b je pro různé způsoby regulace výkonu následující:

vozidlo s odporovou regulací výkonu: $b = 0,0298$

vozidlo s pulzní regulací: $b = 0,0208$

vozidlo s elektronickou regulací výkonu s rekuperačním brzděním: $b = 0,01218$

Rozjezdová rychlost v_r je stanovena z naměřeného tachogramu, viz. dále.

Popisy jednotlivých způsobů pohonu, pro něž jsou zde stanovena b jsou popsány v Příloze 10.

8 Aplikace výpočtové metodiky na reálnou linku MHD

8.1 Odůvodnění výběru linky

Pro návrh metodiky stanovení energetické bilance linek MHD v Plzni byla jako vzorová vybrána tramvajová linka č. 4 Bory - Košutka. Tato linka byla zvolena, protože se jedná o „páteřní“ linku s nejkritičtějším vlivem na fungování MHD v Plzni a to i přes skutečnost, že jde o nejkratší tramvajovou linku v Plzni.

Další důležité aspekty výběru souvisí zejména s jejím výškovým profilem, který je dán především táhlými stoupáními z centra na Bory a na Košutku. Téměř výlučně pouze na této lince jezdí největší tramvajové soupravy KT8D5 o délce 30,3m. Dále se na této lince využívají vozy T3M a T3P, které umožňují rekuperaci elektrické energie při brzdění. Tyto rekonstruované vozy měly svým nasazením přinést dopravnímu podniku úsporu elektrické energie. Očekávané výsledky okolo 20% uspořené energie, se však nedostavily.

8.2 Rozdělení linky č. 4 PmDP

Pro potřeby výzkumu linky, byla linka rozdělena do úseků, dle níže uvedené tabulky. Úseky odpovídají jednotlivým izolovaným úsekům trakčního vedení viz. Příloha 1.

Název úseku	Délka úseku [km]
úsek 1 - Šídlovák	0,963
úsek 2 - Košutka	0,858
úsek 3 - Cizinecký dům	0,577
úsek 4 - Lochotín	0,898
úsek 5 - Rondel	1,15
úsek 6 - Pošta	0,151
úsek 7 - Hlávková	0,992
úsek 8 - Chodské nám.	0,546
úsek 9 – Bory	1,005

Tabulka 4. Rozdělení linky č. 4 do napájecích úseků

Kilometráž linky je započata v zastávce Košutka kilometrem 0,0 a ukončena v zastávce Bory kilometrem 7,2.

Sled zastávek pro nástup a výstup cestujících je následující:

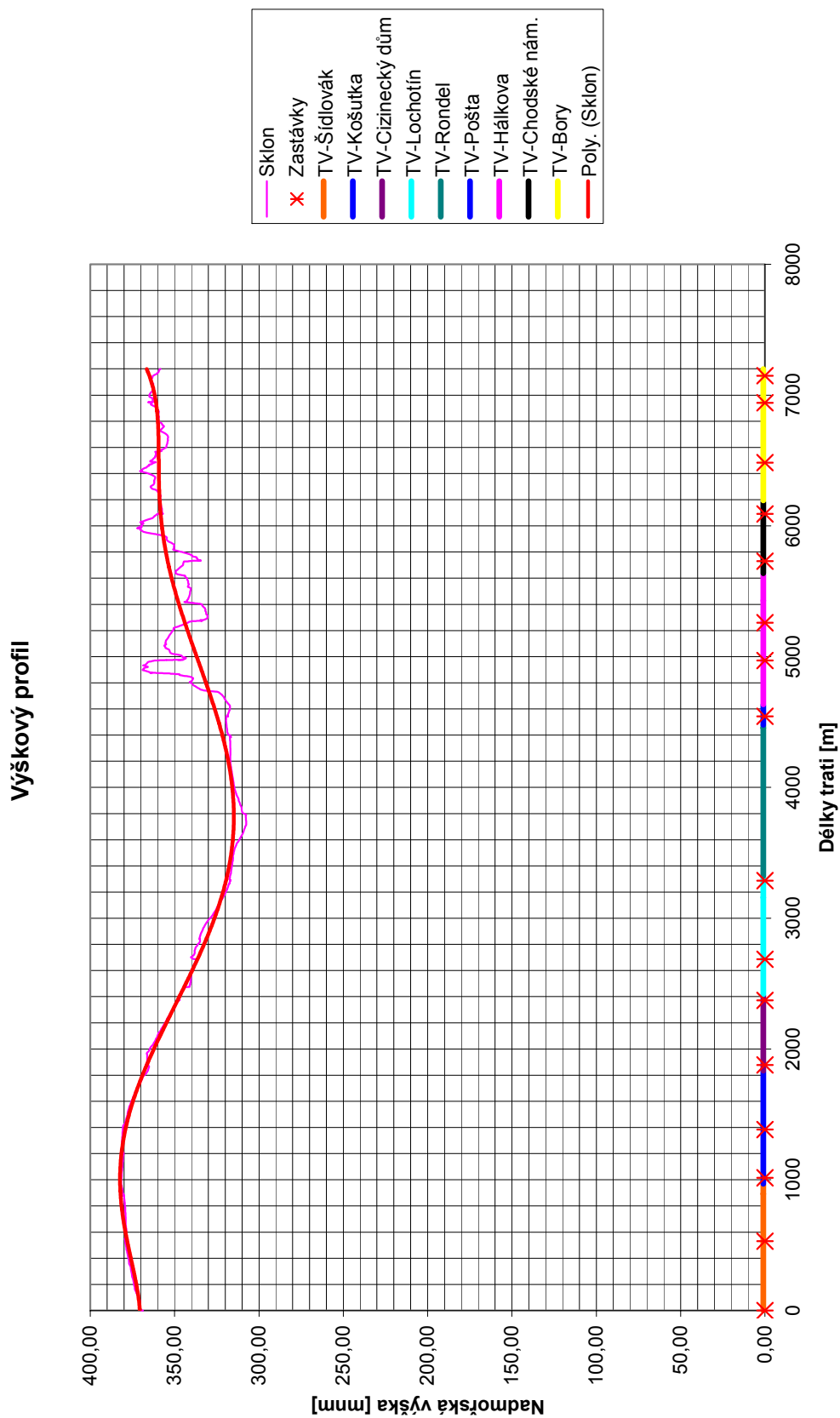
1	Košutka
2	Plzeňka
3	Severka
4	Sokolovská
5	U Družby
6	Ulice Boženy Němcové
7	Lékařská fakulta, Karlovarská
8	Pod Záhorskem
9	V sadech Pětatřicátníků
10	U Práce, Klatovská
11	Masarykovo náměstí
12	Chodské náměstí
13	Dobrovského, Klatovská
14	Náměstí Míru
15	Dvořákova
16	Bory

8.3 Měření v reálném provozu

Pro aplikaci výpočtových metod z předchozí kapitoly Teorie energetických výpočtů pro kolejová vozidla je nutné znát směrové, sklonové a provozní poměry na trati. Pro získání nejreprezentativnějšího vzorku – tramvajové soupravy projíždějící trať, bylo provedeno měření pomocí moderního GPS zařízení instalovaného v soupravě dvou vozidel T3M (konkrétně ve voze ev. č. 312) obsazených ze 75% kapacity a pohybujících se po trati středně zatížené dopravním provozem (cca 11:45 hod), dle jízdního řádu PmDP v roce 2007.

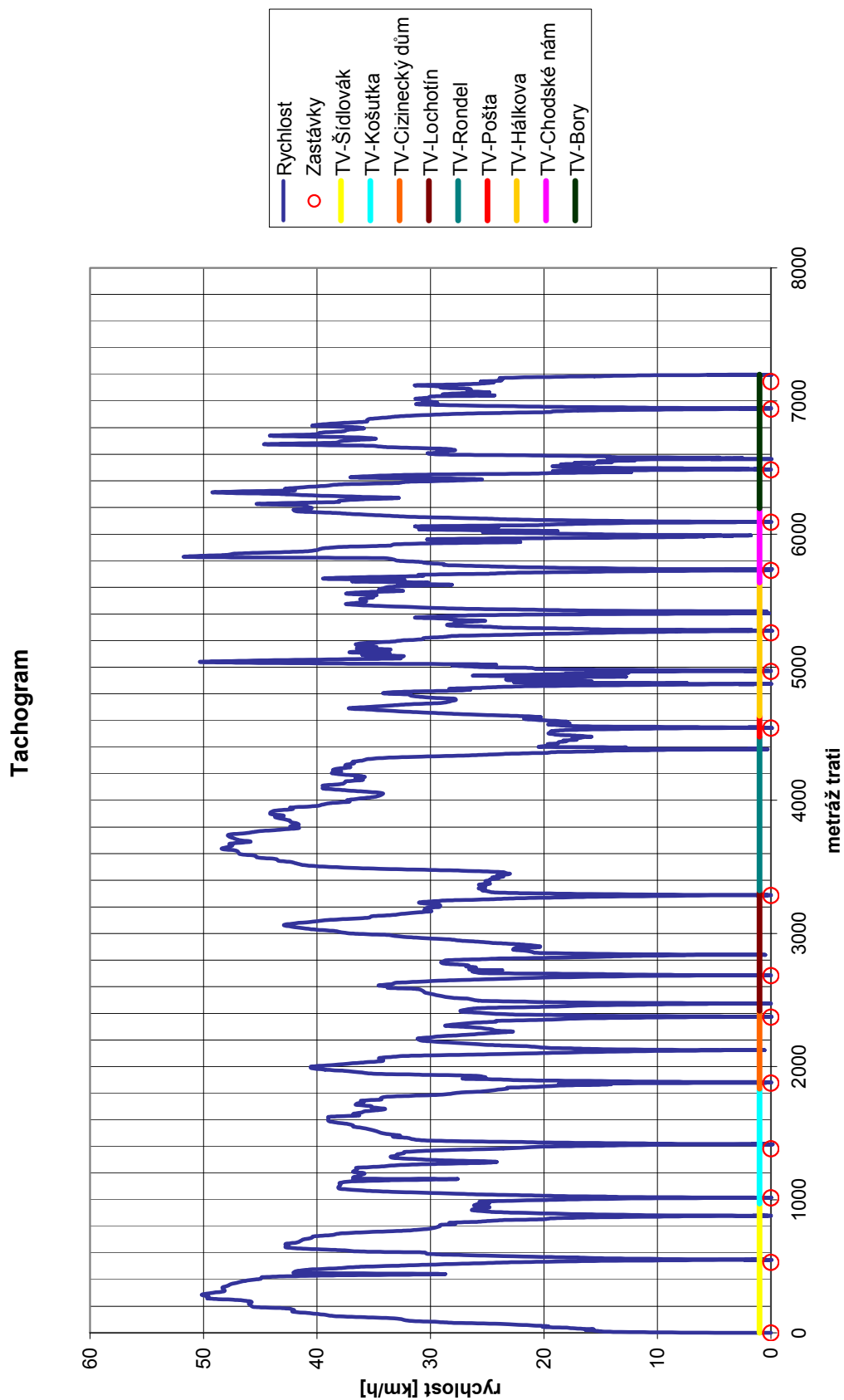
Uvažujeme dvojici tramvají T3M, neboť ty jsou provozovány jak v původním provedení pohonu s odporovou regulací, tak s pulzním měničem, tak i s pohonem umožňujícím rekuperaci. To nám poskytne možnost srovnání všech základních druhů pohonu. Hmotnost soupravy uvažujeme 41t, kde 16,5t váží jedna tramvaj a 8t cestující (celkem 100 osob v celé soupravě). Vozidlový odpor soupravy uvažujeme 7,5 N/kN.

Během měření byla zaznamenávána rychlost soupravy, nadmořská výška a byly zaměřeny zastávky. Technické parametry měřícího zařízení jsou uvedeny v Příloze 2. Z naměřených hodnot byl vytvořen výškový profil trati, viz. následující graf.



Obr. 15. Výškový profil linky č. 4 PmDP

Z výškového profilu je jasně vidět naplnění předpokladu provést měření a výpočty na sklonově členité a náročné trati. Na ose x je vynesena poloha jednotlivých napájecích úseků, jako různobarevných čar, viz. legenda grafu. Zastávky na lince jsou vyznačeny jako červené kříže na ose X . Tento popis je použit i v následujícím grafu získaném měřením, který zobrazuje tachogram jízdy výše popsané soupravy. Z tohoto grafu je tedy snadno čitelná rychlost, zrychlení či zpomalení vozidla v jednotlivých napájecích úsecích a zastávkách.



Obr. 16. Tachogram jízdy

8.4 Vyhodnocení tachogramu

Z výše uvedené teorie trakčních energetických výpočtů je zřejmé, že pro další výpočty bude nutné z naměřeného tachogramu vyhodnotit zejména počet zastavení v jednotlivých úsecích, rychlost na kterou se v daném úseku vozidlo rozjíždí či z ní brzdí a vzdálenost jednotlivých zastavení.

Název úseku	Střední rozjezdová rychlost [km/h]	Počet zastavení		Střední vzdálenost zastavení [km]
		Směr Košutka - Bory	Směr Bory - Košutka	
úsek 1 - Šídlovák	46	2	2	0,53
úsek 2 - Košutka	38	2	2	0,37
úsek 3 - Cizinecký dům	33	3	2	0,247
úsek 4 - Lochotín	36	2	2	0,602
úsek 5 - Rondel	49	1	0	
úsek 6 - Pošta	18	1	1	
úsek 7 – Hlávková	38	2	2	0,289
úsek 8 - Chodské nám.	47	2	2	0,362
úsek 9 - Bory	37	2	2	0,456

Tabulka 5. Vyhodnocení tachogramu

8.5 Výpočet redukováného sklonu zkoumaných úseků

Délky jednotlivých sklonů a sklony samotné byly naměřeny přímo na trati pomocí externího on-line GPS přístroje a zpracovávány v přenosném PC. Naměřená data byla verifikována dalším měřením s jiným GPS přístrojem.

GPS data byla zpracována v programu MS Excel. Zeměpisná šířka a délka byly přepočteny na metrickou vzdálenost podle následujícího vztahu.

$$l = \sqrt{((x_1 - x_2) \cdot \Delta_1)^2 + ((y_1 - y_2) \cdot \Delta_2)^2} [m], \quad [8.5.1]$$

kde

l je metrická vzdálenost x údaj o zeměpisné šířce ve stupních a y údaj o zeměpisné délce.

Δ_1 – převáděcí poměr šířky pro zem. polohu Plzně [111132m = 1°]

Δ_2 - převáděcí poměr délky pro zem. polohu Plzně [81410m = 1°]

Příklad výpočtu

Úsek Košutka:

Sklon [N/kN]	Délka [m]
0	180
- 15,5	193
- 22,4	490

$$s_{red} = \frac{0 \cdot 180 - 15,5 \cdot 193 - 22,4 \cdot 490}{858} = -16,3 \frac{N}{kN}$$

Vypočtené hodnoty

Znaménko sklonu platí pro směr Košutka – Bory.

Název úseku	Redukovaný sklon [N/kN]
úsek 1 – Šídlovák	10,4
úsek 2 – Košutka	-16,3
úsek 3 – Cizinecký dům	-38
úsek 4 – Lochotín	-32,3
úsek 5 – Rondel	-0,9
úsek 6 – Pošta	0
úsek 7 – Hlávkova	30,2
úsek 8 – Chodské nám.	18,3
úsek 9 – Bory	7

Tabulka 6. Redukované sklony ve zkoumaných úsecích

8.6 Výpočet specifické spotřeby na krytí trakční práce

Odpor z oblouku bylo možno pro linku č.4 v Plzni zanedbat, protože na lince se nevyskytuje žádný oblouk malého poloměru, který by se nějak projevil v energetické bilanci linky.

Příklad výpočtu

Úsek Košutka:

$$a = 2,724 \cdot \frac{p_0 + s}{\eta} = 2,724 \cdot \frac{7,5 - 16,3}{0,8} = -30 \frac{Wh}{tkm}$$

Vypočtené hodnoty specifické spotřeby na krytí trakční práce

Název úseku	Spotřeba na krytí tr. práce [Wh/tkm]	
	směr Košutka - Bory	směr Bory - Košutka
úsek 1 - Šídlovák	60,9	-9,9
úsek 2 - Košutka	-30	81
úsek 3 - Cizinecký dům	-103,9	154,9
úsek 4 - Lochotín	-84,4	135,5
úsek 5 - Rondel	22,5	28,6
úsek 6 - Pošta	25,5	25,5
úsek 7 - Hlávková	128,4	-77,3
úsek 8 - Chodské nám.	87,8	-36,8
úsek 9 - Bory	49,4	1,7

Tabulka 7. Specifická spotřeba na krytí trakční práce

8.7 Výpočet specifické spotřeby elektrické energie

Specifická energie je vypočtena pro vozidlo s rekuperací, kde vyrobená energie je vozidlem následně spotřebována. To odpovídá situaci, kdy jsou na lince ideální podmínky pro rekuperaci, tzn. veškerá energie vyrobená brzdící tramvají je spotřebována.

Příklad výpočtu

Úsek Košutka:

$$w = a + n \cdot \frac{v_r^2 \cdot b}{l} = -30 + 2 \cdot \frac{38^2 \cdot 0,01218}{0,37} = 65,1 \frac{kWh}{tkm}$$

Vypočtené hodnoty specifické spotřeby v jednotlivých úsecích

Název úseku	Specifická spotřeba [Wh/tkm]	
	směr Košutka - Bory	směr Bory - Košutka
úsek 1 - Šídlovák	158,2	87,4
úsek 2 - Košutka	65,1	176,1
úsek 3 - Cizinecký dům	57,3	262,3
úsek 4 - Lochotín	-45,1	188
úsek 5 - Rondel	22,6	28,6
úsek 6 - Pošta	29,5	29,5
úsek 7 - Hlávková	250,1	44,4
úsek 8 - Chodské nám.	236,5	111,9
úsek 9 - Bory	122,5	74,8

Tabulka 8. Specifická spotřeba v jednotlivých úsecích linky

8.8 Výpočet skutečné spotřeby energie na krytí trakční práce

Níže uvedené hodnoty Skutečné spotřeby na krytí trakční práce A jsme získali, roznásobením a pro jednotlivé úseky jejich délkou a hmotností soupravy, jde tedy o hodnoty charakteristické pouze pro konkrétní vozidla na rozdíl od specifické spotřeby. V tomto kroku je dobře patrná jednoduchost konkretizace hodnot pro jednotlivá vozidla ze specifických veličin charakterizujících poměry trati provozu na ní.

Příklad výpočtu

Úsek Košutka:

$$A = a \cdot l \cdot m = -30 \cdot 0,858 \cdot 41 = -1055Wh$$

Vypočtené hodnoty

Název úseku	Skutečná spotřeba na krytí trakční práce [kWh]	
	Směr Košutka -Bory	Směr Bory - Košutka
úsek 1 - Šídlovák	2,35	-0,38
úsek 2 - Košutka	-1,06	2,78
úsek 3 - Cizinecký dům	-2,40	3,58
úsek 4 - Lochotín	-3,03	4,87
úsek 5 - Rondel	1,03	1,32
úsek 6 - Pošta	0,15	0,15
úsek 7 - Hlávková	5,09	-3,07
úsek 8 - Chodské nám.	1,92	-0,80
úsek 9 - Bory	1,98	0,07

Tabulka 9. Skutečná spotřeba na krytí trakční práce pro 2xT3M

8.9 Zhodnocení výsledků výpočtu skutečné spotřeby na krytí trakční práce

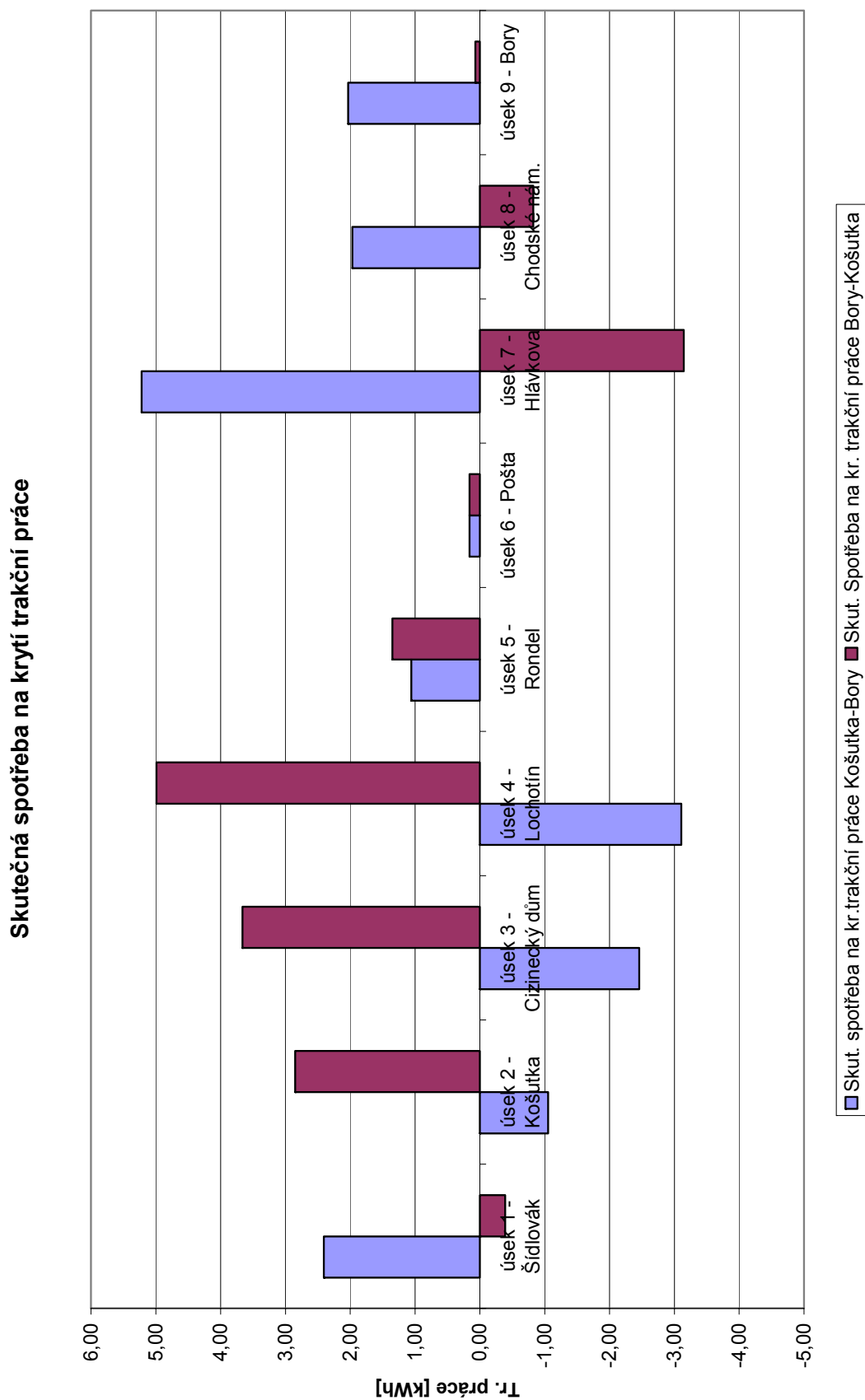
Ze získaných hodnot je dobře vidět, že ve směru Košutka – Bory v úsecích Košutka, Cizinecký dům, Lochotín nám značný sklon trati pokryje veškeré vozidlové odpory a ještě poskytuje zajímavé množství energie pro předání vozidlu v protisměru. V úseku Cizinecký dům by dokonce vozidlo mohlo předat vozidlu v protisměru 67% energie, kterou toto vozidlo potřebuje k pokrytí trakční práce.

Ve směru Bory – Košutka je nejvýraznější úsek Hlávková, kde vozidlo disponuje přebytkem energie, který tvoří 60% energie, kterou potřebuje k překonání trakčních odporů vozidlo v protisměru.

Tyto úvahy platí pro trakční práci a nezahrnují energetickou spotřebu rozjezdů vozidla. Zároveň se zde vůbec neuvažuje účinnost rekuperace, považuje se za 100%. Přesto nám získané hodnoty dobře vypovídají o tom, ve kterém úseku je

nejvýhodnější klást zvýšený důraz na vysokou pravděpodobnost a účinnost rekuperace. Jedná se o energetickou bilanci profilu trati.

Grafické znázornění výsledků je uvedeno v následujícím grafu.



Obr. 17. Skutečná spotřeba na krytí trakční práce pro 2xT3M

8.10 Výpočet skutečné spotřeby

Skutečná spotřeba tramvaje je vypočítána pro výše definovanou soupravu ze specifické spotřeby, platí proto při ideálních podmínkách pro rekuperaci.

Ideálními podmínkami rekuperace rozumějme, takové podmínky, při nichž vozidlo může energii vyrobenou při brzdění nebo udržování konstantní rychlosti na spádu předat jinému vozidlu, síti nebo ji samo později spotřebovat.

Ideálních podmínek rekuperace lze obecně dosáhnout optimalizací grafikonu v úseku trati, nasazováním vozidel schopných rekuperace, schopností měniřny vracet energii zpět do energetické sítě nebo umístěním akumulátoru elektrické energie buď na vozidlo nebo stacionárně k trati.

Příklad výpočtu

Úsek Košutka:

$$W = w \cdot l \cdot m = 65,1 \cdot 0,858 \cdot 41 = 2,29 \text{ kWh}$$

Vypočtené hodnoty skutečné spotřeby v jednotlivých úsecích

Název úseku	Skutečná spotřeba [kWh]	
	směr Košutka - Bory	směr Bory - Košutka
úsek 1 – Šídlovák	6,25	3,45
úsek 2 – Košutka	2,29	6,20
úsek 3 - Cizinecký dům	1,35	6,21
úsek 4 – Lochotín	-1,66	6,92
úsek 5 – Rondel	1,07	1,35
úsek 6 – Pošta	0,18	0,18
úsek 7 - Hlávková	10,17	1,81
úsek 8 – Chodské nám.	5,29	2,50
úsek 9 – Bory	5,05	3,08

Tabulka 10. Skutečná spotřeba v jednotlivých úsecích linky

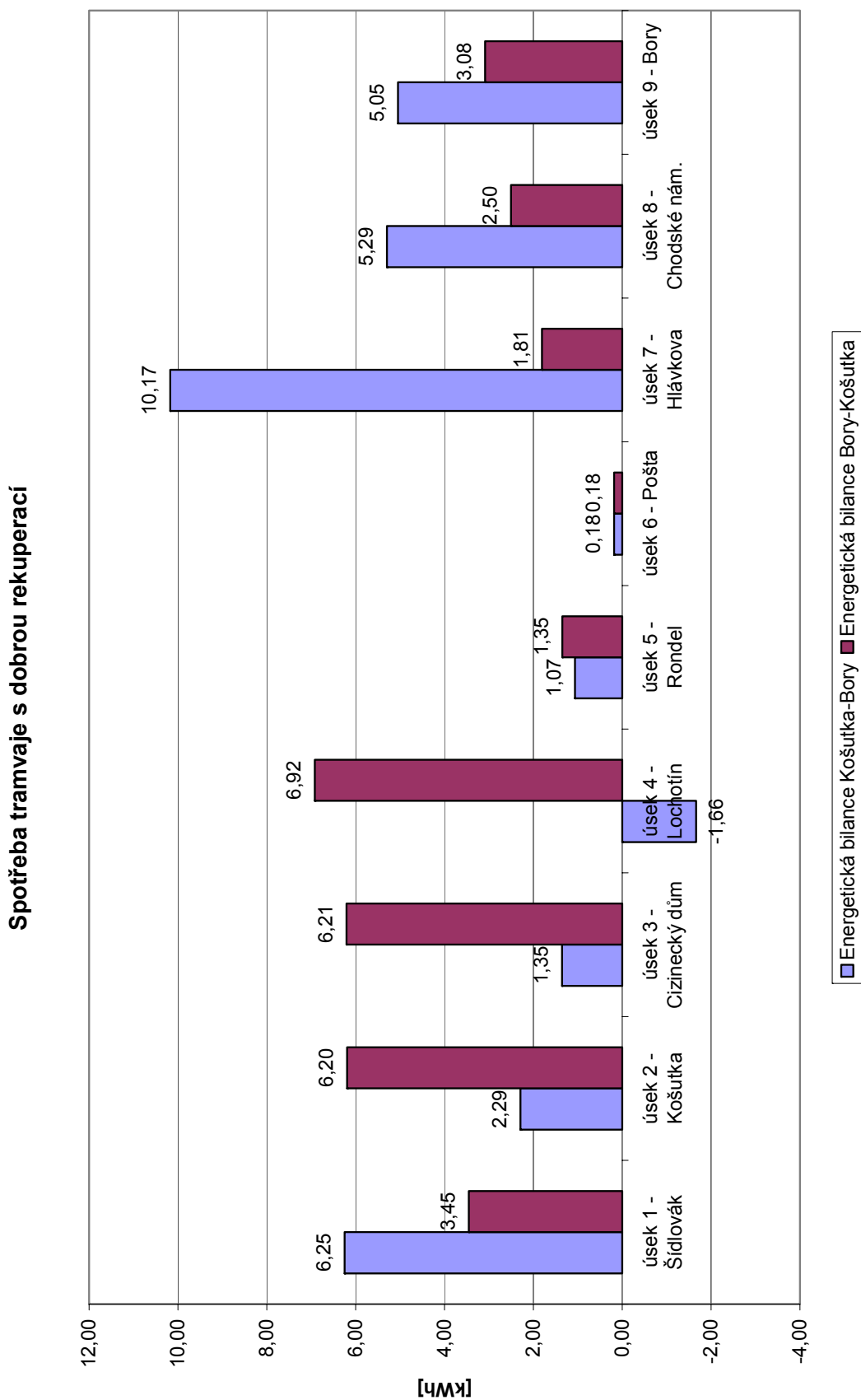
8.11 Zhodnocení výsledků výpočtů skutečné spotřeby el. energie

V následujícím grafu je znázorněna spotřeba definované soupravy s možností rekuperace a ideálními podmínkami pro rekuperaci.

Je dobře patrné, že vozidlo vykazuje spotřebu el. energie i v úsecích, kde sklon dává významný přebytek energie, který nejen pokryje trakční práci, ale dává i dostatek energie k rekuperaci. Toto je způsobeno spotřebou energie při rozjezdech vozidla. Z tachogramu je patrné že vozidlo se rozjíždí výkonem i na spádu až do traťové rychlosti a po jejím dosažení okamžitě přechází do brzdy (zejména jde o úseky Košutka, Cizinecký dům, Lochotín). To je z hlediska energetické bilance nevýhodné, protože spotřeba neúměrně roste vlivem kvadratické závislosti rychlosti

a spotřeby při rozjezdu. Dále je velice nevýhodné provozní zastavení před výměnou na odstavnou kolej u Cizineckého domu.

Grafické znázornění výsledků výpočtu spotřeby el. energie při ideálních podmínkách pro rekuperaci je na následujícím grafu.



Obr. 18. Spotřeba 2xT3M za ideálních podmínek pro rekuperaci

8.12 Možnosti optimalizace spotřeby elektrické energie na lince č.4

Rozjezdy vozidla při jízdě ze spádu není nutné provádět až do traťové rychlosti, protože značný přebytek potenciální energie zajistí urychlení vozidla až na traťovou rychlost, navíc se prodlouží doba jízdy vozidla výběhem, která je v některých úsecích neznatelná. Toto opatření bude mít samozřejmě vliv na jízdní dobu v mezistaničních úsecích. Rozhodně je zajímavé tuto závislost zvážit při výstavbě grafikonu dopravy, protože ztráty při rozjezdu rostou s kvadrátem rychlosti, kdežto jízdní doba je nepřímo úměrná rychlosti.

Bezpečnostní zastavení před výměnou u Cizineckého domu, které je dobře patrné v Tachogramu na kilometru 2,1, je ideálním příkladem jak mohou změny v organizaci dopravy změnit výslednou energetickou bilanci napájecího úseku. V úseku Cizinecký dům vozidlo spotřebuje 1,35 kWh, pokud se odbourá zastavení u Cizineckého domu tramvaj vyrobí 1,19 kWh. Jistě by bylo zajímavé srovnat náklady na bezpečné zajištění polohy výměny s energetickou úsporou a úsporou opotřebení vozidel.

9 Energetická bilance tramvajové trati z hlediska pohonu vozidla

Doposud byla energetická bilance tramvajové linky zkoumána pouze pro vozidlo s moderním způsobem regulace, které je schopno rekuperovat elektrickou energii bez ohledu na poměry panující v trakční síti. Následující stať se zaměří na porovnání energetické bilance pro vozidla s různými způsoby regulace výkonu. Popis jednotlivých způsobů regulace naleznete v *Příloze 10*.

9.1 Porovnání skutečné spotřeby vozidel na lince č. 4 PmDP

K výpočtům byly využity vztahy z kapitoly 7.4 Specifická spotřeba el. energie pro soupravu 2 vozidel T4 či T4M definované v 8.3 Měření v reálném provozu.

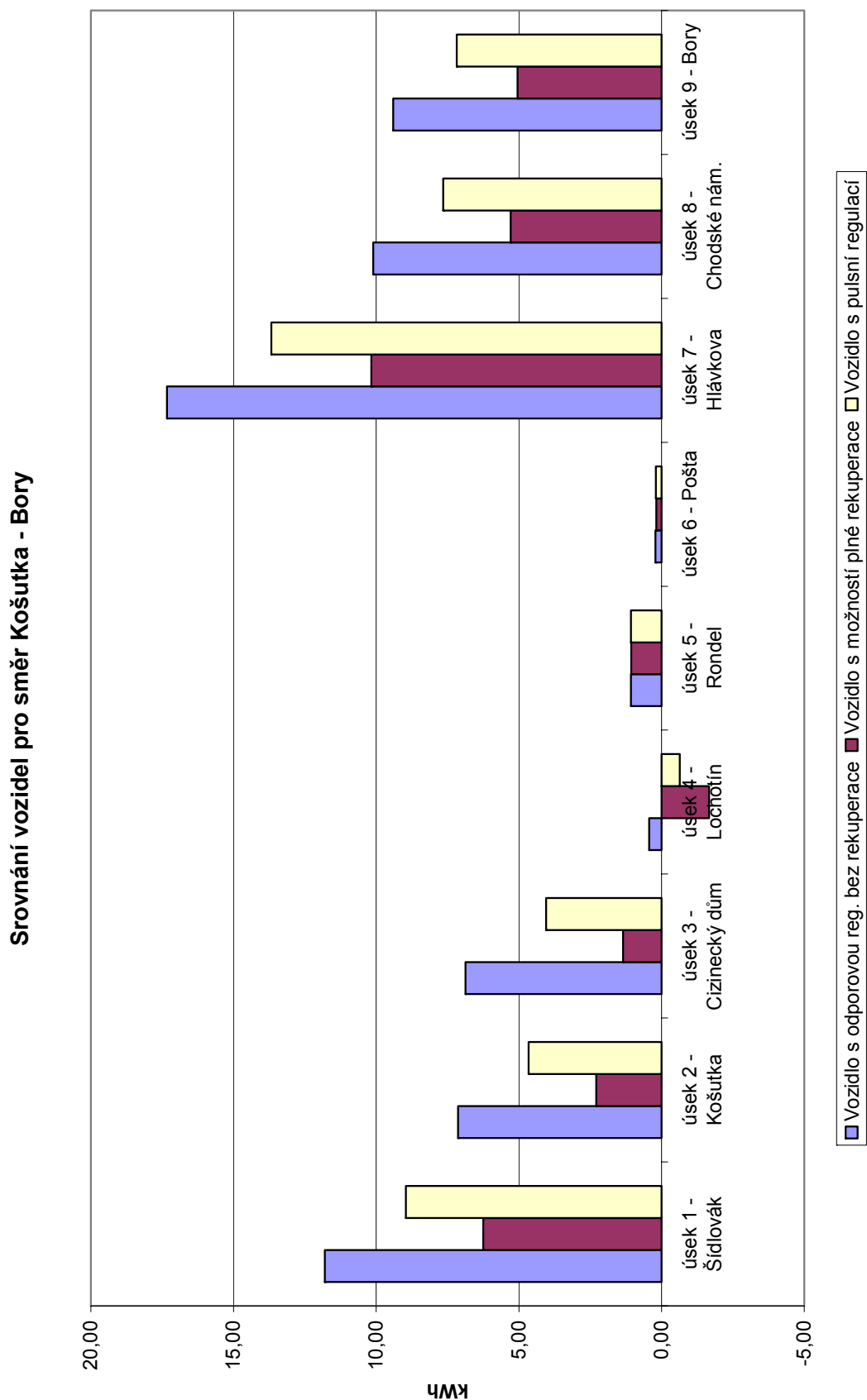
Z *Obr. 19*. je patrné srovnání spotřeby výše definované soupravy s odporovou regulací výkonu, pulsní regulací výkonu a s možností účinné rekuperace ve směru Košutka - Bory. V *Obr. 20*. je srovnání spotřeby těchto vozidel pro směr Bory – Košutka. Je nutno upozornit na to, že vozidlo s rekuperací by při současném stavu trakční sítě a skladbě vozidel vykazovalo poněkud horší energetickou bilanci než jaká vyšla výpočtem.

Je zřejmé, že značných úspor ve spotřebě el. energie lze docílit zvyšováním hospodárnosti regulace a rekuperací zejména v úsecích s výraznějším sklonem. Celkové spotřeby energie jsou uvedeny v *Tabulce. 11.*

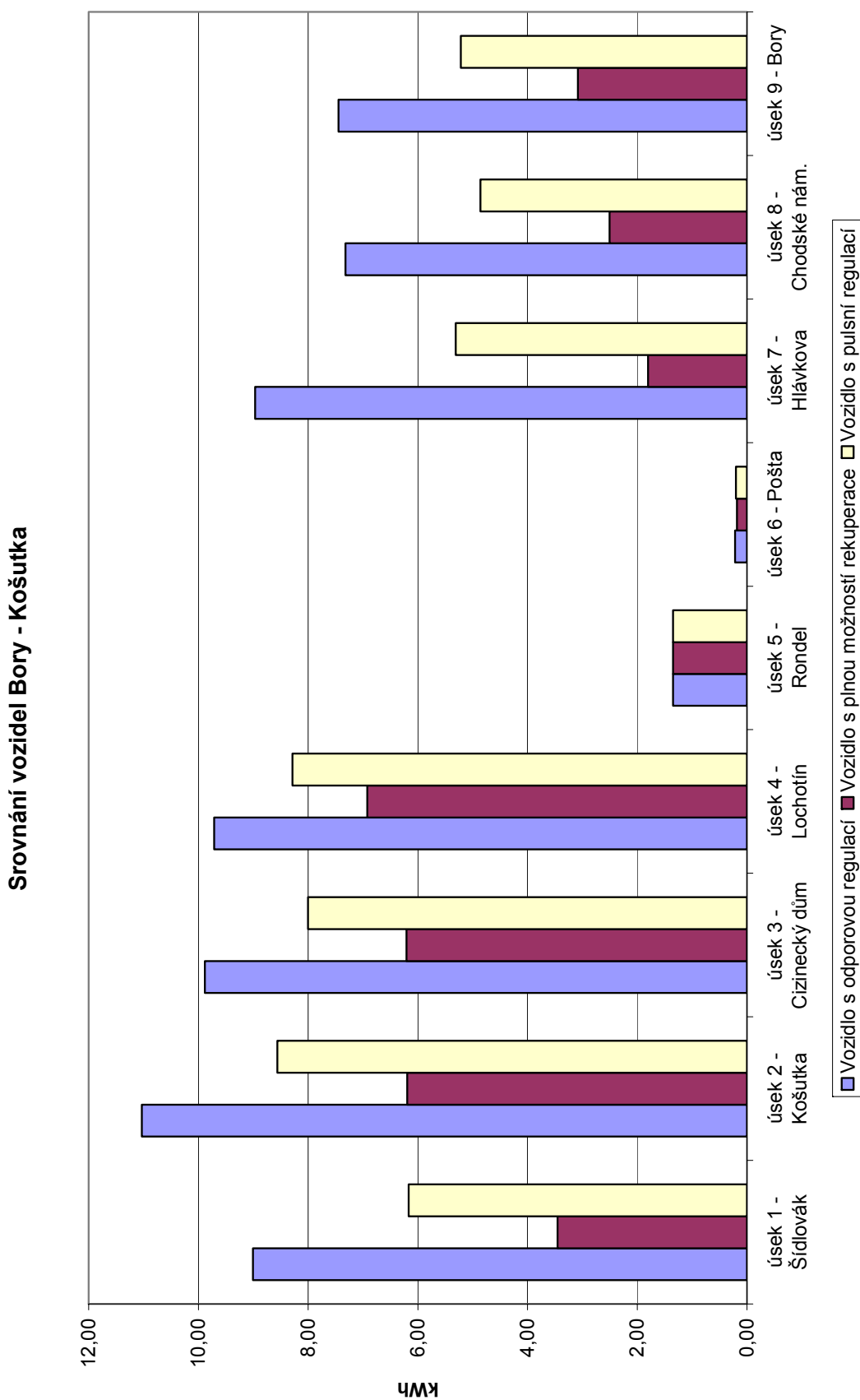
Druh regulace výkonu vozidla	Spotřeba elektrické energie [kWh]	
	směr Košutka - Bory	směr Bory – Košutka
odporová regulace	64,37	64,93
pulsní regulace	46,81	47,96
regulace s možností rekuperace	29,99	31,70

Tabulka 11. Celková spotřeba energie pro jednotlivé druhy pohonu

Vozidlo s pulsní regulací bude mít ve směru Košutka – Bory o 27% nižší spotřebu el. energie než vozidlo s odporovou regulací. U vozidla s rekuperací při splnění podmínek účinné rekuperace je možno dosáhnout úspory až 53% oproti vozidlu s odporovou regulací. Obdobně je tomu i pro opačný směr.



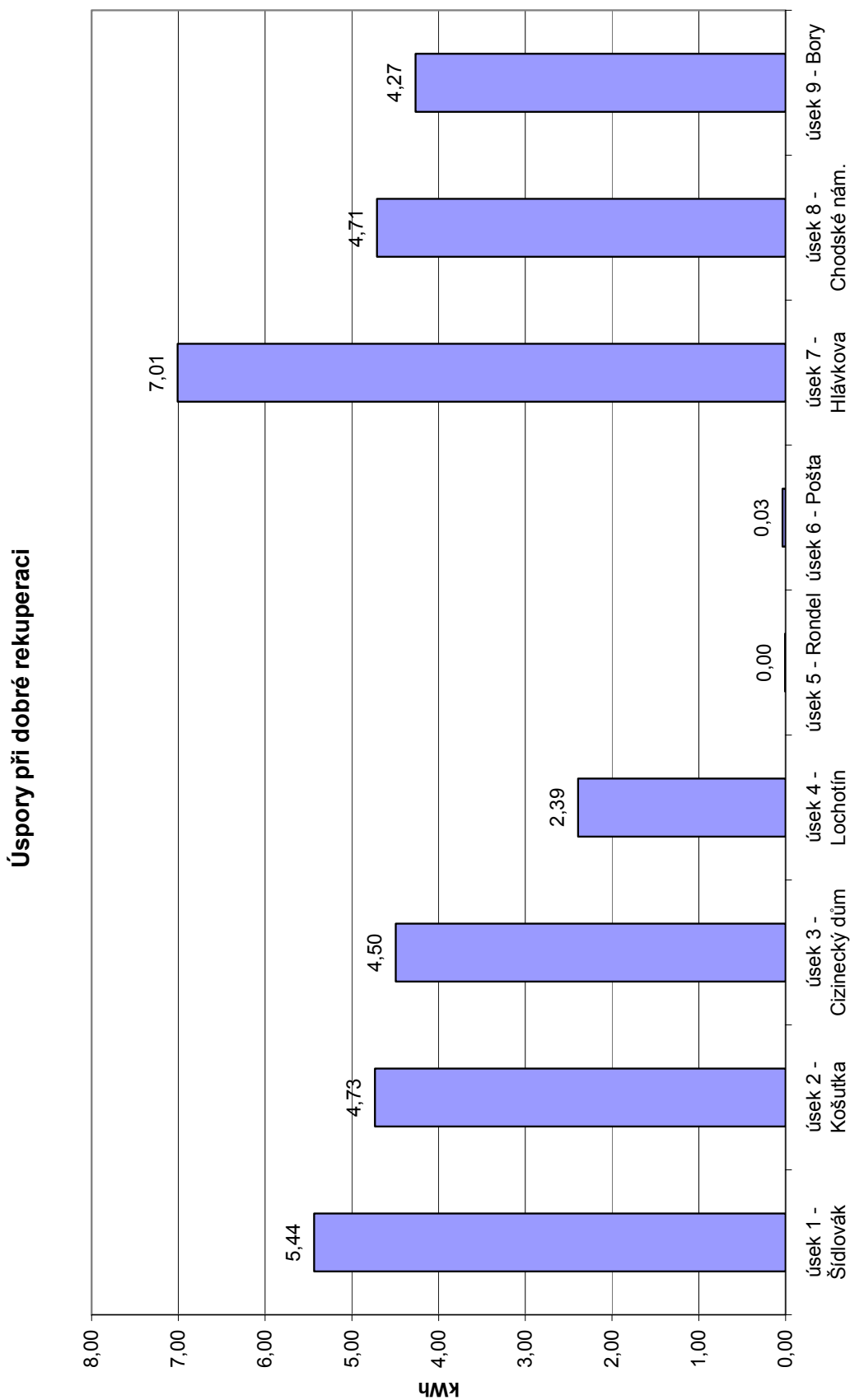
Obr. 19. Porovnání vozidel s různou regulací výkonu pro směr Košutka – Bory



Obr. 20. Porovnání vozidel s různou regulací výkonu pro směr Bory – Košutka

10 Možné úspory elektrické energie na lince č. 4 PmDP

Uvažujme, že vozidlo spotřebuje při průjezdu napájecím úsekem v obou směrech určité množství el. energie. Nyní posudme rozdíl spotřebované energie provozem vozidla s pulsní regulací a vozidlem umožňujícím rekuperaci v jednotlivých úsecích. Výsledek je patrný z následujícího grafu. Z grafu vyplývá že např. v úseku Rondel nemá smysl dělat jakákoliv opatření, spotřeba el. energie je tam pro všechny typy pohonu stejná. Naopak v úsecích Hlávková, Šídlovák, Košutka, atd., lze dosáhnout zlepšením podmínek rekuperace zajímavých úspor el. energie.



Obr. 21. Možné energetické úspory v jednotlivých úsecích

10.1 Možné úspory el. energie na lince č. 4 s přihlédnutím k provoznímu stavu

Pro výpočty jsme využily vzájemně izolované úseky trakčního vedení. Pro analýzu skutečných možných úspor je však nutné brát v potaz i to, že některé sousedící úseky jsou napájeny ze stejné měřírny, přes jejíž sběrnici jsou galvanicky propojeny. Možné úspory energie v provozně galvanicky propojených úsecích jsou v následující tabulce.

Galvanicky spojené úseky	Možná úspora energie [kWh]
Šídlovák, Košutka	10,17
Cizinecký dům, Lochotín, Rondel	6,89
Pošta, Hálkova	7,04
Chodské náměstí	4,71
Bory	4,27

Tabulka 12. Možné energetické úspory v galvanicky propojených úsecích

Z tabulky plyne, že největších úspor lze docílit v obvodu měřírny Bolevec, dále v úseku Hálkova a nezanedbatelné úspory jsou i v obvodu měřírny Lochotín.

Pozn.: Úseky Chodské náměstí a Bory jsou napájeny oba z měřírny Bory, zde však brání rekuperaci mezi těmito úseky tyristorové spínače měřírny nahrazující mechanické vypínače.

10.2 Závěry z výpočtů energetických úspor

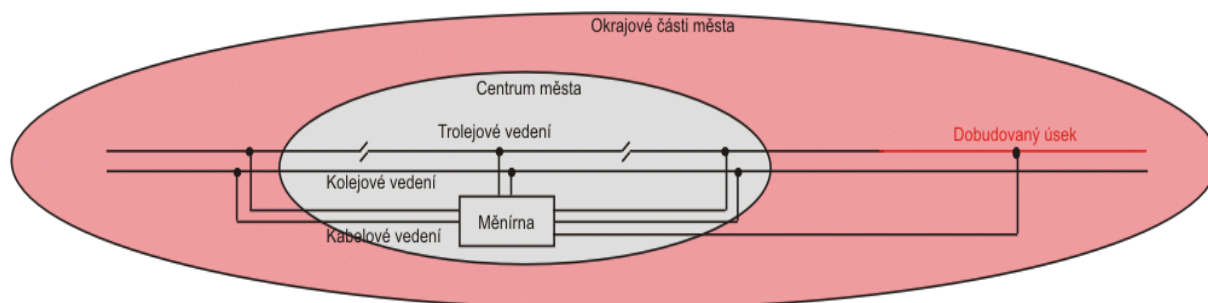
Speciální zařízení nebo úpravy stávajících trakčních zařízení budou mít největší efekt, přinesou největší úspory, v úsecích s vysokou spotřebou el. energie, s mnoha zastávkami na spádech či stoupáních. Z hlediska rekuperace je nevhodné členit trakční síť do krátkých vzájemně izolovaných úseků, značně se tak snižuje pravděpodobnost, že se bude v úseku nalézat jiné vozidlo připravené přijmout rekuperovanou energii.

11 Návrh trakční soustavy městské dráhy s ideální energetickou bilancí

11.1 Současná topologie trakční sítě městské dráhy z hlediska rekuperace

Současná topologie trakční sítě řady městských drah je značně ovlivněna dobou a okolnostmi vzniku. Většina tramvajových, ale i trolejbusových tratí historicky protínala střed města. Postupem času byly tratě prodlužovány směrem k rozrůstajícím se periferiím aglomerace. V takovém případě většinou nastal problém

s vysokým úbytkem napětí v nově vzniklé konečné stanici. Tento příliš vysoký úbytek napětí byl v lepším případě řešen stavbou nové měnirny v horším případě stavbou dalšího kabelového napájecího vedení. Vznikaly tak paprskovitě napájené úseky, jak je znázorněno na následujícím obrázku nebo je patrné z *Přílohy 1*.



Obr. 22. Topologie trakční sítě vzniklá historickým vývojem města

Z důvodu značného elektrického odporu vzdušného trakčního vedení, normou stanoveného rozsahu napětí v síti a zkratových poměrů, musí být trakční vedení rozděleno do vzájemně izolovaných úseků dlouhých maximálně 1200 m. Přestože v měnirně bývají všechna kabelová vedení připojena přes rychlovypínače ke společné sběrnici, je tato topologie sítě z hlediska rekuperace značně nevýhodná. Byť je rekuperující vozidlo fyzicky vzdáleno pouze několik desítek metrů od vozidla spotřebovávajícího energii, které se však nachází v sousedním napájecím úseku, musí energie projít značnou délkou vzdušného trolejového vedení a dlouhými kabelovými vedeními. Na těchto vedeních samozřejmě vznikají nezanedbatelné ztráty.

11.2 Idealizovaná topologie trakční sítě městské dráhy

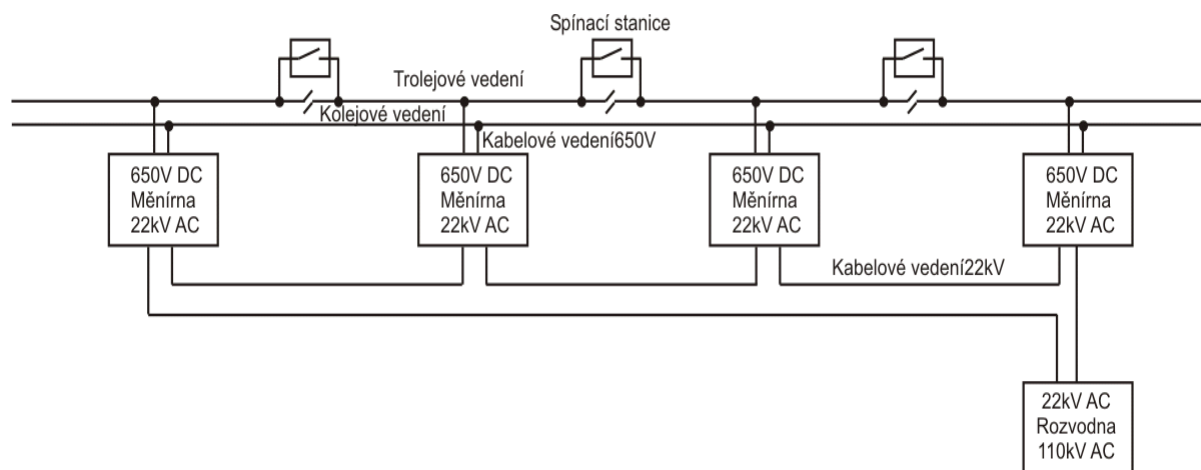
Pokud má být trakční napájecí soustava zachována na 600V DC a zároveň v centrech měst zachována sestava prostého trolejového vedení především z estetických důvodů, pak je podle poznatků vyplývajících z předchozích statí ideální následující řešení topologie sítě.

Délka trolejových izolovaných úseků je zachována na cca 1200 m z důvodu el. odporu trolejových vodičů. Jednotlivé úseky jsou napájeny do svého středu z měniren nižších výkonů situovaných co možná nejbližší trolejovému vedení, eliminují se tak ztráty přenosem energie i rekuperované energie po dlouhých kabelových vedeních. Jako vhodné se jeví univerzální měnirny zabudované do prefabrikovaných budov, které mohou být zapařeny i pod úroveň terénu.

Jednotlivé úseky trolejového vedení jsou pak propojeny spínacími stanicemi s jedním rychlovyvínačem. Smysl těchto stanic je zřejmý, mají umožnit v normálním provozním stavu tok rekuperované energie mezi vozidly přímo pouze trolejovým vedením bez přídavných ztrát na kabelových vedeních. V případě zkratů, poruch izolace, výluk atp., pak spínací stanice umožní odpojení příslušného úseku trolejového vedení. S rozvojem vakuových DC vypínačů či zapouzdřených klasických rychlovyvínačů je možné realizovat spínací stanice malých rozměrů, kterou lze zabudovat přímo na stožár trakčního vedení nebo do jeho bezprostřední blízkosti.

Měničy jsou připojeny do okružního kabelového vedení 22kV napájeného z rozvodny vyšších přenosových soustav. Tím jsou ztráty na kabelových vedeních minimalizovány.

Popsaná topologie sítě je na následujícím obrázku.



Obr. 23. Idealizovaná topologie trakční sítě

12 Možná opatření pro zvýšení účinnosti rekuperace na stávajících městských drahách

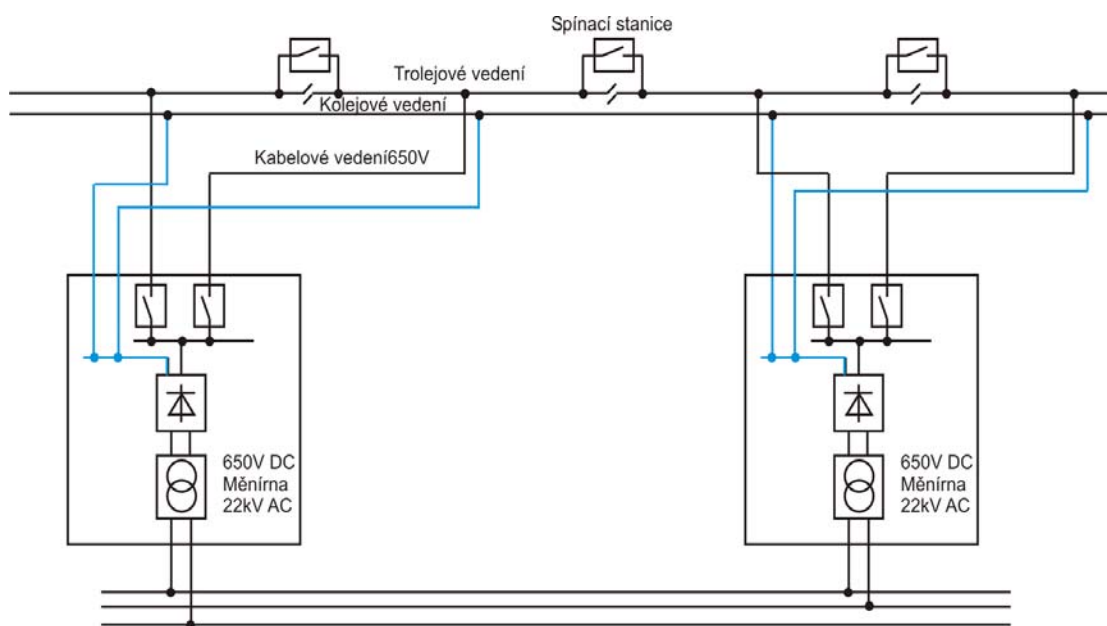
Tramvajové tratě se na území České republiky vyvíjejí již od počátku minulého století, proto zejména v centrech měst nelze očekávat topologii trakční sítě, které by naplňovala požadavky pro účinnou rekuperaci zmíněnou v předchozích kapitolách. Nabízejí se však některá technická řešení, která mohou i v síti s nevhodnou topologií značně vylepšit energetickou bilanci trakce, zejména zvýšením účinnosti rekuperace. Některá z těchto řešení jsou popsána v následujících odstavcích.

12.1 Spínací stanice

Spínací stanice je prvek topologie trakční sítě, který je možno převzít z trakčních sítí železnic, kde přináší zejména možnost stavby měníren s většími kilometrickými rozestupy omezení vypínací schopnosti měníren v případě vzdálených zkratů.

V případě použití spínací stanice v trakční síti městské dráhy dojde kromě vylepšení zkratových poměrů v síti i k umožnění relativně bezztrátového (pouze ztráty odporem trolejového vedení) přechodu rekuperované energie mezi vozidly. Při tom se neztrácí variabilita sítě rozdělením na řadu napájecích úseků. Variabilitou je myšlen například případ, kdy v jednom úseku dojde k poruše izolace vozidla, sítě nebo i k přetížení sítě a tím není způsoben výpadek napájení v celé síti, ale pouze v inkriminovaném krátkém napájecím úseku, provoz ve zbytku sítě pak může dále probíhat bez omezení a zásahů elektro-dispečera.

Spínací stanice je tvořena pouze rychlovypínačem, který podelně přemostňuje meziúsekovou izolaci, jak je patrné z následujícího obrázku.



Obr. 24. Spínací stanice

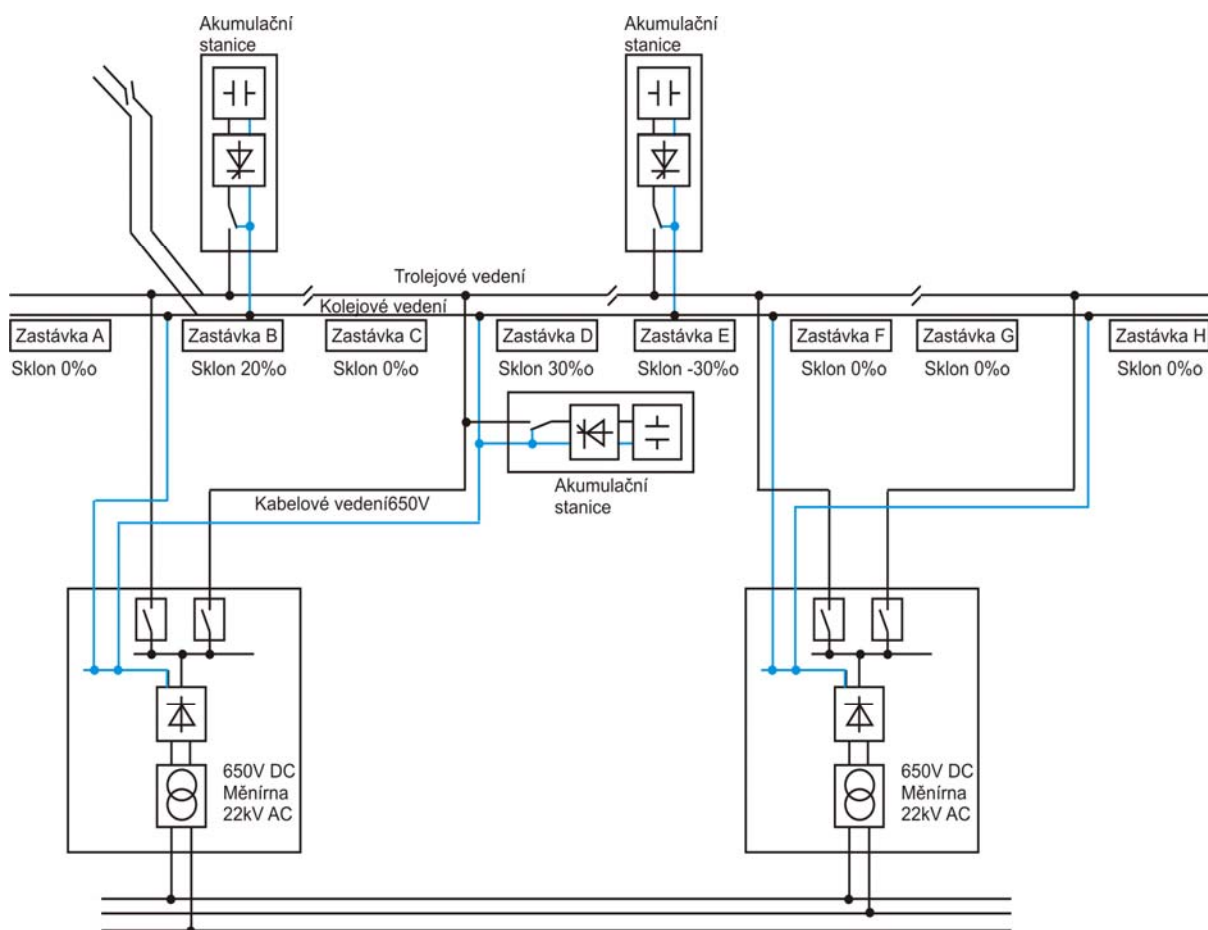
12.2 Akumulátor rekuperované energie

Akumulátor rekuperované energie je popsán v kapitole Akumulátory el. energie pro trakci a vytyčení pozice pro jeho umístění je zřejmé například z kapitoly Možné energetické úspory na lince č.4 PmDP. Z této kapitoly vyplývá, že největších

energetických úspor lze dosáhnout v úsecích, kde dochází ke kombinaci značného sklonu trati a většího počtu zastavení vozidel v zastávkách nebo na křižovatkách.

Z kapitoly Varianty umístění stacionárního akumulátoru vyplývá, že bezeztrátový akumulátor je umístěn co možná nejbližší k místu výroby a spotřeby elektrické energie ze strany vozidel.

Umístění akumulátorů je znázorněno na následujícím schématu.



Obr. 25. Umístování stacionárních akumulátorů

12.3 Akumulátor rekuperované energie pracující do sousedních úseků vedení

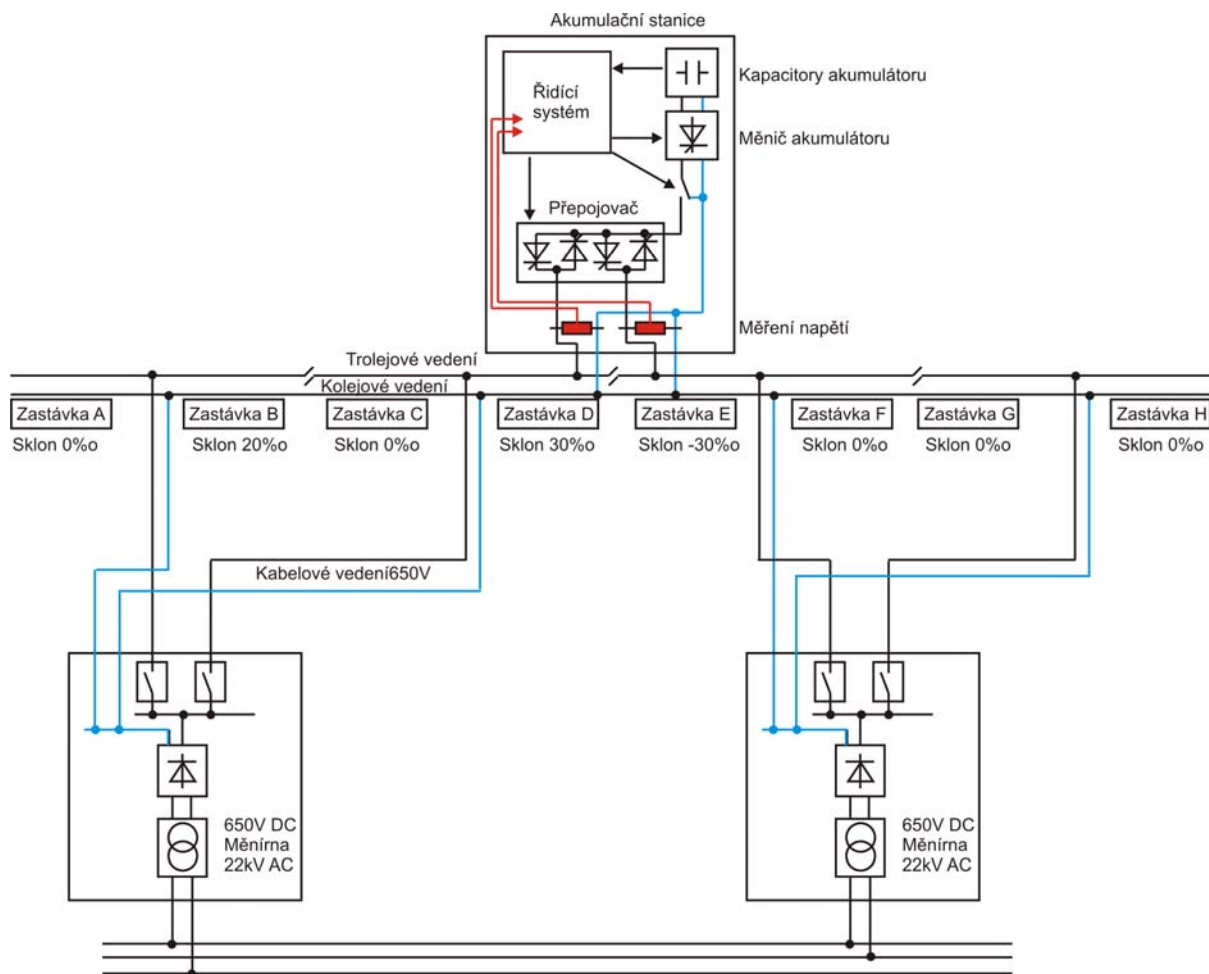
Akumulátor energie je připojen podélně, podobně jako spínací stanice, na hranici napájecích úseků.

Tento způsob využití akumulátoru elektrické energie vyžaduje doplnění akumulátoru o nezcela běžný spínací přístroj, který v závislosti na napěťových poměrech v sousedních úsecích a stavu nabití akumulátoru přepíná akumulátor mezi úseky.

K názornému popisu práce akumulátoru využiji následující příklad. Akumulátor detekuje napětí v úseku A - 500V a v úseku B – 720V a je zcela vybit. Z uvedeného je zřejmé, že v úseku A dochází ke spotřebě el. energie, kdežto v úseku B brzdící vozidla vyrobila přebytek el. energie a tím způsobili nárůst napětí. Akumulátor se tedy připojí k úseku B a započne se nabíjet. Pokud během nabíjení nedojde k výraznějšímu poklesu napětí v úseku B zcela se nabije a přepojí se k úseku A, kde se započne vybíjet. Umožní tak tok energie i mezi úseky napájenými z různých měření.

Kvantifikace úspor vzniklých využitím takto fungujícího akumulátoru by byla vzhledem k nemožnosti měření v reálném provozu v tuto chvíli zcela spekulativní. Konkrétnější představu lze získat z následující kapitoly Možná opatření pro zvýšení účinnosti rekuperace na lince č.4 PmDP, konkrétně mezi úseky Košutka (možné úspory 4,73 kWh) a Cizinecký dům (možné úspory 4,5 kWh) by připojení akumulátoru pracujícího v popsaném režimu mohlo přinést skutečnou realizaci uvedených úspor.

Přepojovač akumulátoru v podobě mechanického přístroje by byl využitelný například lokomotivní přepojovač systémů. Rychlost mechanického přepojovače a především životnost je však nesrovnatelně nižší v porovnání s obdobným zařízením realizovaným z výkonových polovodičových součástek. Připojení akumulátoru do trakční sítě a jeho funkce je patrná z následujícího schématu.



Obr. 26. Akumulátor el. energie pracující do sousedních úseků

13 Možná opatření pro zvýšení účinnosti rekuperace na lince č. 4 PmDP

V přímé návaznosti na předchozí kapitoly lze nyní stanovit úpravy v topologii trakční sítě linky č.4 PmDP. V potaz je nutno brát i požadavky, které si stanoví PmDP a to zejména minimalizaci ceny a minimální úpravy jak na venkovních pevných trakčních zařízeních, tak na vnitřním vybavení měřičů. Stavba zesilovacích vedení či změny sestavy trolejového vedení není možná. Dalším důležitým aspektem je, že několik objektů měřičů je součástí suterénů domů a nelze do nich instalovat jakákoliv další zařízení nebo výrazněji upravovat zařízení stávající.

Z kapitoly 10. Možné úspory elektrické energie na lince č. 4 PmDP je zřejmé ve kterých úsecích má smysl provádět úsporná opatření a kde nikoliv. Detailní popis úprav je v následujících odstavcích. Grafické znázornění úprav v rámci celé linky je zakresleno v Příloze 3.

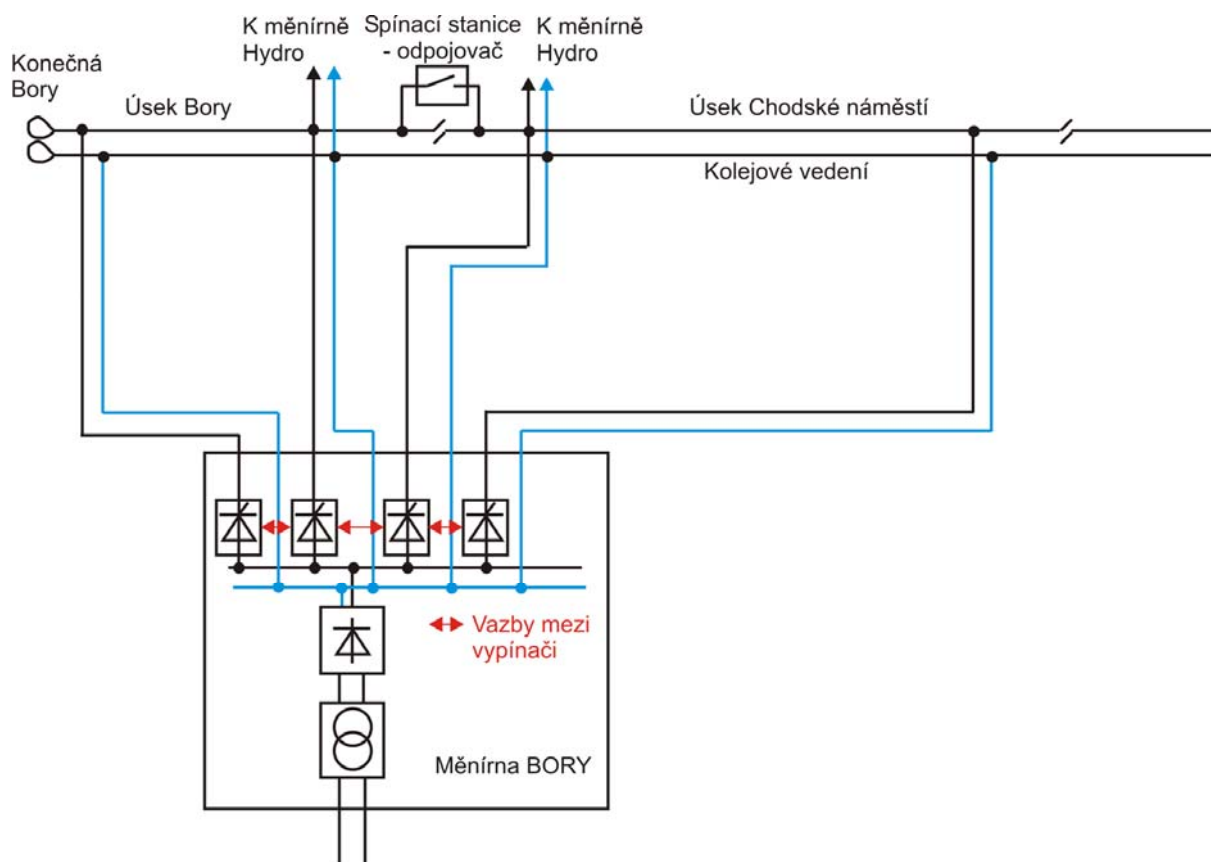
13.1 Spínací stanice Bory – Chodské náměstí

Propojením napájecích úseků Bory a Chodské náměstí lze docílit maximální teoretické úspory až 9 kWh na průjezdu jediné modelové soupravy (viz. předchozí výpočty) 2 x T3M jejíž jízda do stoupání bude hrazena energií vozidel jedoucích ze spádu.

V tomto případě spínací stanice spíná dva sousední úseky napájené stejnou měnírnou. Měnírna je ovšem vybavena namísto mechanických rychlovypínačů tyristorovými vypínači, které ovšem znemožňují obousměrný tok elektrické energie. Vzhledem k tomu, že je úsek napájen stejnou měnírnou je možno realizovat spínací stanici pouze odpojovačem, který nebude vypínat při zkratech a ani nemusí mít vazbu vypínači měírny.

Úseky Bory a Chodské náměstí mohou být ve výjimečných situacích napájeny i z měírny Hydro, proto je nutno zachovat vzájemnou izolaci úseků a pro lepší manipulaci využít dálkově ovládaného odpojovače.

Situační schéma po úpravě je na následujícím obrázku.



Obr. 27. Schéma úprav v úsecích Bory a Chodské náměstí

13.2 Stacionární akumulátor v úseku Hálkova

Z grafu Obr. 21. je patrné, že z hlediska teoretických úspor (7 kWh) je zajímavý napájecí úsek Hálkova. Tento úsek je napájen z měniřny Hydro, která pokrývá celou centrální část města, napájí řadu izolovaných úseků, jak různých tramvajových linek, tak linek trolejbusových. Umístění spínací stanice s úsekem Pošta by zřejmě nepřinesl zásadní úspory a zároveň by znamenal zavedení řady vazeb mezi vypínači v měniřně, což by mělo za následek vznik plošných výpadků v případě zaúčinkování jednoho z vypínačů, což je v centrální části města nežádoucí. Z těchto důvodů se jeví výhodné umístit v úseku stacionární akumulátor elektrické energie a to v oblasti největšího spádu v okolí divadla J. K. Tyla.

13.3 Akumulátor pracující do sousedních úseků Cizinecký dům a Košutka

Úseky Cizinecký dům a Košutka jsou sousední úseky se značným spádem trati, přičemž každý z úseků je napájen jinou měniřnou. Úsek Cizinecký dům z měniřny Lochotín a úsek Košutka z měniřny Bolevec za normálního provozního stavu. V případě mimořádných situací je možno napájet úsek Košutka rovněž z měniřny Lochotín. Teoretické úspory se po připojení akumulátoru mohou docílit až cca 7 kWh. Akumulátor by měl pracovat v režimu popsaném v kapitole 12.3.

Další umístění akumulátoru je nasnadě i v úseku Šídlovák, kde by mohl plnit i úlohu stabilizátoru napětí na konci linky.

Výše uvedené varianty úprav a opatření na lince č. 4 vychází z trakčních výpočtů. Bylo by vhodné je dále ověřit i velice nákladnými měřeními skutečných spotřeb a úspor přímo na trati. K těmto měřením během zpracování této disertační práce zatím nedošlo.

14 Bezpečnost trakční sítě s rekuperujícími vozidly a akumulátory elektrické energie

Tato kapitola je zaměřena na specifikaci rizik, která přináší do trakční sítě rekuperující vozidla a stacionární akumulátory el. energie. Dále tato kapitola nabízí možná technická řešení specifikovaných rizik.

14.1 Rizika při bezporuchovém stavu trakční sítě

Pokud se v trakční síti nevyskytují žádné poruchy a to zejména zkraty nebo poruchy izolace, představuje největší riziko nárůst napětí v síti v případě, kdy

převyšuje výroba energie její spotřebu. Pro napětí trakčních sítí platí norma EN 50 163, která stanovuje hodnotu nejvyššího trvale dovoleného napětí a nejvyššího krátkodobě dovoleného napětí, viz. následující tabulka.

	Jmenovité napětí [V]	Nejvyšší trvalé napětí [V]	Nejvyšší krátkodobé napětí (5 minut) [V]
Napětí [V]	600	720	800
Poměrná hodnota napětí [%]	100	120	133
Napětí [V]	750	900	1000
Poměrná hodnota napětí [%]	100	120	133

Tabulka 13. Dovolené hodnoty napětí v trakční síti

Výstupní napětí měničů je nastaveno tak, aby v místě připojení kabelového napájecího vedení k vedení trolejovému bylo dosaženo Nejvyšší trvalé napětí. Hodnota Nejvyššího krátkodobého napětí pak může být brána jako navýšení napětí právě rekuperujícími vozidly. Pokud v trakční síti není žádný proudový odběr vystoupá její napětí na hodnotu Nejvyššího trvalého napětí. Vozidlo, které pak začne rekuperovat má k dispozici toleranci napětí pouhých 13%, která je prakticky okamžitě využita a vozidlo musí přejít na jiný způsob brzdění než je rekuperační. Pokud vozidlo nepřejde dostatečně rychle do jiného způsobu brzdění, tím je myšleno v řádech desetin sekundy, může být nárůst napětí v síti natolik velký, že může dojít k poškození izolace jak vlastního trolejového a kabelového vedení, tak trakčního obvodu vozidla. Vozidlo i trakční síť je vybavena svodiči přepětí (ružková jiskřiště, variátorové bleskojistky), která jsou primárně určena ke svodu atmosférických výbojů a jejich časté a dlouhodobé využívání ke svodu přepětí při rekuperačních dějích není možné a vedlo by k jejich poškození.

Pokud je k trakční síti připojen stacionární akumulátor elektrické energie, je vhodné, aby zahájil nabíjení právě v okamžiku, pokud detekuje v místě svého připojení k trakční síti dosažení Nejvyššího krátkodobého napětí.

14.2 Rizika při poruchovém stavu trakční sítě

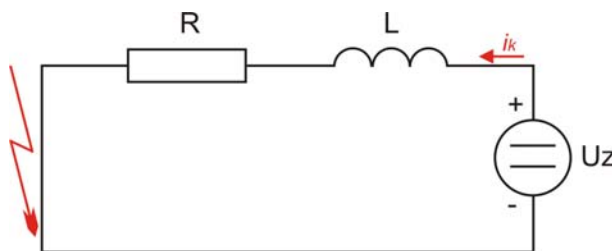
Poruchovým stavem trakční sítě jsou myšleny zejména průrazy izolace vzdušného trolejového vedení, průrazy izolace kabelových napájecích vedení, pád trolejového vodiče na zem a průrazy izolace trakčních obvodů vozidel.

Výše uvedené poruchy jsou příčinou toku zkratových proudů mezi zdroji, to znamená měnírny, stacionárními akumulátory energie a rekuperujícími vozidly a místy poruch. Ustálená hodnota zkratových proudů je pak nepřímo úměrná odporu vedení mezi zdrojem a zkratem.

$$I_k = \frac{U_z}{R_v}, \quad [14.2.1]$$

kde U_z je napětí zdroje (měnárna, akumulátor, rekuperující vozidlo)
 R_v je odpor vedení mezi zdrojem a zkratem

Pro výpočet průběhu zkratového proudu je nutné uvažovat i s indukčností vedení. Náhradní schéma obvodu při zkratu je na následujícím obrázku.



Obr. 28. Náhradní schéma obvodu při zkratu v trakční síti
 U_z představuje zdroj napětí v našem případě měnárnu, rekuperující vozidlo nebo akumulátor energie.

L je induktivita vedení mezi zdrojem napětí a zkratem

R je ohmický odpor všech vedení mezi zdrojem a zkratem

Napětí zdroje lze vyjádřit vztahem:

$$U_z = L \cdot \frac{di_k}{dt} + R \cdot i_k, \quad [14.2.2]$$

kde i_k je časový průběh proudu v obvodu.

Právě časový průběh proudu zjišťujeme, proto musíme vyřešit zmíněnou diferenciální rovnici.

Obecné řešení:

$$L \frac{di_k}{dt} + R \cdot i_k = 0$$

$$\frac{di_k}{dt} + \frac{R}{L} \cdot i_k = 0$$

$$\frac{di_k}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i_k$$

$$\frac{1}{i_k} di_k = -\frac{R}{L} dt$$

$$\int \frac{1}{di_k} di_k = \int \left(-\frac{R}{L} \right) dt$$

$$\ln|i_k| = -\frac{R}{L}t + k / C = e^k$$

$$i_k = C \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Partikulární řešení – Variace konstanty

Derivace funkce podle času:

$$i_k' = C(t)' \cdot e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{R \cdot C(t)}{L}(t) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Dosadíme výše uvedenou rovnici a její časovou derivaci do úplné rovnice a vyjádříme hledanou funkci $C(t)$.

$$L \frac{di_k}{dt} + R \cdot i_k = Uz$$

$$L \left(C(t)' e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{R \cdot C(t)}{L}(t) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right) + R \cdot C(t) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} = Uz$$

$$L \cdot C(t)' \cdot e^{-\frac{R}{L}t} - R \cdot C(t) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} = Uz$$

$$L \cdot C(t)' \cdot e^{-\frac{R}{L}t} = Uz$$

$$C(t)' = \frac{Uz}{L} \cdot e^{\frac{R}{L}t}$$

Integrace podle času:

$$C(t) = \frac{Uz}{L} \cdot e^{\frac{R}{L}t} \cdot \frac{L}{R} + K$$

$$C(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{\frac{R}{L}t} + K$$

Úplné řešení diferenciální rovnice:

$$i_k = C(t) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$i_k = \left(\frac{U}{R} \cdot e^{\frac{R}{L}t} + K \right) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$i_k = \frac{U}{R} + K \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Počáteční podmínky:

$$t = 0s, I_0 = 0A$$

$$I_0 = \frac{U}{R} + K$$

$$0 = \frac{U}{R} + K$$

$$K = -I$$

Výsledný tvar rovnice:

$$i_k = \frac{U}{R} - \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad [14.2.3]$$

Poměr indukčnosti a odporu označme jako časovou konstantu τ

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [14.2.4]$$

Pro rychlost nárůstu zkratového proudu pak platí vztah:

$$i_k = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$
$$i_k = I_k \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [14.2.5]$$

kde I_k je hodnota ustáleného zkratového proudu

t je čas od počátku zkratu

τ je časová konstanta závislá na elektrickém odporu a indukčnosti vedení

Z uvedeného vyplývá, že detekce vzniku zkratu bude nejobtížnější pro zkraty vzdálené zdrojům, kdy se projeví značný elektrický odpor a indukčnost vedení mezi zdrojem a zkratem. Zkrat který není detekován a vypnut má devastující tepelné účinky především v místě poruchy, zde také hrozí zranění osob, jak elektrickým napětím, tak popálení např. roztavenou mědí trolejového drátu. Zkrat, který není detekován, bývá často příčinou požárů a značných materiálních škod.

Poruchy uvnitř trakčních zařízení vozidel je možno částečně pominout, neboť vozidlo je opatřeno vlastními ochranami a hlavním vypínačem. Nelze však opomenout poruchy ve vstupních obvodech vozidel před hlavním vypínačem, např. poškození izolace sběrače.

Rekuperující vozidlo nebo stacionární akumulátor představují tvrdý zdroj napětí, který je schopen v případě vzdáleného zkratu udržovat napětí trakční sítě v místě svého připojení na nominálních hodnotách. Pokud je zkrat vzdálen natolik, že elektrický odpor trakčního vedení zamezí zkratovému proudu přesáhnout maximální provozní hodnoty, pak vozidlo nebo akumulátor napájí zkrat až do doby ukončení rekuperace, což může představovat i čas několika minut u vozidla a desítky sekund u akumulátoru. Tento dlouhotrvající zkrat je velice nebezpečný a je nutno eliminovat jeho vznik. Tato problematika je nyní pečlivě sledována a prověřována na železniční síti SŽDC, zejména díky tvrdým požadavkům normy TSI Rolling Stock. Tato norma se vztahuje na trakční sítě obecně, tedy i na sítě městských drah. V následující kapitole bude posouzena závažnost rizika vzdáleného zkratu v síti městské dráhy.

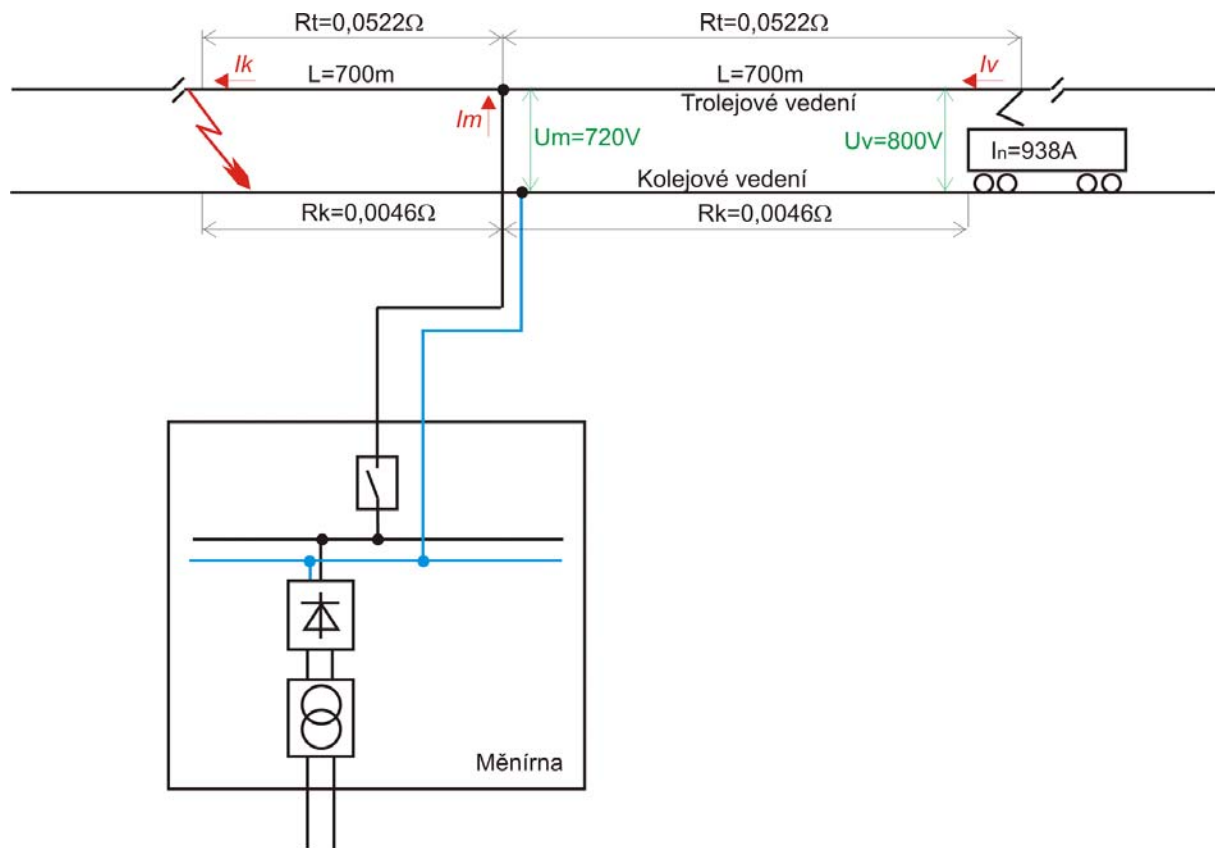
14.3 Závažnost vzdáleného zkratu v sítích městských drah

Stávající trakční sítě městských drah jsou navrženy pro provoz bez jakýchkoliv jiných zdrojů než jsou měničny. Nadproudové spouště vypínačů v měničnách jsou nastaveny na hodnoty proudů odpovídajících hodnotám vypočteným pro zkraty v koncových bodech napájecích úseků. Z tohoto vyplývá, že měnična vzdálený zkrat v síti bez jiných zdrojů detekuje vždy. Pokud ovšem zavedeme vozidla s možností rekuperace a s nimi některá opatření pro zvýšení účinnosti rekuperace, zejména spínací stanici, je nutno zachování těchto zkratových poměrů zkontrolovat a případně doplnit vzájemné vazby mezi vypínači v měničně nebo i vazbu k vypínači ve spínací stanici.

Pro zhodnocení závažnosti rizika neodhalení vzdáleného zkratu uvažujeme trakční trolejové, kolejové a napájecí vedení popsané v kapitole Elektrické parametry

vedení trakční sítě. Pro názornost zkoumejme běžný napájecí úsek městské dráhy, ve kterém dojde k závadě izolace ve chvíli, kdy na opačném konci úseku rekuperuje vozidlo.

Mějme napájecí úsek městské dráhy o délce 1400m napájený měnícími přibližně v jeho polovině. U jednoho z konců úseku dojde k pádu trolejového drátu na kolejnici. Trolejové vedení je tvořeno dvojicí středně ojetých trolejových vodičů o původním průřezu 150 mm^2 nyní ojetých o 20% na průřez 120 mm^2 . Měrný odpor trolejového vedení je $0,0745 \text{ } \Omega/\text{km}$. Zpětné kolejové vedení je tvořeno čtveřicí blokových žlábkových kolejnic, svařovaných, částečně izolovaných od země s celkovým měrným odporem $0,0065 \text{ } \Omega/\text{km}$. Napětí měnící v místě připojení k trolejovému vedení je 720V. Vliv kabelového připojovacího vedení zatím nebudeme uvažovat. Do úseku vjede rekuperující vozidlo typu Astra, jež představuje zdroj napětí o hodnotě 800V. Jmenovitý brzdový proud vozidla o výkonu 750kW je při daném napětí 938A. Nadproudová ochrana vozidla je nastavena na 1000 A. Jmenovitý napájecí proud měnící je 4000A a její zkratová ochrana je nastavena na 4800A, hodnotu o 20% vyšší než je jmenovitý proud (toto opatření je užíváno i v praxi). Tento příklad demonstruje jedny z nejnepríznivějších podmínek, které mohou nastat. Vzniklé poměry jsou znázorněny na následujícím schématu.



Obr. 29. Zkratové poměry při vzdáleném zkratu

Proud měřírny vystoupí při zkratu nejvýše na hodnotu I_m

$$I_m = \frac{U_m}{R_t + R_k} = \frac{720}{0,0522 + 0,0046} = 12,7 \text{ kA}$$

Zkratový proud měřírny tedy bez problémů vybaví nadproudovou spoušť a měřírna vypne rychlovyvínač. Doba, za kterou zkratový proud vystoupí na nastavenou hodnotu spouště 4800A, je závislá na časové konstantě τ . Přesný průběh zkratového proudu pro naše hodnocení není v tuto chvíli podstatný a bude vypočten později.

Maximální celková délka úseku, kterou by mohla uvedená měřírna se svým výkonem a nastavením napájet, by byla pro uvedenou sestavu napájecího vedení zhruba $L_{m_{\max}}$.

$$Lm_{\max} = 2 \cdot \frac{R_{\max}}{Rv} = 2 \cdot \frac{Um}{Rv \cdot Im_k} = \frac{2 \cdot 720}{(0,0745 + 0,0065) \cdot 4800} = 3,7 \text{ km},$$

kde

R_{\max} je maximální možný odpor úseku od měnírny ke konci úseku

Rv je měrný odpor vedení

Im_k je nastavený zkratový proud spouště vypínače

Um je napětí měnírny

Proud vozidla Iv vystoupí při zkratu nejvýše na hodnotu:

$$Iv = \frac{Uv}{2 \cdot Rt + 2 \cdot Rk} = \frac{800}{2 \cdot 0,0522 + 2 \cdot 0,0046} = 7 \text{ kA}$$

Proud vozidla při zkratu vystoupí rovněž vysoko nad jmenovité hodnoty a vozidlo zkrat bezproblémově detekuje. Maximální délka úseku, ve kterém je dané vozidlo ještě schopno rozeznat zkratový proud od provozního pak je:

$$Lv_{\max} = \frac{R_{\max}}{Rv} = \frac{Uv}{Rv \cdot Iv_k} = \frac{800}{(0,0745 + 0,0065) \cdot 1000} = 9,9 \text{ km}$$

kde R_{\max} je maximální možný odpor úseku

Rv je měrný odpor vedení

Iv_k je nastavená hodnota nadproudové ochrany vozidla

Uv je napětí vozidla

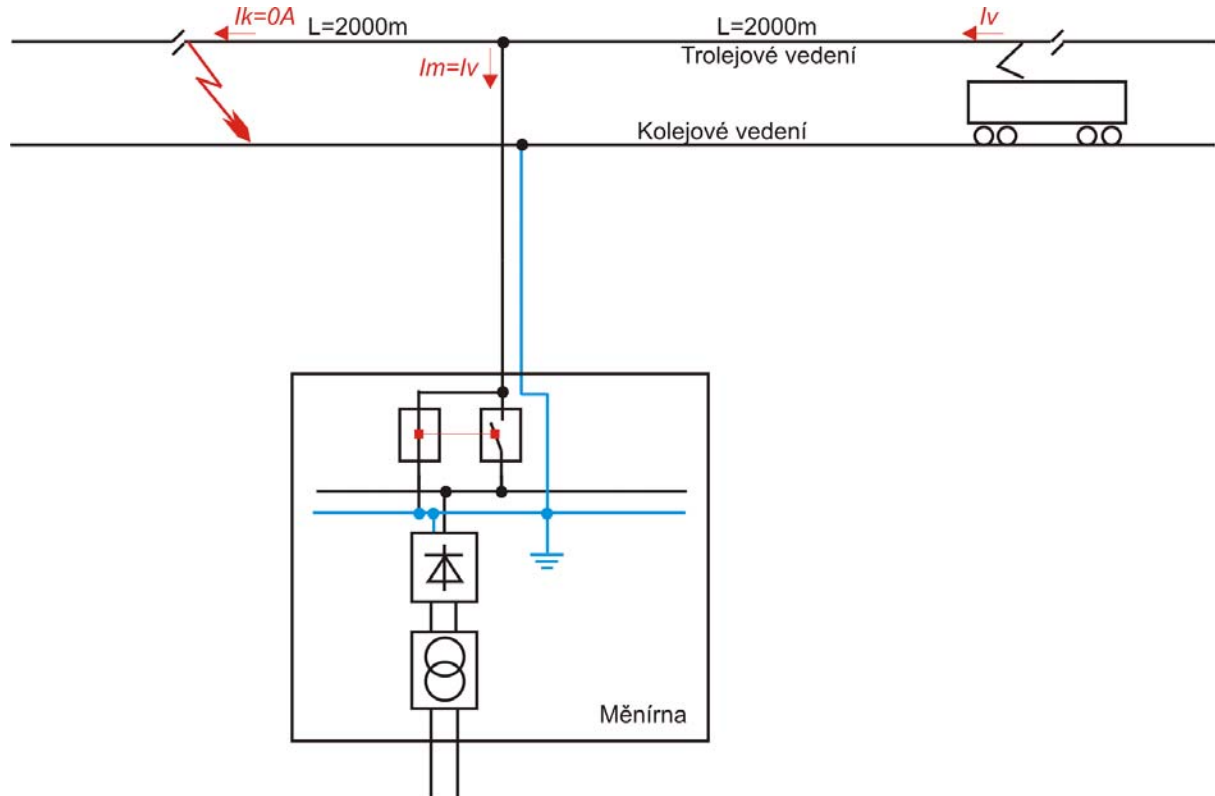
Pro vozidlo platí, že vzdálený zkrat bude také bez problémů detekovat.

Pro většinu stávajících úseků městských drah v ČR tedy není třeba zavádět jakákoliv bezpečnostní opatření před zahájením provozu vozidel s rekuperací nebo před připojením stacionárních akumulátorů el. energie. Přesto je dále v práci odvozen a připraven simulační model, který umožní provádět rychlé kontrolní výpočty např. pro nastavení spouští rychlovypínačů a ověření bezpečné detekce zkratu vozidlem a měnírnou. Tento model umožnil pro výše uvedený příklad napájecího úseku odhalit některé nebezpečné stavy, které výše uvedený „statický“ výpočet s řadou zjednodušení nemohl postihnout.

14.4 Ochranná opatření pro zabezpečení trakční sítě s rekuperací během zkratů

Uzemnění trolejového vedení v měničnĚ

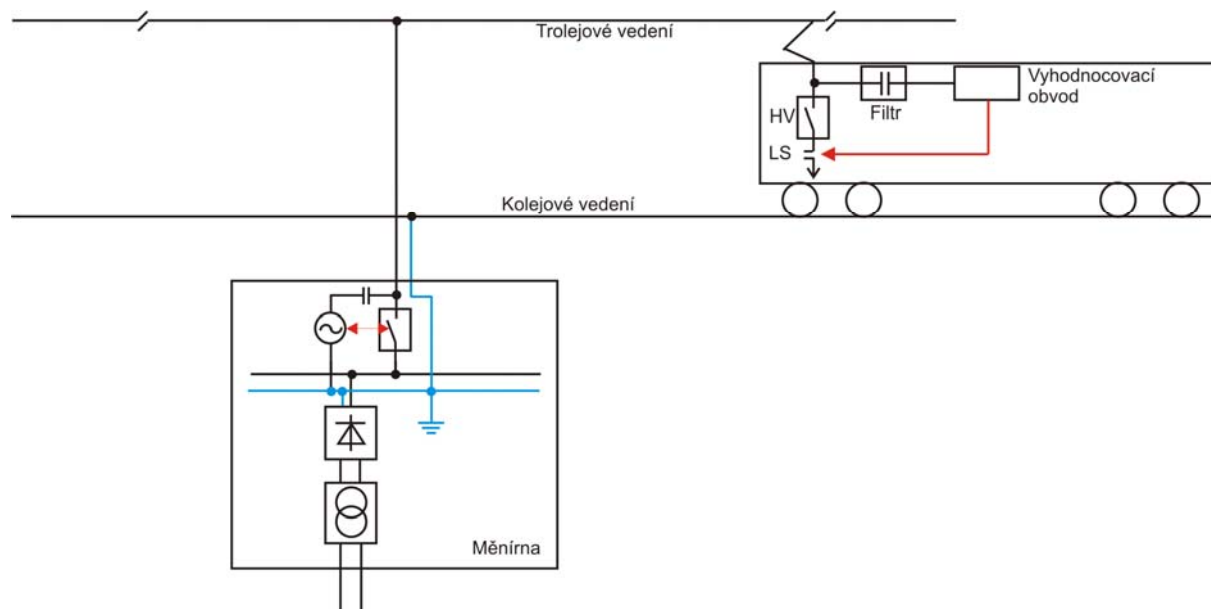
Toto řešení je vhodné pro dlouhé úseky vedení, např. úsek mezi městskou aglomerací a letištěm nebo tunel pod vodním tokem a v neposlední řadě pro železniční dopravu. V současnosti je trolejové vedení v měničnĚ pouze odpojeno při zkratu rychlovyvínačem. Pro snížení elektrického odporu vedení mezi vzdáleným zkratem a vozidlem se jeví výhodné, když měnična po vypnutí svého zkratového proudu uzemní vývod kabelového napájecího vedení. Pokud je měnična v bezprostřední blízkosti trati, zlepšit tak zkratové poměry při napájení do středu úseku pro rekuperující vozidlo o 50%. Princip tohoto opatření je patrný z následujícího obrázku. Celé opatření si vyžádá instalaci spínacího přístroje do měničny, jehož stav bude bezprostředně vázán na stav rychlovyvínače. Nespornou výhodou tohoto řešení je bezpečnost místa zkratu, které je kryto uzemněním v měničnĚ před napětím rekuperujících vozidel, které vjedou do úseku na opačném konci.



Obr. 30. Uzemnění trolejového systému v měničnĚ

Stavový signál měřirny

Do trolejového vedení je na napájecí napětí superponován středo nebo vysokofrekvenční signál, který pokud je přítomen informuje vozidla v úseku o tom, že měřirna je připojena. V případě, že měřirna detekuje zkrat a je vypnuta, je vypnut i vysílač signálu. Ztráta signálu pak vozidla či akumulátory informuje o zákazu rekuperace. Toto řešení, přestože se zdá jednoduché nese sebou potřebu instalovat do vstupních obvodů všech vozidel s možností rekuperace oddělovací filtry a vyhodnocovací obvody. Dalším nedostatkem, který ovšem není příliš pravděpodobný, ale přesto je možný, je situace, kdy měřirna nedetekuje zkrat. Možnost vzniku této situace je popsána v článku 15.4. Princip opatření je na následujícím obrázku.



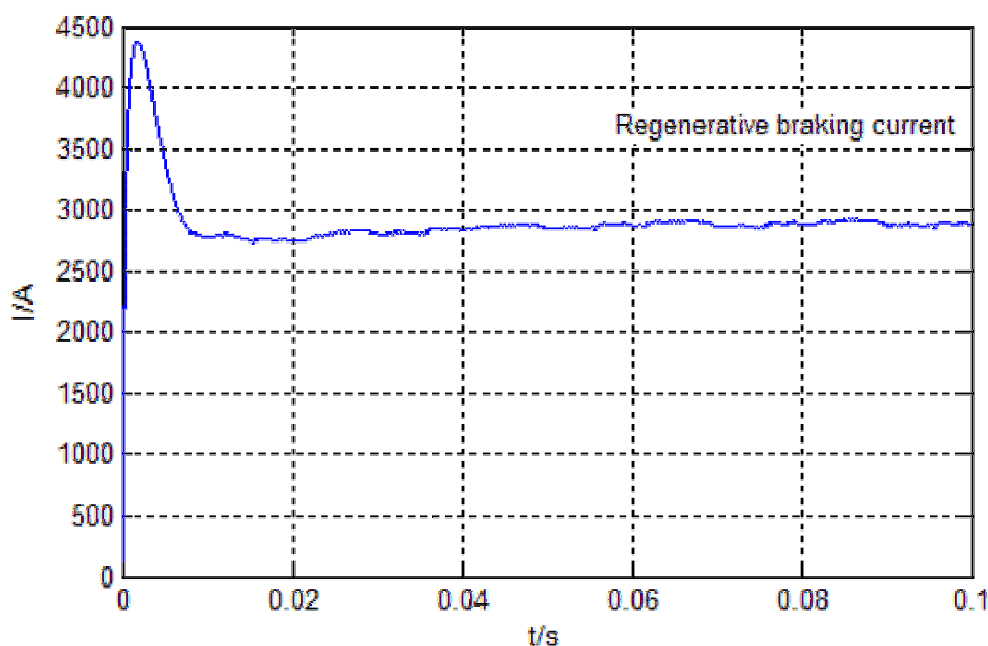
Obr. 31. Princip šíření stavového signálu měřirny

DDL Ochrana

DDL ochrana je podrobně popsána v [12]. Principem této ochrany je sledování charakteru nárůstu proudu v trakčním vedení. Simulacemi bylo dokázáno, že nárůst proudu způsobený trakčním vozidlem, které právě započalo s rekuperačním brzděním má poněkud odlišný charakter než nárůst proudu při vzdáleném zkratu. Jak je patrné např. z průběhu zkratového proudu v kapitole 16.2 nelze použít pro detekci zkratu ochranu typu $\frac{di}{dt}$, protože tato ochrana by reagovala jak na vzdálené zkraty,

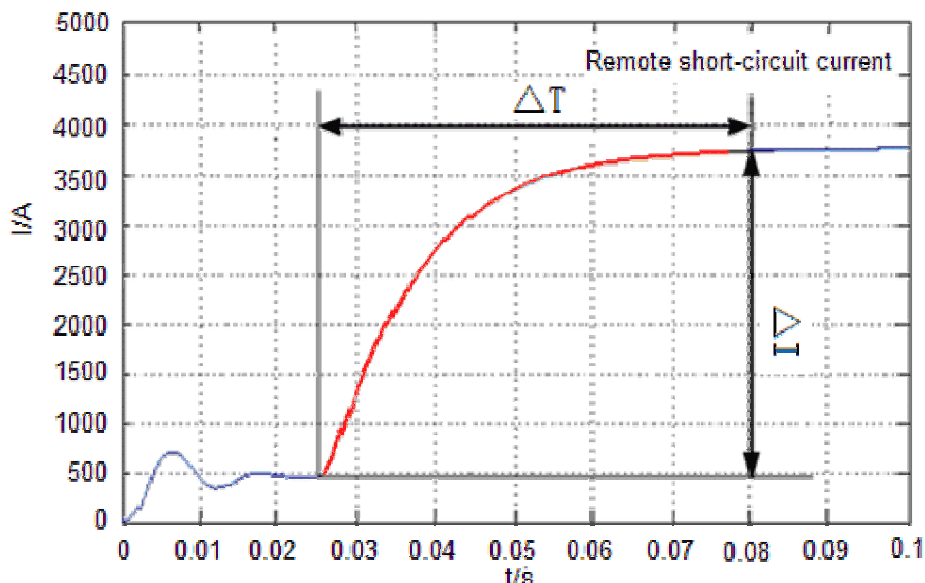
tak bohužel i na přechodový děj na počátku rekuperačního brzdění. Je proto nutno doplnit ochranu $\frac{di}{dt}$ o sledování delšího inkrementu trakčního proudu.

Kompletní simulací trakčního pohonu vozidla zahrnující asynchronní trakční motor, třífázový střídač a stejnosměrný meziobvod pracujících v režimu rekuperačního brzdění s užitím pulzně šířkové modulace a vektorovým řízením trakčního motoru vznikl průběh nárůstu brzdného (rekuperačního) proudu vozidla. Na Obr. 32. konkrétně pro vozidlo pekingského metra linky č. 5. viz. [12].



Obr. 32. Průběh brzdného proudu vozidla při rekuperaci

Dále byla provedena simulace průběhu proudu při vzdáleném zkratu v trakční síti výše zmíněné linky metra, viz. Obr. 33. Z obrázku je patrný nárůst proudu typický pro obvod indukčního charakteru, srovnatelný s výsledky simulací provedených v kapitole 16.2 na náhradním schématu v programu PSpice. V obrázku jsou vyznačeny inkrementy proudu ΔI a zpoždění ΔT .



Obr. 33. Průběh proudu při vzdáleném zkratu

Vlastní funkce DDL ochrany je následující: Část ochrany sledující strmost nárůstu proudu $\frac{di}{dt}$ aktivuje start měření proudu, ten je po pevně daném zpoždění ΔT opakován a pokud proud přesahuje nastavenou hodnotu rozdílu ΔI ochrana vybaví spoušť rychlovyvínače.

Nevýhoda tohoto druhu ochrany je především její velká prodleva, která vede k vypínání zkratu až v době takřka ustáleného zkratového proudu.

Výhodou této ochrany je schopnost odlišovat vzdálené zkraty od ostatních přechodových dějů v trakční síti.

V současné době bylo publikováno několik odborných článků popisujících tento způsob ochrany, běžně se tato ochrana zatím nepoužívá a není považována za 100% spolehlivou.

15 Model trakční sítě pro výpočty zkratových poměrů při rekuperaci

15.1 Elektrické parametry vedení trakční sítě

Vzájemné zapojení jednotlivých vodičů tvořících trakční síť je znázorněno na následujícím schématu Obr. 34. Vzhledem k tomu, že trakční síť je stejnosměrná a délka úseků trolejových vedení se pohybuje pouze okolo 1000 m, není uvažováno

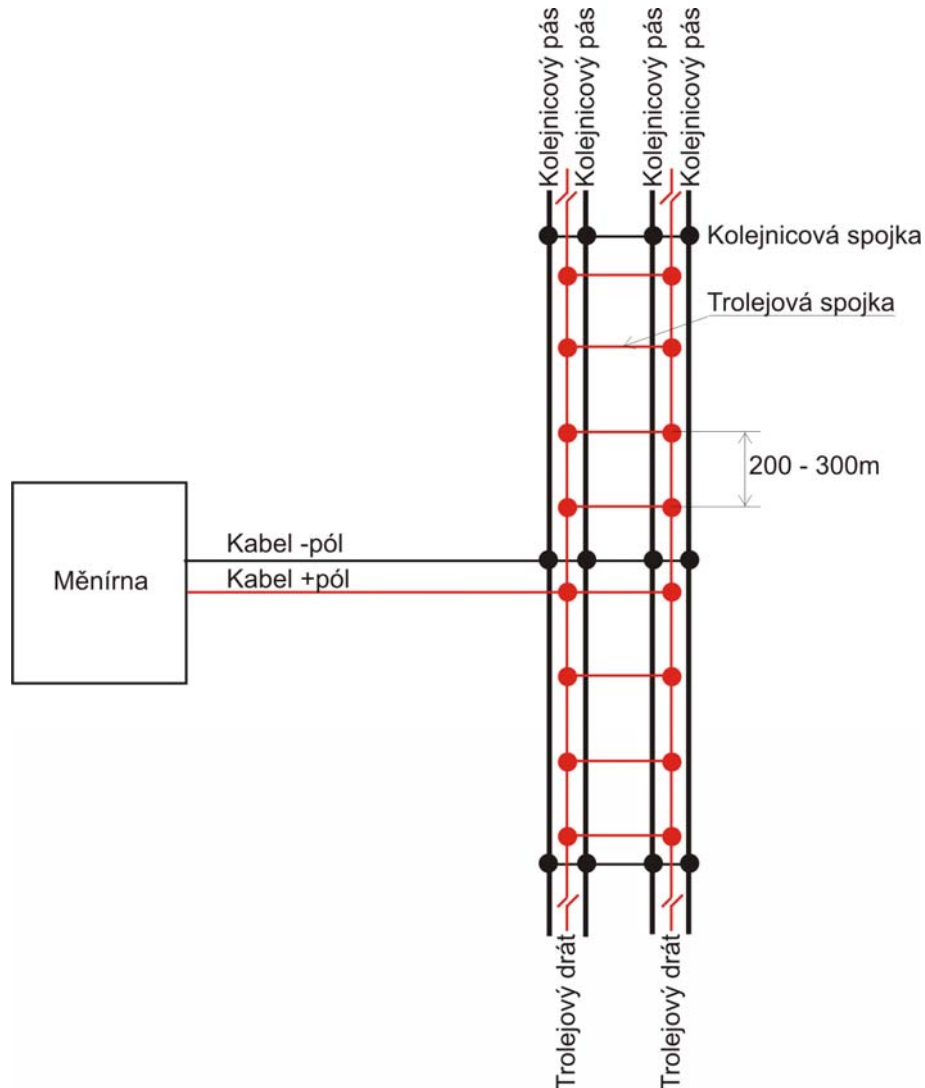
vedení s rozprostřenými parametry, ale elektrické vlastnosti vedení jsou charakterizovány diskrétními idealizovanými prvky rezistor, induktor a kapacitor.

Měrný elektrický odpor

Hodnoty měrného elektrického odporu a další důležité vlastnosti vodičů v trakční síti jsou v následující tabulce:

Název vodiče	Druh vodiče	Materiál	Měrný elektrický odpor r [Ω/km]
Kabel +pól	Kabel AYKCY 1x500mm ²	Elektrovodný hliník	0,0625
Kabel -pól	Kabel AYKCY 1x500mm ²	Elektrovodný hliník	0,0625
Kolejnicová spojka	Kabel CYY 240mm ²	Elektrovodná měď	0,073
Trolejová spojka	Kabel CYY 185mm ²	Elektrovodná měď	0,095
Trolejový drát	Trolejový drát 150mm ²	Kadmiovaná měď	0,1195
Ojetý trolejový drát	Trolejový drát 120mm ²	Kadmiovaná měď	0,149
Kolejnicový pás	Žlábková bloková kolejnice 7672mm ² , hmotnost 60,23kg/m	Ocel	0,019
Kolejnicový pás	Žlábková kolejnice 8289mm ² , hmotnost 65,07kg/m	Ocel	0,018

Tabulka 14. Měrný elektrický odpor vodičů v trakční síti



Obr. 34. Vzájemné zapojení vodičů v trakční síti

Pro ulehčení výpočtů je možno zavést měrný odpor traťového vedení r_T (odpor kolejnic a trolejových drátů). Pro výpočty a simulace v této práci si stanovme sestavu, která je použita na lince č. 4 PmDP a odpovídá provoznímu opotřebení (průřez trolejového drátu 120 mm^2), tedy 4 x žlábková bloková kolejnice a 2 x trolejový drát 120 mm^2 . Trolejové spojky jsou tvořeny velmi krátkými kabely a jejich odpor je bezvýznamný, proto je zanedbáme.

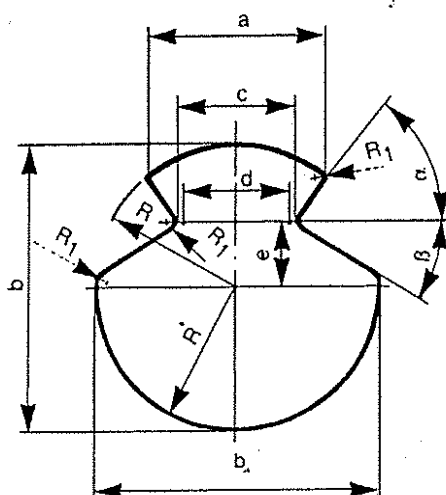
$$r_T = \frac{1}{4} R_{koleje} + \frac{1}{2} R_{troleje} = \frac{1}{4} \cdot 0,019 + \frac{1}{2} \cdot 0,149 = 0,08 \Omega / km \quad [15.1.1]$$

Indukčnost venkovního vedení

Indukčnost venkovního vedení (trolejové a kolejové) má zásadní vliv především na přechodový děj vzniklý při zkratu a určuje časovou konstantu nárůstu zkratového proudu τ .

V literatuře existuje celá řada postupů výpočtu indukčnosti pro různé uspořádání vodičů a různé poměry průměru vodičů a jejich vzájemné vzdálenosti. Pro případ venkovních vedení městských drah je možno uvažovat následující konfiguraci. Průměr trolejového drátu r viz. Obr. 35. vůči vzdálenosti drátu od kolejového pásu R je velice malý.

*Tvarovaný Cu trolejový drát
dle ČSN 42846*



jmen. průřez (mm ²)	b		
	jmen.	min.	max.
80	10.665	10.45	10.85
100	11.955	11.70	12.20
120	13.070	12.82	13.32
150	14.600	14.30	14.90

Obr. 35. Rozměry trolejového drátu

Vzdálenost trolejového drátu od kolejového pásu je dána výškou vedení nad vozovkou, která je dána místními možnostmi komunikace. Výška troleje je například snížena pod mosty a v podjezdech, zvýšena je pak v místě křížení s tranzitní komunikací atd. Mezní a jmenovité hodnoty výšky trolejového vedení v ČR stanovuje norma ČSN 33 3516.

Maximální výška	6 m
Minimální výška na společném tělese s ostatním provozem	4,8 m
Minimální výška na vlastním tělese dráhy	4,4 m
V nových objektech (vozovny, stání)	4,4 m
V objektech již zbudovaných	4,3 m
V podjezdech a tunelech	4,3 m
Střední výška (pro výpočty)	5,5 m

Tabulka 15. Výška trolejového drátu podle ČSN 33 3516

Střední výška vedení se pohybuje okolo 5,5 m nad osou koleje, proto je tato hodnota použita pro výpočty. Indukčnost vedení je nejen v případě zkratu podélný parametr vedení. V případě městských drah, kde jsou dva trolejové dráty zapojeny paralelně, se bude jednat o paralelní zařazení dvou indukčností shodné velikosti.

Pro výpočet měrné indukčnosti jednoho trolejového drátu nad kolejí se řídíme následující úvahou. Obvod je tvořen vodičem (trolejovým drátem) a zpětným vodičem (kolejí), které tvoří smyčku vzdálených vodičů a pro jejich indukované napětí bude platit vztah:

$$-u_i = (L' + L'' + M) \cdot \frac{di}{dt}, \quad [15.1.2]$$

kde L' je indukčnost zahrnující vliv magnetického pole vně vodiče

L'' je indukčnost zahrnující vliv magnetického pole uvnitř vodiče

M je vzájemná indukčnost mezi rovnoběžnými vodiči

Protože podle Lencova zákona působí indukované napětí vždy proti změně je uvedeno se záporným znaménkem.

Vztah pro L' je odvozen ze základních vztahů:

$$\Phi = B \cdot S \quad [15.1.3]$$

dále

$$\Phi = \int_{x=r}^R \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H dx = \int_{x=r}^R \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{I}{2\pi x} \cdot dx, \quad [15.1.4]$$

kde dx je element kolmé vzdálenosti od vodiče. Dále upravíme na:

$$\Phi = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{2\pi} \int_{x=r}^R \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{2\pi} (\ln R - \ln r) = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot I \cdot \ln \frac{R}{r}$$

odtud s použitím:

$$\Phi = L \cdot I \quad [15.1.5]$$

$$L' = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad [15.1.6]$$

Pro stanovení L'' vycházíme z energetické rovnice a předpokládáme rovnoměrné rozložení proudu po průřezu vodiče.

$$W = \frac{1}{2} \int B_x \cdot H_x \cdot dV = \frac{1}{2} \int \mu_0 \cdot \mu \cdot H_x^2 \cdot dV \quad [15.1.7]$$

Pro H válcového vodiče platí:

$$H = \frac{x}{2\pi r^2} \cdot I \quad [15.1.8]$$

po dosazení:

$$W = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2} \int_{x=0}^r \left(\frac{x \cdot I}{2\pi r^2} \right)^2 \cdot 2\pi x \cdot dx = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{16\pi} \cdot I^2$$

Dále použijeme pro vyjádření L'' jiný vztah pro energii

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad [15.1.9]$$

odtud L'' vyjádříme jako

$$L'' = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{8\pi} \quad [15.1.10]$$

Pro vzájemnou indukčnost mezi vodičem a zpětným vodičem M využijme vztah jako pro indukčnost zahrnující vliv vnějšího mag. pole, kde nahradíme r kolmou vzdáleností mezi vodiči d_{11} .

$$M = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cdot \ln \frac{R}{d_{11}} \quad [15.1.11]$$

Dosadíme hodnoty permeability vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m a protože se jedná o vzdušné vedení relativní permeabilitu $\mu_r = 1$

Pak je celková indukčnost

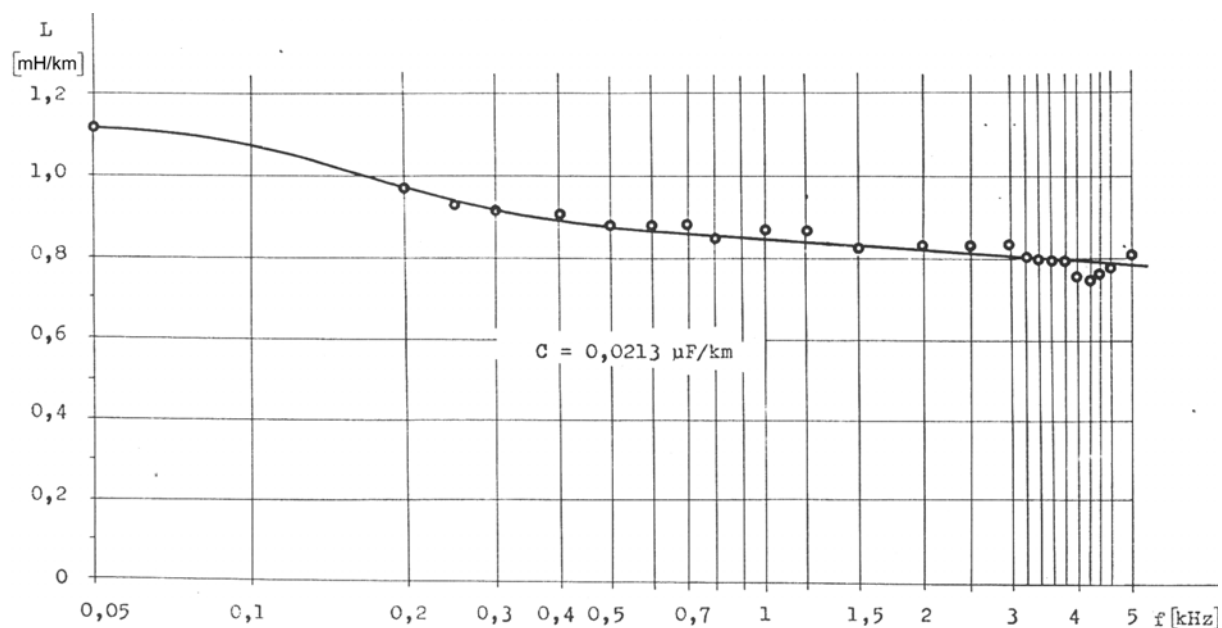
$$L = \left(0,46 \cdot \log \frac{d_{11}}{r} + 0,05\mu \right) = 0,46 \cdot \log \frac{d_{11}}{\zeta \cdot r} \left[\frac{mH}{km} \right], \quad [15.1.12]$$

kde $\zeta = 0,75 \approx 0,82$ a zahrnuje vliv skin efektu.

Po dosazení odpovídajících hodnot vychází pro jednu stopu trolejového vedení měrná indukčnost:

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{5,5}{0,8 \cdot 0,0146} = 1,23 \frac{mH}{km} \quad [15.1.13]$$

Pro prokázání správnosti výpočtu uvádím naměřeného hodnoty trolejového vedení s obdobnou výškou trolejového drátu. Měření provedlo VÚŽ a je zdokumentováno v literatuře [6].



Obr. 36. Měření indukčnosti venkovního vedení

Měrná indukčnost pro konfiguraci trakčního vedení městské dráhy z obrázku 34. je tedy 0,62 mH/km.

Kapacita venkovního vedení

Měrná kapacita vedení je závislá na počtu a průměru vodičů. Kapacitou se rozumí kapacita mezi trolejovým vedením a zpětným kolejnicovým vedením. Kapacita je příčný parametr. Pro výpočet lze využít vztah pro válcovou elektrodu nad uzemněnou deskou. Odvození vztahu viz. [5] str. 141.

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot l}{\ln \frac{2h}{d}}, \quad [15.1.14]$$

kde l je délka vodičů

h je výška troleje

d je průměr trolejového drátu

hodnoty permitivity pro vzdušné vedení jsou uvedeny níže.

$$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\varepsilon_r = 1$$

Po dosazení získáváme hodnotu kapacity pro jednu stopu vedení:

$$C = \frac{2\pi \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot 1000}{\ln \frac{2 \cdot 5,5}{0,0146}} = 8,4 \frac{nF}{km}$$

Pro dvoustopé vedení pak platí, že kapacity jsou zařazeny paralelně, tudíž měrná kapacita vedení vzroste na 16,8 nF/km. Tím jsme získali kapacitu vlastního trolejového systému vůči kolejovému zpětnému vedení. Do výpočtu však nebyly nijak zahrnuty kapacity izolátorů, izolačních armatur, svodičů přepětí a trolejových spojek.

Odborná literatura [6] uvádí měrnou kapacitu pro jednokolejnou železniční trať s řetězovkovým vedením a zesilovacím lanem na stejnosměrné trakci 20 nF/km.

Indukčnost kabelového napájecího vedení

Stanovit přesně tuto veličinu je možno pouze měřením na reálném vedení, protože kabel je veden v různých prostředích a v různé vzdálenosti od zpětného vedení. V případě krátkých kabelových vedení je indukčnost kabelu zanedbatelná. Jeden z dodavatelů kabelu AYKCY 1x500mm² uvádí pro kabel hodnotu měrné indukčnosti 0,6 mH/km. Některé prameny [7] hovoří o tom, že indukčnost jednožilového kabelového vedení je přibližně třetinová oproti odpovídajícímu vedení vzdušnému. Podle tohoto tvrzení by pro náš případ měrná indukčnost činila 0,41 mH/km.

Kapacita kabelového napájecího vedení

Kapacitu kabelového napájecího vedení tvořeného kabelem AYKCY 1x500mm² vypočítáme podle následujícího vztahu, jehož odvození naleznete v [5] str. 139. Izolace kabelu je tvořena opláštěním z PVC běžného typu jehož relativní permitivita je pro DC a nízké frekvence 3,5.

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{2\pi \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot 3,5}{\ln \frac{0,0172}{0,0147}} = 1,24 \frac{nF}{km}, \quad [15.1.15]$$

kde R je vnější poloměr kabelu a

r je poloměr vodivého jádra

Výše uvedené vypočtené hodnoty byly konzultovány s odborníky SŽDC, kteří provádí obdobné výpočty pro železniční trakční vedení a byly shledány jako dostatečně reprezentativní.

15.2 Měrné hodnoty elektrických veličin trakční sítě

Účelem této kapitoly je shrnout vypočtené poznatky z předchozí kapitoly do přehledové tabulky pro jednoduché použití v modelu trakční sítě. Pro kabelová vedení je uvažován jeden napájecí kabel (+pól) a jeden zpětný kabel (-pól) v sériovém zařazení. V tabulce jsou uvedeny odpovídající hodnoty zmíněnému uspořádání kabelových vedení.

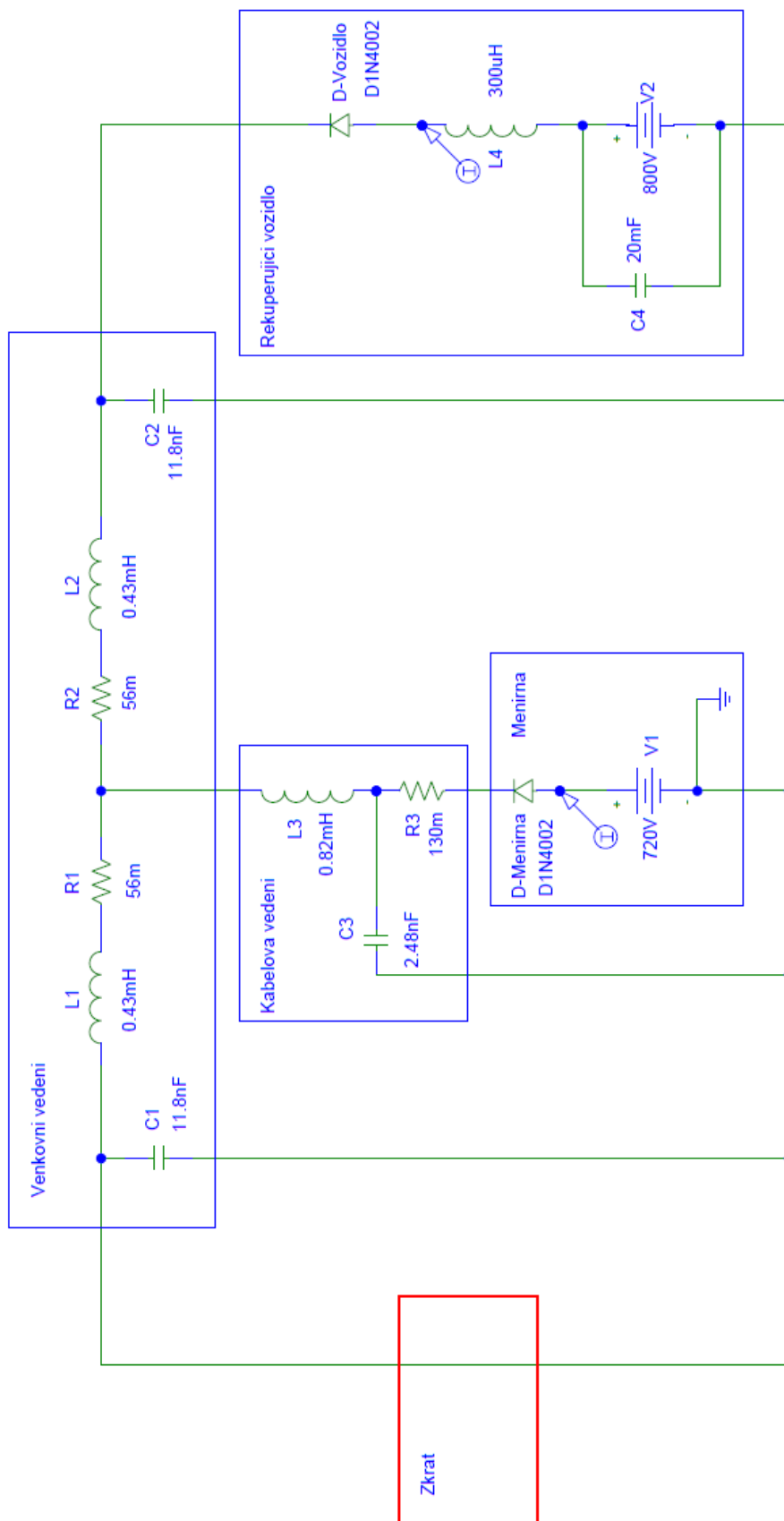
	Měrný elektrický odpor [Ω/km]	Měrná kapacita [nF/km]	Měrná indukčnost [mH/km]
Venkovní vedení	0,08	16,8	0,62
Kabelová vedení	0,13	2,48	0,82

Tabulka 16. Měrné el. parametry trakční sítě

15.3 Úplný model napájecího úseku

Simulační model je vytvořen v programu PSpice, který umožňuje výpočty přechodových dějů a zároveň obsahuje ideální prvky rezistor, kapacitor, induktor a ideální zdroj napětí, kterými je především model tvořen. V modelu je dále použita dioda, simulující usměrňovač v měničce a měnič ve vozidle. Jejím úkolem v modelu je zamezit toku proudu do zdrojů a simulovat úbytek napětí na polovodičích výkonových měničů. Ostatní prvky, které program PSpice obsahuje nedoporučuji používat, protože prvky jsou primárně určeny pro slaboproudé aplikace a v silnoproudé aplikaci způsobují nepřesnosti nebo dokonce chyby. Model vystihuje napájecí úsek stejného typu jako je znázorněn na Obr. 31. pro soustavu venkovního vedení, která je popsána na Obr. 34. Modifikace modelu např. na větší množství napájecích kabelů či jinou konfiguraci vedení je snadná.

Samotný model s popisem prvků je na následujícím schématu. Elektronickou verzi modelu naleznete na příloženém CD.



Obr. 37. Úplný model napájecího úseku

Popis úplného modelu napájecího úseku:

C1 – Kapacita venkovního vedení mezi zkratem a měnírnou

L1 – Indukčnost venkovního vedení mezi zkratem a měnírnou

R1 – Elektrický odpor vedení mezi zkratem a měnírnou

C2 – Kapacita venkovního vedení mezi vozidlem nebo akumulátorem energie a přípojným místem napájecích kabelů měírny

L2 – Indukčnost venkovního vedení mezi vozidlem nebo akumulátorem energie a přípojným místem napájecích kabelů měírny

R2 – Elektrický odpor venkovního vedení mezi vozidlem nebo akumulátorem energie a přípojným místem napájecích kabelů měírny

C3 – Kapacita napájecího a zpětného kabelu

L3 – Indukčnost napájecího a zpětného kabelu

R3 – Elektrický odpor napájecího a zpětného kabelu

U1 – Spínač představující zkrat v určitém časovém úseku.

Měnírna – je tvořena tvrdým napěťovým zdrojem *V1* a diodou *D-Měnírna*, která simuluje usměrňovač měírny.

Rekuperující vozidlo – je tvořeno tvrdým napěťovým zdrojem *V2* a dále prvky *L4* a *C4*, které představují vstupní filtr vozidla. Dioda *D-Vozidlo* brání toku proudu vozidlem v případě zvýšeného napětí v síti nad 800V, kdy je rekuperace zakázána.

16 Aplikace modelu k posouzení závažnosti vzdáleného zkratu

Mějme nyní opět stejný případ jako v článku 14.3 Závažnost vzdáleného zkratu v sítích městských drah s tím rozdílem, že již nezanedbáme napájecí a zpětné kabelové vedení a budeme jej uvažovat v délce 1000m. To při klasickém způsobu výpočtu povede ke změně ustáleného zkratového proudu měírny na:

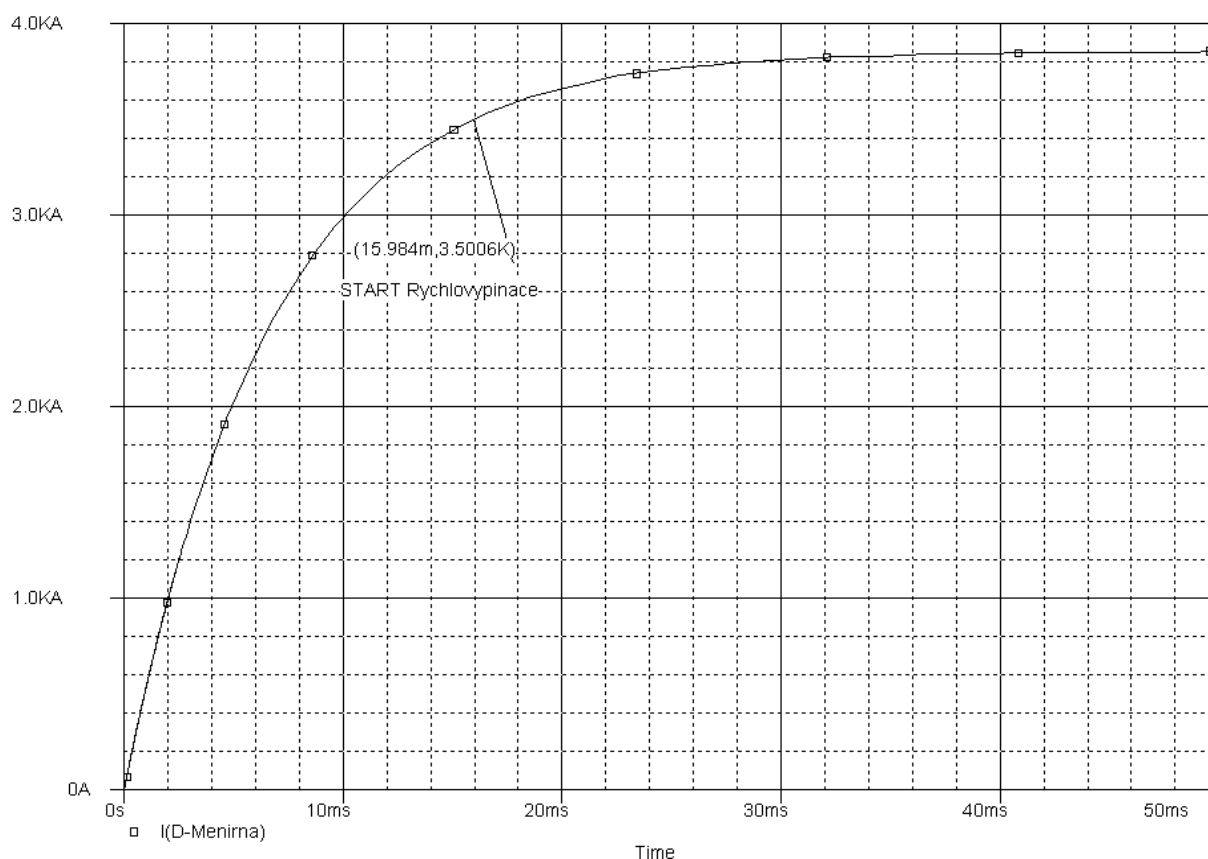
$$I_{kM} = \frac{U_{m\ddot{e}n\ddot{r}n\ddot{y}}}{r_{venkovn\ddot{y}} \cdot l + r_{kabelov\ddot{e}} \cdot l} = \frac{720}{0,08 \cdot 0,7 + 0,13 \cdot 1} = 3,87kA, \quad [16.1.1]$$

Již nyní vidíme, že měírna se jmenovitým proudem 4kA (jak je uvedeno v definici příkladu) nemá pro tento úsek opodstatnění, protože by díky nepříznivým zkratovým poměrům svůj výkon nemohla využít. Předpokládejme tedy, že měírna

má nastavenou nadproudovou ochranu na 3,5kA. Uvažujme dále, že měnič je opatřena ochranou typu $\frac{di}{dt}$ s nastavením 450A/ms.

16.2 Kritické stavy v napájecím úseku

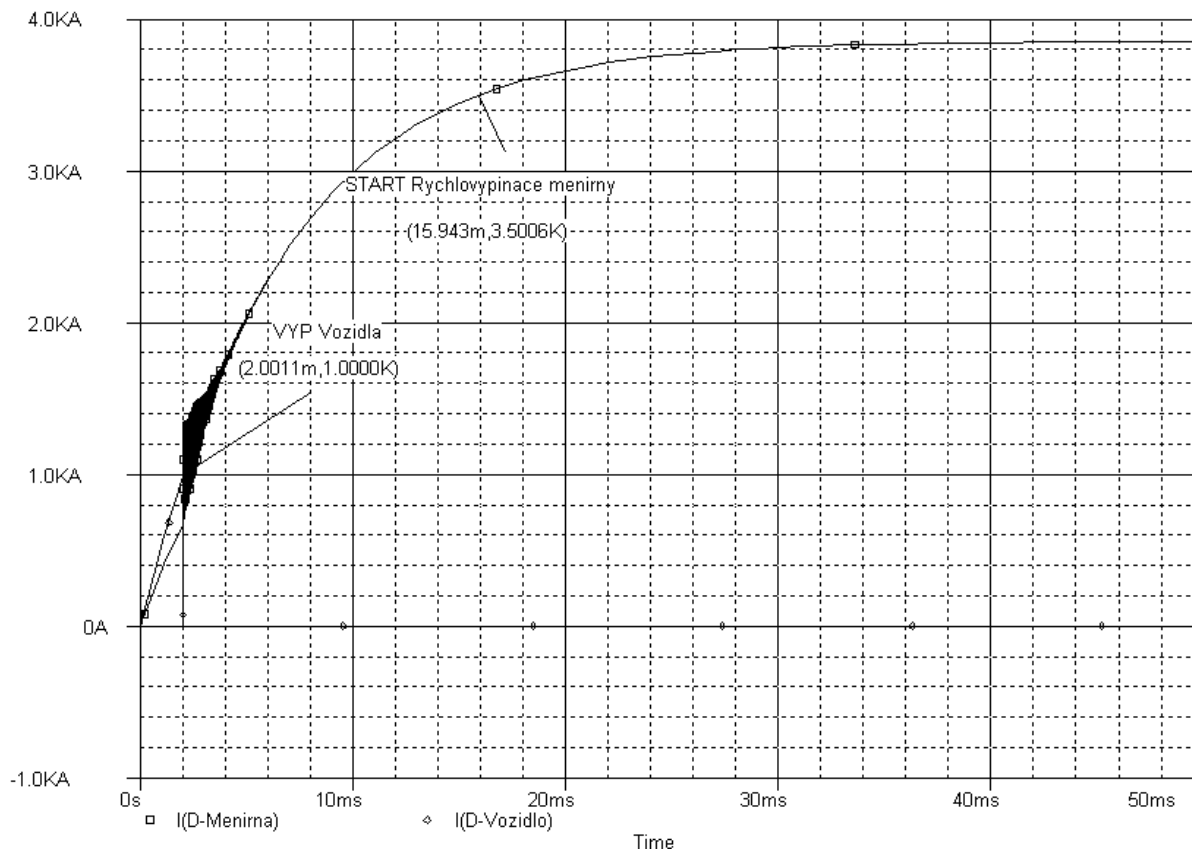
Pokud by v napájecím úseku nebyl žádný akumulátor energie ani rekuperující vozidlo vypadal by průběh zkratového proudu následovně:



Obr. 38. Zkratový proud měřirny bez dalších zdrojů

Z obrázku je patrné, že zkrat měnič detekuje proudovou spouští 16ms po jeho vzniku a započne s vypínáním rychlo vypínací. Zkrat by také mohla detekovat ochrana typu $\frac{di}{dt}$ při nastavení spouště na strmost proudu 450A/ms.

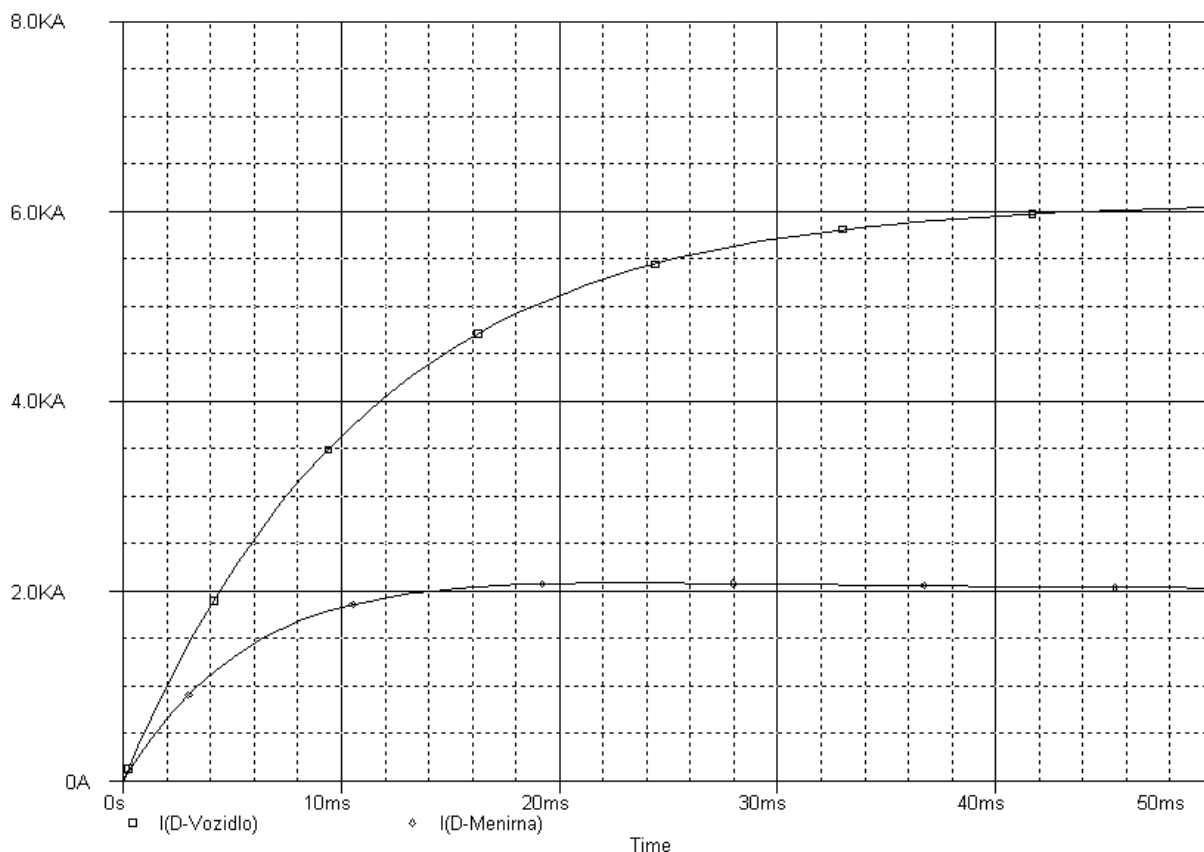
V případě, že na konci úseku je akumulátor nebo v něm právě zahájí rekuperaci vozidlo, které má nastavenou nadproudovou ochranu pro rekuperaci na 1kA a po překročení této hranice se okamžitě odpojí bude vypadat průběh zkratových proudů následovně, viz. Obr. 39.



Obr. 39. Zkratový proud měřirny při přítomnosti vozidla, které zkrat detekuje

Nadproudová spoušť zkrat detekuje a započne s vypínáním v čase 16ms od vzniku zkratu, jako v případě, kdy měřirna byla jediným zdrojem pro napájecí úsek. V tomto případě by však ochrana typu $\frac{di}{dt}$ v měřirně selhala, protože největší strmost proudu měřirny je pouze 350A/ms.

Dalším zkoumaným případem je stav, kdy do zkratovaného úseku vjede skupina vozidel, které jsou svým výkonem schopny trvale udržovat napětí ve svém okolí na hodnotě 800V. Tento stav je teoretický, ovšem ukazuje na existenci mezního výkonu vozidel v úseku. Pokud je tento mezní výkon překročen nebude měřirna schopna detekovat zkraty, protože část zkratového výkonu převezmou vozidla. Proudové poměry v tomto stavu jsou na Obr. 40.

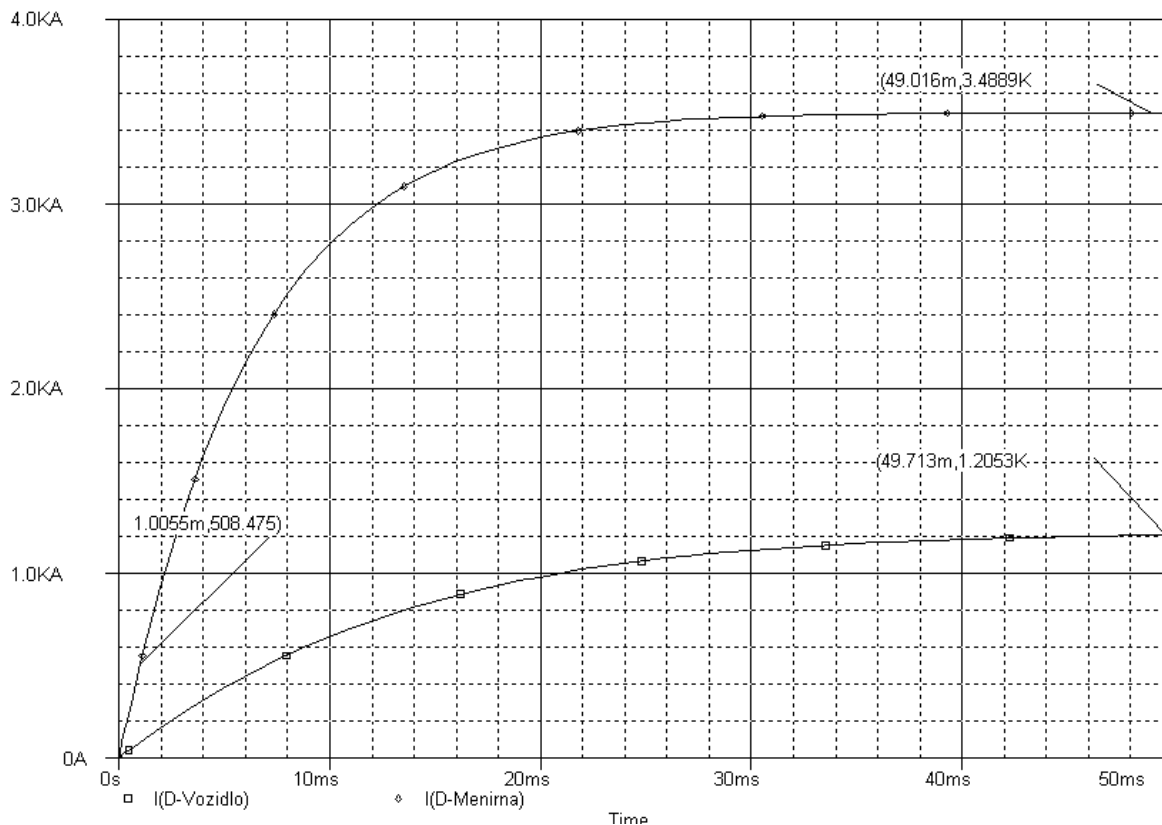


Obr. 40. Zkratový proud měnirny a vozidla, které zkrat nedetekuje

Z výše uvedeného průběhu proudu je zřejmé, že pokud rekuperující vozidla, popř. akumulátory el. energie převezmou část zkratového výkonu, vystoupí zkratový proud měnirny pouze na hodnotu 2kA, což je hodnota odpovídající provoznímu stavu a ani strmost zkratového proudu nepostačí k vybavení ochrany typu $\frac{di}{dt}$.

16.3 Mezní výkon ostatních zdrojů v napájecím úseku

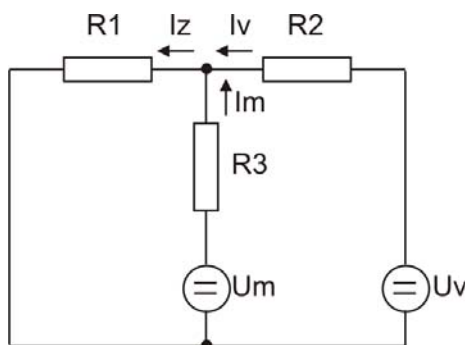
Jak vyplynulo z předchozího odstavce, existuje mezní výkon vozidel a akumulátorů v napájecím úseku (ostatní zdroje), které převezmou zkratový výkon sítě a znemožní detekci zkratu měnirnou. Pro zkoumaný případ byl mezní výkon ostatních zdrojů simulací určen na $P_{mez} = 400kW$. Výsledek simulace je na Obr. 41. Tento mezní výkon je již v reálném provozu možno běžně dosáhnout a jeho překročení znamená ohrožení bezpečnosti.



Obr. 41. Mezní výkon ostatních zdrojů

Z obrázku je patrné, že nadproudová ochrana měřirny by na zkrat nereagovala, neboť zkratový proud vystoupí pouze na hodnotu 3,49kA. V tomto případě by však mohla zasáhnout ochrana typu $\frac{di}{dt}$ s nastavením 450A/ms. Proud ostatních zdrojů je v tomto případě 1,2kA.

Pro ověření správnosti simulace mezního výkonu ostatních zdrojů bude nyní proveden analytický výpočet pro ustálený stav. Obvod při vzdáleném zkratu lze nahradit náhradním schématem viz. Obr. 42.



Obr. 42. Náhradní schéma pro výpočet mezního výkonu

R_1 – elektrický odpor venkovního vedení mezi zkratem a připojením kabelového napájecího vedení měřírny

R_2 – elektrický odpor venkovního vedení mezi připojením kabelového napájecího vedení měřírny a nejvzdálenějším rekuperujícím vozidlem či akumulátorem.

R_3 – elektrický odpor kabelového napájecího vedení mezi měřírnu a venkovním vedením

U_m – jmenovité napětí na výstupu měřírny

I_m – špičkový provozní proud měřírny (nastavení nadproudové ochrany)

U_v – napětí na sběrači rekuperujícího vozidla nebo na výstupu akumulátoru při mezním výkonu

I_v – proud vozidla nebo akumulátoru při mezním výkonu

I_z – zkratový proud v místě poruchy

Pro náhradní schéma lze psát rovnice:

$$\begin{aligned} I_z &= I_m + I_v \\ U_m &= R_3 \cdot I_m + R_1 \cdot I_z \\ U_v &= R_2 \cdot I_v + R_1 \cdot I_z \end{aligned} \quad [16.3.1]$$

Z rovnic lze snadno vyjádřit vztahy pro napětí a proud vozidla při mezním výkonu.

$$U_v = \frac{R_2}{R_1} (U_m - I_m (R_3 + R_1)) + U_m - R_3 \cdot I_m \quad [16.3.2]$$

$$I_v = \frac{U_m - I_m (R_3 + R_1)}{R_1} \quad [16.3.3]$$

Pro prováděný příklad dosadíme hodnoty:

$$U_v = \frac{56 \cdot 10^{-3}}{56 \cdot 10^{-3}} (720 - 3500 (130 \cdot 10^{-3} + 56 \cdot 10^{-3})) + 720 - 130 \cdot 10^{-3} \cdot 3500 = 334V$$

$$I_v = \frac{720 - 3500 (130 \cdot 10^{-3} + 56 \cdot 10^{-3})}{56 \cdot 10^{-3}} = 1232A$$

Odtud je mezní výkon ostatních zdrojů pro daný příklad 411kW. Hodnoty se takřka shodují s výsledky simulace na modelu. Drobný rozdíl je způsoben úbytkem napětí na polovodičových měničích, které model zahrnuje, ale výpočet nikoliv. Pokud

tedy budou v napájecím úseku další zdroje kromě měničny o celkovém výkonu vyšším než 411kW, je reálná situace, že měnična ani další zdroje vzniklý zkrat nebudou detekovat a budou jej dále napájet.

16.4 Zhodnocení závažnosti vzdáleného zkratu v napájecím úseku s rekuperací energie

Příklad řešený v předchozí kapitole a zjištěné skutečnosti ukazují, že z hlediska vzdáleného zkratu přináší provoz vozidel s možností rekuperace el. energie či připojení stacionárních akumulátorů reálné riziko, že vzniklý zkrat nebude včas detekován.

Přítomnost dalších zdrojů v napájecím úseku narušuje spolehlivost ochran měničny, které jsou navrženy pro provoz bez dalších zdrojů. Nespolehlivou se stává nadproudová ochrana i ochrana typu $\frac{di}{dt}$, i když primární určení této ochrany je včasná detekce zkratů blízkých měničně.

Důležitým parametrem se jeví mezní výkon ostatních zdrojů, tedy výkon zdrojů, který postačuje k tomu, aby během zkratu výkon měničny nepřesáhl špičkovou provozní hodnotu. Proud měničny pak nedosahuje hodnot nastavených pro vypnutí vzdáleného zkratu bez cizích zdrojů v napájecím úseku měničny.

Hodnota mezního výkonu cizích zdrojů vychází v uvedeném příkladu, ale i v reálných úsecích linek MHD poměrně malá a v provozu dosažitelná i jediným moderním vozidlem. Mezní výkon lze zvyšovat zejména dostatečným dimenzováním napájecích kabelových vedení nebo stavbou měníren bezprostředně u trati. U stávajících měníren pak zesilováním tohoto vedení či aplikací některého řešení z kapitoly 14.4.

17 Energetická bilance jako podklad k tepelnému dimenzování pantografového sběrače proudu

17.1 Cíle a důvody zkoumání, souvislosti s energetickou bilancí

Proudová cesta mezi svorkou usměrňovače v měničce a svorkou trakčního měniče ve vozidle je tvořena celou řadou vodičů různých průřezů a materiálů a značným množstvím pevných rozebíratelných kontaktů. V této cestě se jako kritický jeví pantografový sběrač proudu jehož elektrický průřez je omezen vzhledem k požadavkům na mechanické chování. Pouze sběrač s optimalizovanou hmotností ramen docílí dobrého dynamického chování při jízdě vyšší rychlostí. Dále sběrač proudu představuje jediný kluzný kontakt v celé proudové dráze, který převádí jmenovitý proud vozidla. Kvalita tohoto kluzného kontaktu přímo závisí na přítlačné síle uhlíkového smýkadla k trolejovému drátu. Dobrá mechanická dynamika sběrače tedy značně vylepšuje kvalitu elektrického kontaktu.

Při vývoji pantografového sběrače proudu je nutno dosáhnout kompromisu mezi hmotností ramen a hlavice sběrače a dostatečným elektrickým průřezem ramen z hlediska oteplení průchodem trakčního proudu.

Mechanické a elektrické požadavky na pantografový sběrač proudu specifikuje norma ČSN EN 50 206-1 a ČSN EN 50 206-2. Tyto normy předepisují provádět oteplovací zkoušku pantografového sběrače proudu následujícím způsobem.

Oteplení sběrače jedoucího vozidla odst. 6.13.2 ČSN EN 50 206-1/2000 se zjistí měřením oteplení v kritických průřezech sběrače během 1 hodiny zatížení 50% jmenovitého proudu vozidla a následných 5 minut 100% jmenovitého proudu vozidla. Jako kritérium zkoušky se uvádí, že se nesmí přehřát žádná součást sběrače, což v praxi znamená, že teplota nesmí překročit 120°C zejména kvůli poškození nátěru sběrače a přehřívání trolejového drátu. Pro tuto zkoušku však není definována počáteční teplota či teplota okolí a rychlost proudění vzduchu během zkoušky. Tato benevolence normy otevírá možnosti pro výrobce sběračů, sběrač během zkoušky ofukovat (chladit) vzduchem a dovolit si tak snížit průřezy ramen pantografu a tak vylepšit jeho dynamické vlastnosti.

V důsledku výše popsaného stavu standardu pro sběrače proudu se jeví jako vhodné, připravit výpočtovou metodiku, teoretický model, který umožní kontrolu oteplení sběrače proudu před nasazením na moderní výkonné vozidlo. Tato

metodika je potřebná zejména proto, že podmínky provozu a také proudové zatížení se mění s novou rekuperační technologií, protože proudová dráha pantografu je zatěžována nejen při aktivním sběru proudu z troleje, ale také při zpětném proudu z vozidla do troleje. Pak je sběrač vystaven vyšším efektivním hodnotám trakčního proudu, protože čas zatížení sběrače se prodlužuje a nejsou zde tak dlouhé časové úseky bez proudu, v nichž se sběrač může ochlazovat.

Část práce je proto zaměřena na vytvoření a verifikování tepelného modelu pantografového sběrače proudu na skutečné provozní proudy vozidla Škoda Transportation na náročné trati.

17.2 Principy přenosu tepla

Termín teplo je definován v prvním termodynamickém zákonu jako energie přecházející přes hranici termodynamického systému v závislosti na rozdílu teplot uvnitř a vně systému. Druhý termodynamický zákon definuje, že k procesu přenosu tepla vždy dochází z prostředí s vyšší teplotou do prostředí s nižší teplotou. Teplo předávané za jednotku času se nazývá tepelný tok viz. [17].

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}, \quad [17.2.1]$$

Tepelný toku který se uskuteční za jednotku času přes plochu kolmou k proudění tepla lze vyjádřit vztahem:

$$\dot{q} = \frac{d\dot{Q}}{dS}, \quad [17.2.2]$$

kde S je plocha, kterou se proudění tepla uskutečňuje.

Obecně jsou známy tři základní druhy přenosu tepla - Vedení, Sálání, Proudění.

Vedení

Vedení tepla je přenos energie v důsledku molekulárních interakcí mezi sousedními molekulami způsobené jejich náhodným pohybem. Takto probíhá vedení tepla v pevných látkách, kapalinách i plynech a nevyžaduje žádný makroskopický pohyb nebo průtok látky. S rostoucí teplotou roste i náhodný pohyb molekul a tím kinetická energie na molekulární úrovni. Kolize mezi sousedními molekulami způsobuje přesun energie z těch s vyšší kinetickou energií na ty s nižší kinetickou energií. U kovů navíc vedení tepla umocňují volné elektrony.

Pro účely výpočtu oteplení pantografového sběrače proudu nemá smysl zabíhat do statistických výpočtů těchto molekulárních srážek a vystačíme si se základní rovnicí vedení tepla, tzv. Fourierovým zákonem.

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad [17.2.3]$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti v $[\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$

$\frac{\partial T}{\partial x}$ je místní teplotní gradient ve směru tepelného toku x .

Znaménko mínus charakterizuje skutečnost, že pozitivní přenos tepla je orientován ke snižování teploty.

V technických aplikacích se uvažuje předávání tepla vedením pouze do okolního kovového materiálu. Pro výpočet množství tepla, které projde libovolným kolmým průřezem S za dobu τ lze užít vztah:

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{l} \cdot \tau, \quad [17.2.4]$$

kde l je délka tělesa neboli délka dráhy tepelného toku.

Sálání

Energie vyzařovaná jakýmkoliv tělesem do okolí ve formě elektromagnetických vln se nazývá záření neboli sálání. Narozdíl od vedení a proudění tepla - přenosu energie z místa A do místa B, není sálání vázáno na molekulární struktury, proto mohou elektromagnetické vlny zajistit přenos tepla i přes vakuum. Každý objekt emituje tepelné záření odpovídající jeho povrchové teplotě. Maximálního vyzařování dosahuje absolutně černé těleso. Celkové záření (emise) absolutně černého tělesa je dáno tzv. Stefan - Boltzmannovým zákonem.

$$\dot{e}_b = \sigma \cdot T^4, \quad [17.2.5]$$

kde \dot{e}_b je energie vyzařovaná přes jednotku plocha absolutně černého tělesa. Někdy se nazývá též emise tepla.

σ je radiační koeficient známý jako Stefan-Boltzmannova konstanta:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}, \quad [17.2.6]$$

Emise \dot{e}_b je vlastně energetický tok. S tím související tepelný tok vyzařovaný absolutně černým tělesem je dán vztahem:

$$\dot{q}_b = \dot{e}_b = \frac{d\dot{Q}_b}{dS}, \quad [17.2.7]$$

kde S je plocha zářiče.

Sálání vyzařované reálným povrchem je nižší než sálání absolutně černého tělesa. Z tohoto důvodu se zavádí bezrozměrná veličina charakterizující emisivitu povrchu, ε . Výsledná rovnice pro teplo předávané sáláním má pro technické využití tvar:

$$Q = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad [17.2.8]$$

kde S je povrch tělesa a

T je termodynamická teplota

Konvekce - Proudění

Proudění je přenos tepla makroskopicky proudící tekutinou. Přestože přenos tepla prouděním je možný pouze u kapalin a plynů, je-li pevné těleso obtékáno kapalinou či plynem, dochází v povrchové vrstvě k intenzivnímu přestupu tepla mezi nimi. Dále se budu popisovat pouze tento stav, protože je blízký studované technické aplikaci. Jde o superpozici přenosu tepla vedením v povrchové vrstvě, kvůli makroskopickému pohybu kapaliny. Proto konvekční tepelný tok nezávisí pouze na vlastnostech materiálu, ale také na rychlosti proudění okolního média.

V blízkosti povrchu tělesa má proudění laminární charakter, se narůstající vzdáleností se mění na turbulentní. Charakter proudění je dán Reynoldsovým číslem. V laminární vrstvě směrem kolmo od povrchu teplého tělesa se děje přenos tepla vedením. Makroskopický pohyb pak v turbulentním okolí způsobuje rychlý rozptyl částic s vyšší kinetickou energií, která jim byla předána vedením v povrchové vrstvě.

Tepelný tok závisí na rozdílu teplot mezi tělesem a okolím a na rychlostním profilu proudění v povrchové vrstvě. Rychlostní profil může být i nestacionární a velmi složitý, přesto lze tepelný tok charakterizovat jednoduchou rovnicí.

$$\dot{q} = \alpha_k (T_1 - T_2), \quad [17.2.9]$$

kde α_k je koeficient přenosu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

T_1 - termodynamická teplota tělesa

T_2 - termodynamická teplota proudícího okolí

Koeficient α_k závisí jak na procesních vlastnostech (rychlost proudění a úhel dopadu), tak na drsnosti povrchu a tenkých povrchových vrstvách např. nátěrech. Hodnoty koeficientu bývají stanovovány s využitím empirických vztahů viz. [17]. Pro

výpočty realizované v této práci byly použity tabelární hodnoty z literatury a z výzkumných prací ZČU FEL na téma ampacita el. vedení a byly ověřeny výpočtem.

Výslednou rovnicí pro teplo odvedené prouděním lze napsat ve tvaru:

$$Q = S \cdot \alpha_k \cdot \Delta T, \quad [17.2.10]$$

kde S je ochlazovací plocha

ΔT je rozdíl teploty tělesa a jeho okolí

Koeficient přenosu tepla lze stanovit výpočtem na základě následujících vztahů:

$$\alpha_k = \sqrt[3]{(Nu_{nat}^3 + Nu_{nuc}^3)} \cdot \frac{\lambda}{L}, \quad [17.2.11]$$

kde Nu_{nat} je Nusseltovo číslo pro přirozené proudění

Nu_{nuc} je Nusseltovo číslo pro nucené, umělé proudění

λ - tepelná vodivost povrchové vrstvy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

L - specifická délka

Nusseltovo číslo pro vlastní proudění lze stanovit z následujících vztahů:

$$Nu_{nat} = \left\langle 0,6 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f(Pr)]^{\frac{1}{6}} \right\rangle^2, \quad [17.2.12]$$

$$f(Pr) = \left\langle 1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right\rangle^{\frac{16}{9}}, \quad [17.2.13]$$

$$Ra = \frac{g \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho \cdot c}{T_m \cdot \lambda}, \quad [17.2.14]$$

$$T_m = \frac{T + T_{okoli}}{2}, \quad [17.2.15]$$

kde Ra je Rayleighovo číslo [-]

Pr - Prandtlovo číslo [-]

g - gravitační zrychlení [m/s^2]

ΔT - teplotní rozdíl mezi tělesem a okolím [K]

L - charakteristický rozměr obtékaného tělesa [m]

ρ - hustota mezní vrstvy [kg/m^3]

c - specifická tepelná kapacita povrchové vrstvy [$J/(kg \cdot K)$]

T_m - průměrná teplota povrchové vrstvy [K]

λ - měrná tepelná vodivost [$W/(m \cdot K)$]

Nusseltovo číslo pro nucené proudění lze stanovit z následujících vztahů:

$$Nu_{nuc} = \left(0,3 + \sqrt[3]{(Nu_{lam}^2 + Nu_{tur}^2)} \right) \cdot \left(\frac{T_m}{T} \right)^{0,12}, \quad [17.2.16]$$

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt[3]{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}, \quad [17.2.17]$$

$$Nu_{tur} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}, \quad [17.2.18]$$

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu}, \quad [17.2.19]$$

kde Nu_{lam} - Nusseltovo číslo pro laminární proudění [-]

Nu_{tur} - Nusseltovo číslo pro turbulentní proudění [-]

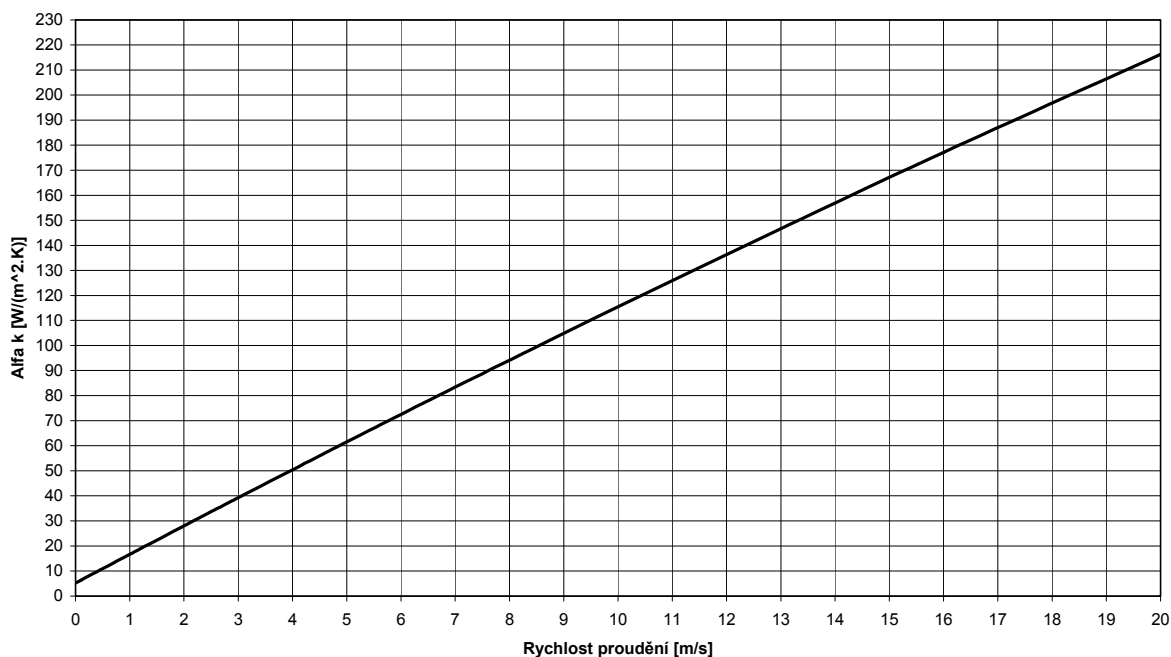
Re - Reynoldsovo číslo [-]

w - kolmá složka rychlosti proudění k povrchu tělesa [m/s]

ν - kinematická viskozita [m²/s]

S pomocí výše uvedených vztahů byl proveden výpočet závislosti koeficientu α_k na rychlosti proudění vzduchu. Pro výpočet je uvažováno proudění vzduchu pod úhlem 30°. Výpočet byl proveden v programu Excel a výsledek je znázorněn na následujícím obrázku.

Závislost ALFA k na rychlosti proudění



Obr. 43. Závislost koeficientu přestupu tepla na rychlosti proudění

Závislost koeficientu α_k není zcela lineární a lze ji vyjádřit následující rovnicí:

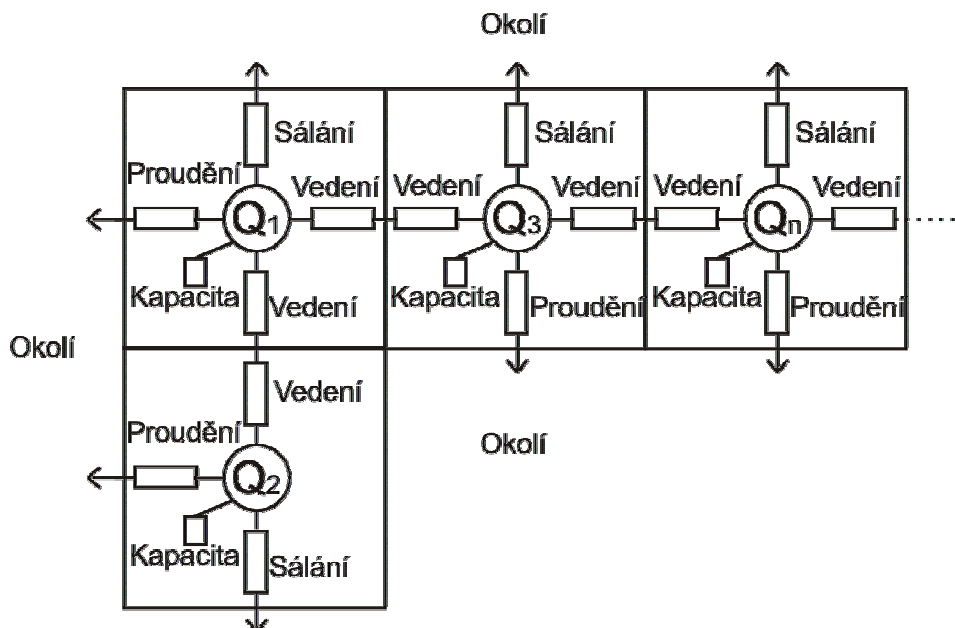
$$\alpha_k = -0,0474v^2 + 3,4641v + 5,2057 \quad [17.2.20]$$

Během experimentů a ladění modelu v Matlab Simulink vyplynulo, že s rostoucí teplotou se významně mění Nusseltovo číslo pro vlastní proudění a ovlivňuje průběh α_k v závislosti na rychlosti proudění. Tyto křivky jsou popsány v kapitole Verifikace modelu měření.

17.3 Teorie tepelné sítě

Tepelná síť je nástrojem k vyšetřování oteplení složitých elektrických přístrojů, kde je proudová dráha tvořena mnoha rozdílnými vodiči. Takovýto složitý přístroj nelze přesně popsat jednoduchými rovnicemi uvedenými v předchozí kapitole o principech přenosu tepla, ale lze jeho proudovou dráhu rozčlenit na elementární vodiče, které již je možné snadno charakterizovat matematicky. Pouhá separace jednotlivých vodičů však nepostačuje k dosažení přesnějších výsledků, je nutno počítat i se vzájemným předáváním tepla mezi elementárními vodiči především vedením tepla. Výše uvedené požadavky se snaží naplnit metoda tepelné sítě, kde element sítě je tvořen právě elementárním vodičem stejného průřezu, elektrických a tepelných vlastností a předává teplo, které v něm vzniká jak do okolního prostředí, tak do sousedních elementů.

Každý element tepelné sítě musí obsahovat zdroj tepla, tepelnou kapacitu elementu, přestup tepla prouděním, vedením a sáláním. Elementy jsou pak vzájemně propojeny prostřednictvím vedení tepla. Uspořádání sítě lze schématicky znázornit následujícím způsobem:



Obr. 44. Tepelná síť

Zdroj tepla

Zdrojem tepla v elementu jsou Jouleovi ztráty dané elektrickým odporem a kvadrátem proudu. Lze je charakterizovat rovnicí:

$$dQ = R \cdot I^2 dt \quad [17.3.1]$$

Tepelná kapacita

Jde o teplo potřebné k ohřátí tělesa o jeden stupeň teplotní škály. Měrná tepelná kapacita c , specifikuje teplo potřebné k ohřátí 1kg látky o jeden stupeň.

Rovnicí lze tepelnou kapacitu charakterizovat takto:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad [17.3.2]$$

kde m je hmotnost tělesa

c měrná tepelná kapacita

ΔT rozdíl počáteční a konečné teploty tělesa.

17.4 Rovnice tepelné bilance

Element tepelné sítě lze vyjádřit rovnicí, která postihuje vznikající teplo uvnitř elementu a jeho schopnost teplo absorbovat a odvádět do okolí, proto na levé straně rovnice stojí zdroj a na pravé straně tepelné úbytky. Rovnice je sestavena z elementárních rovnic vedení tepla z kapitoly 17.2 a 17.3 v diferenciálních tvarech vyjadřujících teplo Q .

$$R \cdot I^2 dt = c \cdot V \cdot d\Delta T + \alpha_k \cdot S \cdot \Delta T dt + S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 dt + \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{l} dt \quad [17.4.1]$$

Soustava diferenciálních rovnic vzniklá vyjádřením výše uvedené rovnice pro jednotlivé elementy tepelné sítě je řešena numericky v Matlab Simulink v dalších kapitolách. Vazbou pro předávání tepla mezi jednotlivými elementy sítě je vedení tepla na samém konci pravé strany diferenciální rovnice. Zde je ΔT rozdíl teplot mezi elementy a určuje vzájemnou tepelnou bilanci mezi sousedními elementy.

Při bližší analýze sestavené diferenciální rovnice je zřejmé, že ji lze řešit analyticky metodou separace proměnných. Pro zpřehlednění analytického řešení rovnici zjednoduším na dvě nejvýznamnější složky, kterými je odvod tepla prouděním a vlastní tepelná kapacita. Zjednodušená rovnice má tvar:

$$R \cdot I^2 dt = c \cdot V \cdot d\Delta T + \alpha_k \cdot S \cdot \Delta T \cdot dt \quad [17.4.2]$$

Řešení separací proměnných:

$$dt = \frac{c \cdot V}{R \cdot I^2 - \alpha_k \cdot S \cdot \Delta T} d\Delta T$$

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_k \cdot S} \cdot \ln \left(\frac{R \cdot I^2}{c \cdot V} - \frac{\alpha_k \cdot S \cdot \Delta T}{c \cdot V} \right) + K$$

Pro počáteční podmínku v čase $t = 0$ je oteplení $\Delta T = 0$, pak integrační konstanta K :

$$K = \frac{c \cdot V}{\alpha_k \cdot S} \cdot \ln \frac{R \cdot I^2}{c \cdot V}$$

Výsledné řešení je po úpravě:

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_k \cdot S} \cdot \ln \left(1 - \frac{\alpha_k \cdot S}{R \cdot I^2} \cdot \Delta T \right)$$

Pro oteplení ΔT pak lze napsat:

$$\Delta T = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_k \cdot S} \left(1 - e^{\left[\frac{-\alpha_k \cdot S \cdot t}{c \cdot V} \right]} \right)$$

Pro oteplení do ustáleného stavu lze napsat:

$$\Delta T = \Delta T_{\infty} \left(1 - e^{\left[\frac{-t}{\tau} \right]} \right),$$

kde oteplení v nekonečně dlouhém čase odpovídá:

$$\Delta T_{\infty} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_k \cdot S} \text{ a časová konstanta } \tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_k \cdot S}$$

Z uvedeného řešení je zřejmé, že proces oteplování bude mít exponenciální charakter. Stejně je tomu tak i pro ochlazování.

17.5 Tepelná síť v Matlab Simulink s využitím knihovny Simscape

Tepelná síť provedená v programu Matlab Simulink odpovídá svým principem dříve popsané tepelné síti užívané k výpočtům oteplení elektrických přístrojů, viz.: [17], [18]. Schéma vytvořené s pomocí knihovny Simscape je nadstavbovým prostředím, kde je jedinou předávanou veličinou mezi bloky knihovny teplo Q . Pro import a export hodnot do standardního prostředí Simulinku je nutno používat speciální převodní bloky - Signal converters.

Nyní budou popsány jednotlivé prvky použité k vytvoření jednoho funkčního elementu tepelné sítě pro Simulink a hlavní tepelné rovnice jednotlivých bloků.

Zdroj tepla

Jako zdroj tepla v elementu slouží Jouleovi ztráty. V případě, který zkoumá tato práce, tedy průběh oteplení pantografového sběrače proudu, ale i v mnoha dalších aplikacích na elektrické přístroje a vedení, budou zdroj tepla tvořit ztráty na konstrukčních částech proudové dráhy, tedy na ocelových trubkách, měděných pasech či měděných flexibilních spojkách, tzv. dracounech. Takovéto součásti však nelze považovat za konstantní, ideální zdroje tepla, jelikož se zvyšující se teplotou zvyšují i svůj elektrický odpor a tím i ztráty.

Jelikož knihovna Simscape obsahuje pouze ideální zdroj tepla a ideální zdroj teploty je nutno vytvořit vlastní blok, který bude odpovídat fyzikální realitě. Tedy zdroj tepla, který bude zahrnovat rostoucí elektrický odpor se zvyšující se teplotou. Pro simulaci postačuje využít vztahu:

$$R = R_0(1 + \alpha_R \cdot \Delta T), \quad [17.5.1]$$

kde

R_0 - počáteční elektrický odpor

α_R - teplotní součinitel odporu, typická konstanta pro různé kovové materiály

ΔT - rozdíl teploty.

Programový kód pro výše popsaný nelineární zdroj tepla je uveden v Příloze 6. Vstupem tohoto bloku je efektivní hodnota elektrického proudu a teplota okolí. Výstupem pak hodnota tepla Q .

Důležité parametry toho bloku jsou:

cross - Průřez tělesa (elementu sítě) [m²]

$length$ - Délka tělesa [m]

ρ_{el} - Měrný odpor při 20°C [Ωm]

b - Teplotní součinitel el. odporu [K^{-1}]

Vlastní rovnice tepla je vyjádřena následujícími vztahy:

$$R_{mat} = length \cdot \rho_{el} / cross \cdot (1 + b \cdot (B \cdot T - \{293.15, 'K'\})) \quad [17.5.2]$$

$$Q == R_{mat} \cdot I^2,$$

kde B je výstupní teplo

T - globální proměnná teplotního rozdíl ΔT

Ve schématech je pro tento blok užíván symbol viz. následující obrázek.



Obr. 45. Symbol nelineárního zdroje tepla užívaný ve schématu

Vedení tepla

Tento blok představuje přenos tepla vedením přes vrstvu materiálu. Přenos se řídí Fourierovým zákonem, popsáným v předešlých kapitolách. Blok je obsažen v knihovně Simscape - Thermal - Thermal elements pod názvem Conductive Heat Transfer.

Důležité parametry bloku jsou:

$area$ - Průřez tělesa [m^2]

$thickness$ - Délka vedení tepla [m]

th_{cond} - Tepelná vodivost [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]

Hodnota vedeného tepla je v bloku řešena následující rovnicí korespondující s Fourierovým zákonem.

$$Q == area \cdot th_{cond} \cdot T / thickness, \quad [17.5.3]$$

kde T je globální proměnná teplotního rozdílu ΔT

Sálání tepla

Tento blok představuje přenos energie zářením mezi dvěma povrchy tak, že je energie vyzařujícího tělesa zcela absorbována přijímajícím tělesem. Blok plně interpretuje Stefan-Boltzmannův zákon.

Blok je obsažen v knihovně Simscape - Thermal - Thermal elements pod názvem Radiative Heat Transfer.

Důležité parametry bloku jsou:

area - Průřez tělesa [m²]

rad_tr_coeff - Stefan-Bolzmannova konstanta [W.m⁻².K⁻⁴]

Hodnota tepla odvedeného sáláním je v bloku řešena rovnicí:

$$Q == \text{area} * \text{rad_tr_coeff} * (A.T^4 - B.T^4) \quad [17.5.4]$$

kde T je globální proměnná teplotního rozdílu ΔT ,

A a B jsou vstupní a výstupní uzel.

Tepelná kapacita

Blok představuje množství tepla, které je schopen element sítě pojmout ve formě vnitřní energie. Blok je obsažen v knihovně Simscape - Thermal - Thermal elements pod názvem Thermal Mass.

Důležité parametry bloku jsou:

mass - Hmotnost [kg]

sp_heat - Specifické teplo [J/(kg.K)]

init_temp - Počáteční teplota [K]

Množství tepla, které blok absorbuje je v bloku vyjádřeno rovnicí:

$$Q == \text{mass} * \text{sp_heat} * M.T.\text{der}, \quad [17.5.5]$$

kde M.T.der odpovídá derivaci teploty.

Proudění vzduchu

Tento blok reprezentuje zvýšený odvod sálavého tepla ofukováním povrchu elementu sítě. Blok není součástí knihovny Simscape, proto byl dodefinován. Blok vypočítává hodnotu tepla, která je navíc odváděna z povrchu elementu na základě rychlosti proudění a teploty vůči okolí. Blok vybírá vhodné koeficienty α_k vypočtené předem a ověřené empiricky, které jsou v bloku uloženy v tabulce.

Programový kód je uveden v Příloze 7.

Základní rovnice pro odvedené teplo je dána vztahem:

$$Q == \text{surfaře} * T * \text{tablelookup}(x, \text{alfa65}, \text{wind}), \quad [17.5.6]$$

Pro tento blok se užívá symbol z následujícího obrázku.



Obr. 46. Symbol pro odvod tepla proudícím vzduchem užívaný ve schématu

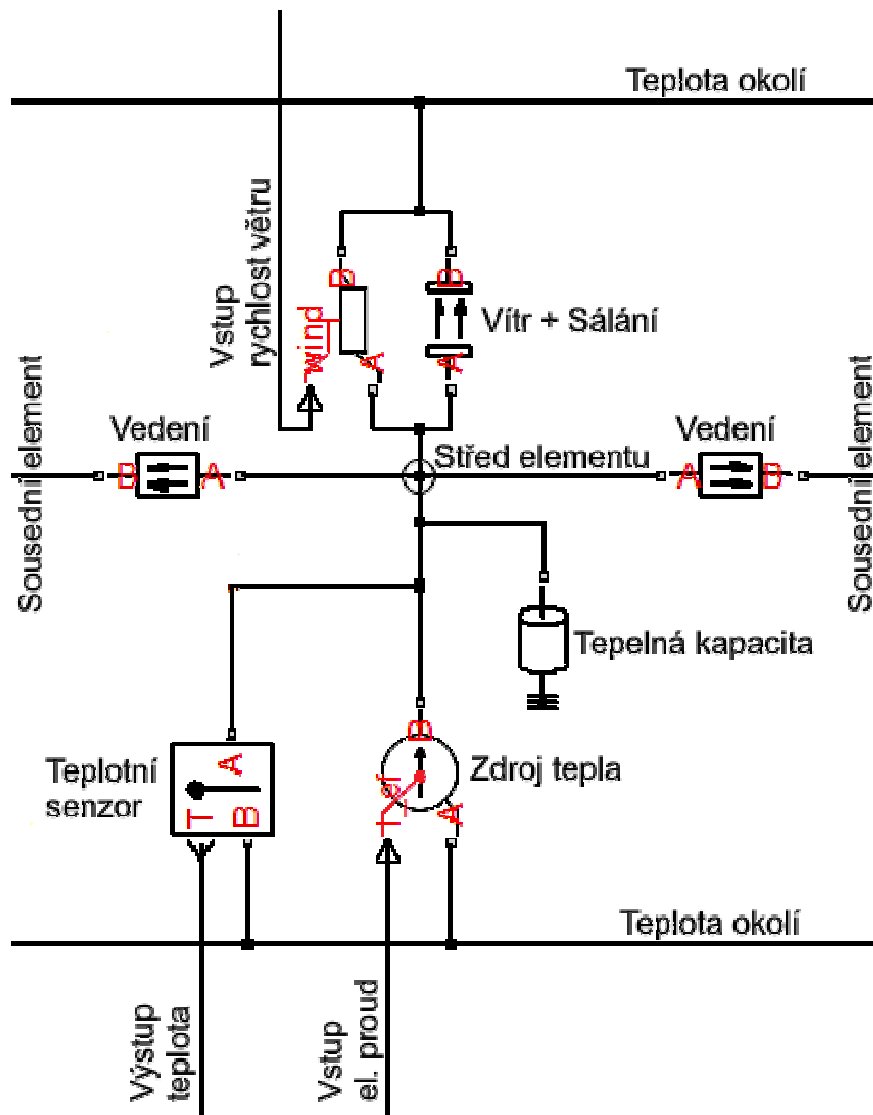
Teplotní senzor

Blok představuje ideální teplotní čidlo, tedy zařízení, které určuje teplotní rozdíl měřený mezi dvěma body bez ovlivnění okolních bloků. Teplotní rozdíl T je vrácen na svorce T .

Blok je součástí knihovny Simscape - Thermal - Thermal sensors pod názvem Ideal Temperature Sensor.

Kompletní element tepelné sítě v Simulink

Element tepelné sítě a jeho rozhraní jsou detailně popsány v Obr. 47. Střed elementu je nejen místem vzniku tepla, ale i pomyslným geometrickým středem elementu, protože oba bloky vedení tepla do sousedních elementů sítě počítají přesně s polovinou geometrické délky proudové dráhy.



Obr. 47. Element tepelné sítě v prostředí Matlab Simulink

17.6 Výhody řešení tepelné sítě v Matlab Simulink

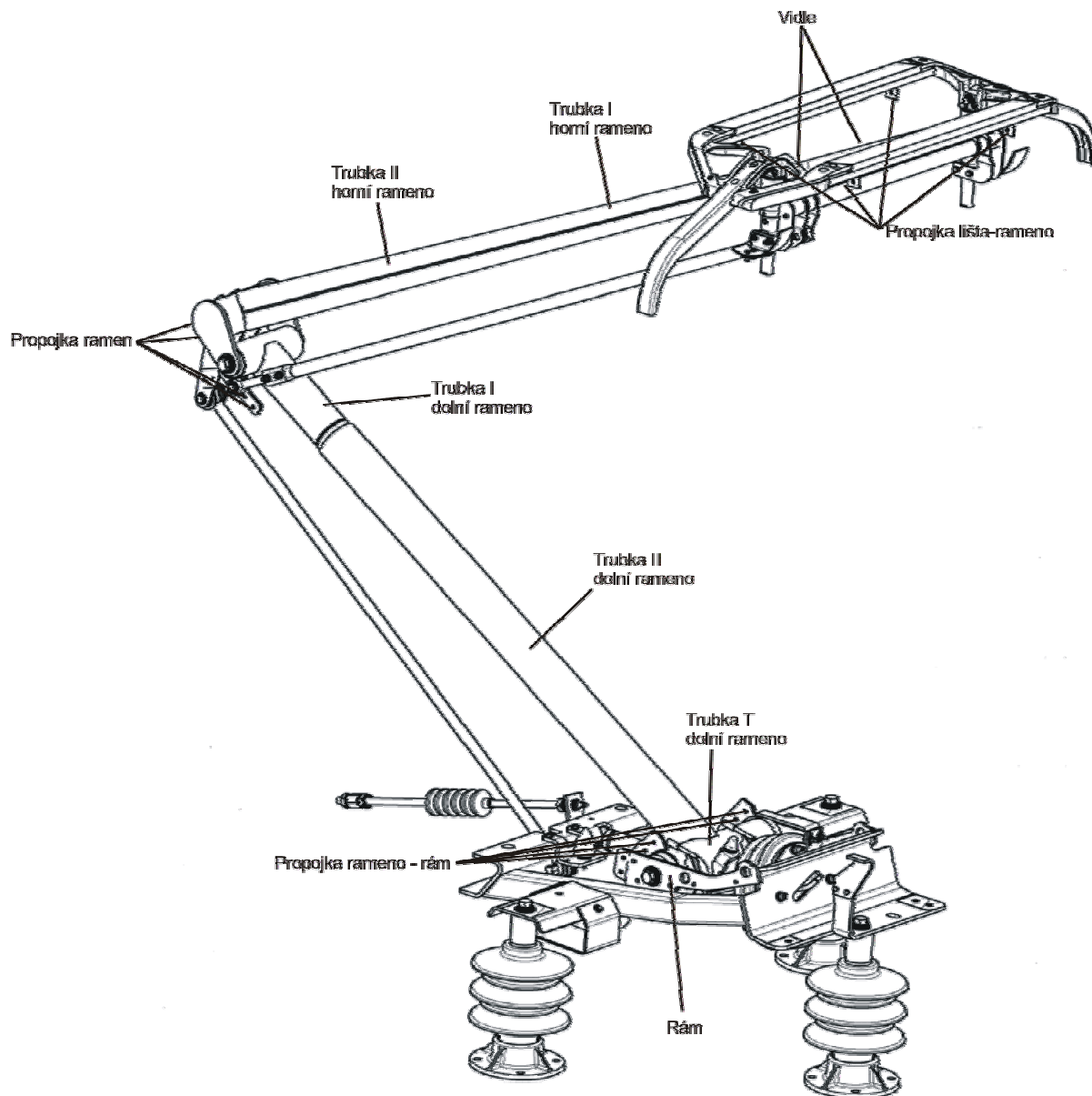
Za hlavní výhody lze považovat:

- uživatelsky nenáročné numerické řešení soustavy diferenciálních rovnic
- možnost simulace proměnného zatížení proudové dráhy (oteplování a ochlazování)
- možnost simulace změn rychlosti proudění vzduchu
- snadná příprava sítě z unifikovaných bloků

17.7 Proudová dráha sběrače typu AX

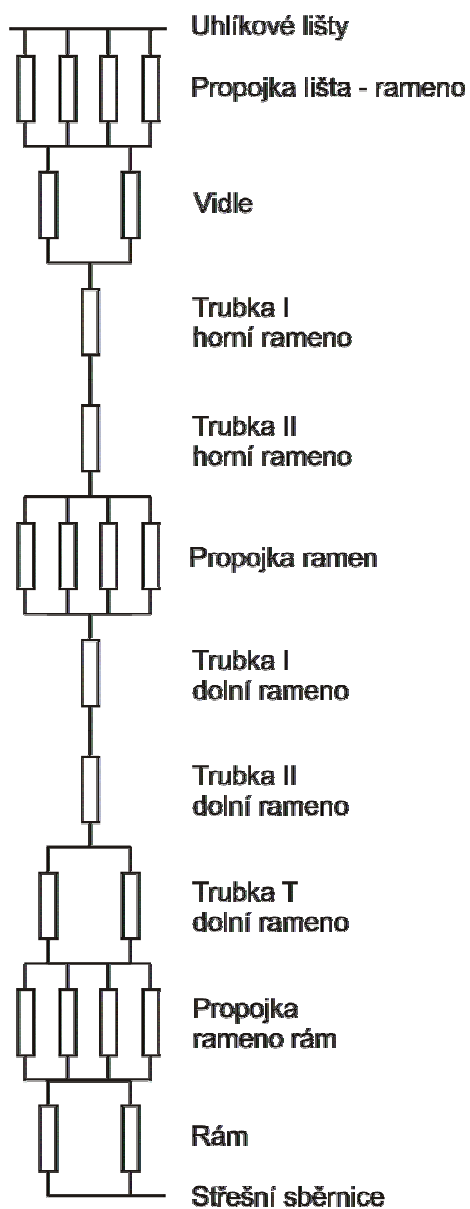
Železniční sběrač proudu typu AX-NG, je moderní polopantografový sběrač proudu pro univerzální využití na všech napájecích trakčních soustavách. Pantograf je tvořen hlavním rámem, dolním a horním jednoduchým ramenem tvořeným ocelovou trubkou. Výkres sestavy zkoumaného sběrače je v Příloze 8.

Rozčlenění sběrače na výpočetní elementy je znázorněno na *Obr. 48*.



Obr. 48. Rozčlenění sběrače na výpočetní elementy

Proudová dráha sběrače se skládá z následujícího řazení elementů (zdrojů tepla).



Obr. 49. Řazení elementů tepelné sítě proudové dráhy sběrače AX

Rozměry a materiály jednotlivých elementů sběrače AX jsou uvedeny v následující tabulce.

Název elementu	Proud [A]	Vnější průměr [mm]	Délka [mm]	Tloušťka stěny [mm]	Materiál	Rezistivita [Ω/m]
Propojka lišta-rameno	225	11	400	5,5	Cu	$1,724 \cdot 10^{-8}$
Vidle	450	34	450	2	S235	$9,71 \cdot 10^{-8}$
Trubka I horní rameno	900	60	950	2	S235	$9,71 \cdot 10^{-8}$
Trubka II horní rameno	900	75	950	2	S235	$9,71 \cdot 10^{-8}$
Propojka ramen	225	11	310	5,5	Cu	$1,724 \cdot 10^{-8}$
Trubka I dolní rameno	900	102	235	3	S235	$9,71 \cdot 10^{-8}$
Trubka II dolní rameno	900	120	1405	5	S235	$9,71 \cdot 10^{-8}$
Trubka T dolní rameno	450	120	200	5	S235	$9,71 \cdot 10^{-8}$
Propojka rameno-rám	225	11	310	5,5	CU	$1,724 \cdot 10^{-8}$
Rám	450	-	40x35	8	S235	$9,71 \cdot 10^{-8}$

Tabulka 17. Rozměry elementů proudové dráhy

17.8 Model pantografu AX v Matlab Simulink

Úplné schéma v programu Matlab Simulink naleznete v Příloze 9. Schéma je tvořeno odpovídajícím řazením elementů sítě z Obr. 49. do sítě odpovídající Obr. 51.

Za zmínku stojí bloky *rychlost vetru* a *proud*, které do modelu vnášejí odpovídající veličiny. Tyto bloky jsou znázorněny jako konstanty, ale pro dynamické simulace jsou nahrazeny bloky *From Workspace* ze základní knihovny Simulink - Sources, které načítají do modelu hodnoty z příslušných proměnných z Workspace Matlabu. Tyto proměnné jsou tvořeny tabulkami s charakteristikami rychlosti větru a velikosti trakčního proudu ze simulačních dat SŽDC.

Z důvodu značného množství bloků, kterými je tvořen simulační model, využívá se pro nastavení jednotlivých parametrů bloků inicializační skript ve formě souboru TN_pantograf_script.m, kde jsou veškeré hodnoty koeficientů definovány. Tento skript je nutno před spuštěním simulace spustit a zavést tak proměnné do Workspace.

17.9 Verifikace modelu měřením

Verifikace modelu sběrače AX je provedena porovnáním s výsledky měření na reálném výrobku. Měření proběhlo v akreditované elektrotechnické zkušební společnosti ETD Transformátory a. s. v roce 2010.

Měření bylo provedeno dle normy ČSN EN 50 206-1 odstavec 6.13.2. [19] Účelem je stanovit, zda sběrač je schopen převádět jmenovitý proud jedoucího vozidla bez poškození. Sběrač bez smykadla se zapojí do obvodu a podrobí se oteplovací zkoušce po dobu 1 hodiny průchodem 50% jmenovitým proudem, který je odebírán jedoucím vozidlem a bezprostředně následné zkoušce po dobu 5 minut průchodem jmenovitého proudu jedoucího vozidla.

Při této zkoušce musí být sběrač vystrojen všemi ohebnými spojkami smykadla, hlavy sběrače, ramen, jako v reálné situaci na vozidle. Během této zkoušky musí být prováděn časový záznam průběhu teploty a proudu v kritických průřezech.

Základní parametry uskutečněné zkoušky:

Počáteční teplota: 25°C

Proud 50% jmenovitého zkušebního proudu $I_{60\min} = 900\text{A}$

Jmenovitý proud vozidla $I_{5\min} = 1800\text{A}$

Rychlostní profil proudění: viz. *Obr. 50*.

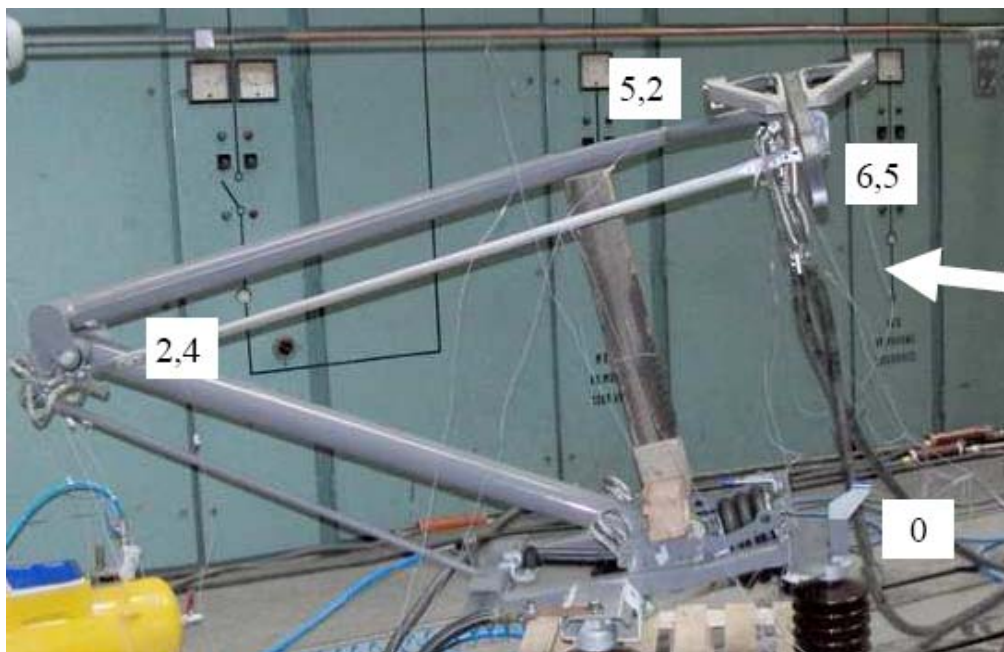
Základní parametry simulačního modelu:

Úhel proudícího vzduchu: 30°

(pro flexibilní spojky nelze vyjádřit přesnou hodnotu, pro ramena pantografu odpovídá úhel střednímu pracovnímu zdvihu)

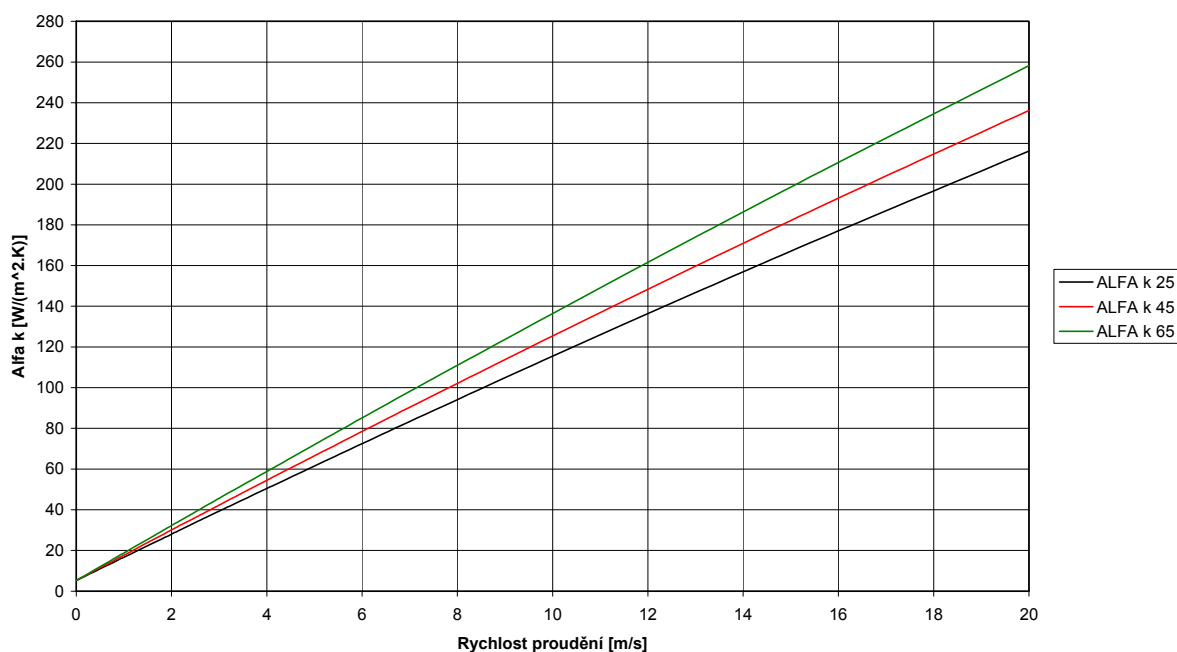
Elektrické parametry a rozměry elementů viz.: *Tabulka 17*.

Koeficienty přestupu tepla prouděním α_k použité pro validaci jsou znázorněny na *Obr. 51*. Průběh ALFA k 25 je použit pro teplotní rozdíl mezi zkoumaným tělesem a okolím do 25°C. Průběh ALFA k 45 je použit pro rozdíl od 25°C do 45°C. Průběh ALFA k 65 pro teploty vyšší než 60°C.



Obr. 50. Rychlostní profil proudění během oteplovací zkoušky

Koeficient ALFA k



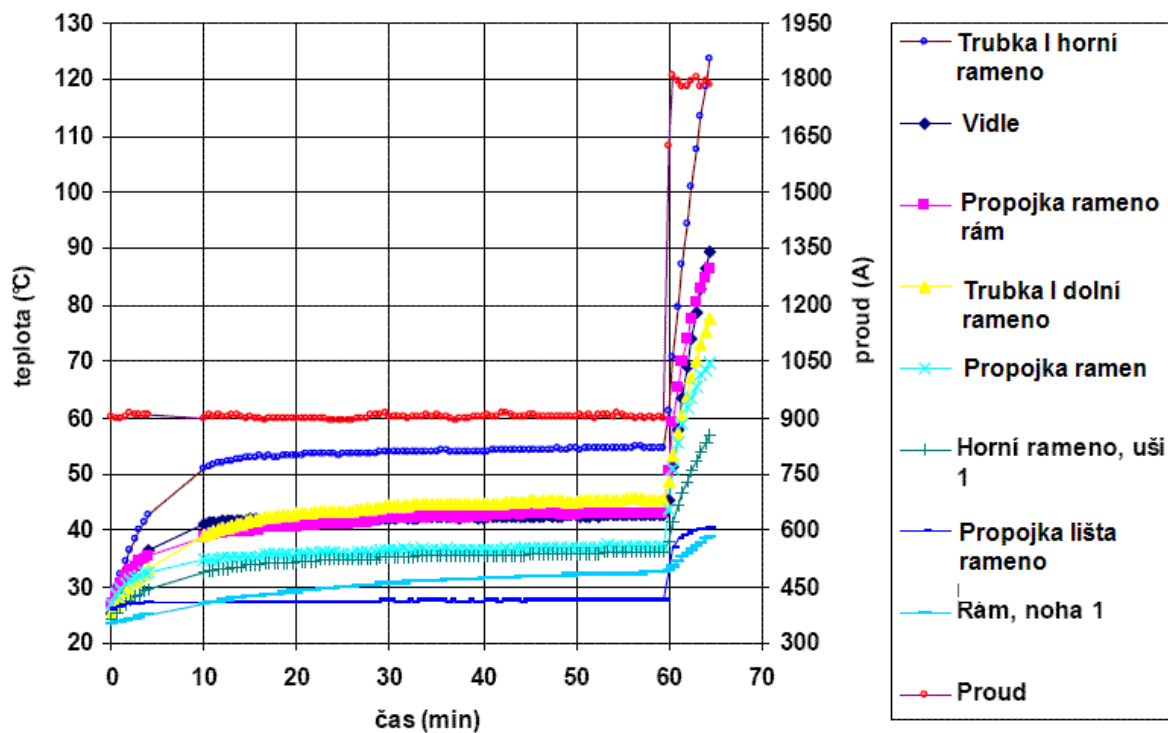
Obr. 51. Koeficienty přestupu tepla α_k použité při validaci

Pro verifikaci modelu jsou pro jednotlivé elementy tepelné sítě proudové dráhy nastaveny parametry shodné s oteplovací zkouškou. Srovnání výsledků pro stav na konci zkoušky je v následující tabulce. Výsledné teploty získané simulací jsou zaokrouhleny na celé stupně.

Měřicí místo Element sítě	Rychlost proudění [m/s]	Teplota při zkoušce po 60min/65min [°c]	Teplota při simulaci po 60min/65min [°c]	Δ = měření - simulace 60min/65min [°c]
Propojka lišta - rameno	6,5	28/41	28/38	0/3
Vidle	5,2	42/90	41/93	-1/3
Trubka I horní rameno	4,7	54/125	47/123	7/2
Trubka II horní rameno	2,4	-/-	49/112	-/-
Propojka ramen	1,8	38/68	38/60	0/8
Trubka I dolní rameno	2,4	44/78	44/69	0/9
Trubka II dolní rameno	0,1	-/-	39/46	-/-
Trubka T dolní rameno	0,1	-/-	31/34	-/-
Propojka rameno rám	0,1	43/87	43/79	0/8
Rám	0,1	-/41	29/40	-/1

Tabulka 18. Verifikační tabulka modelu sběrače

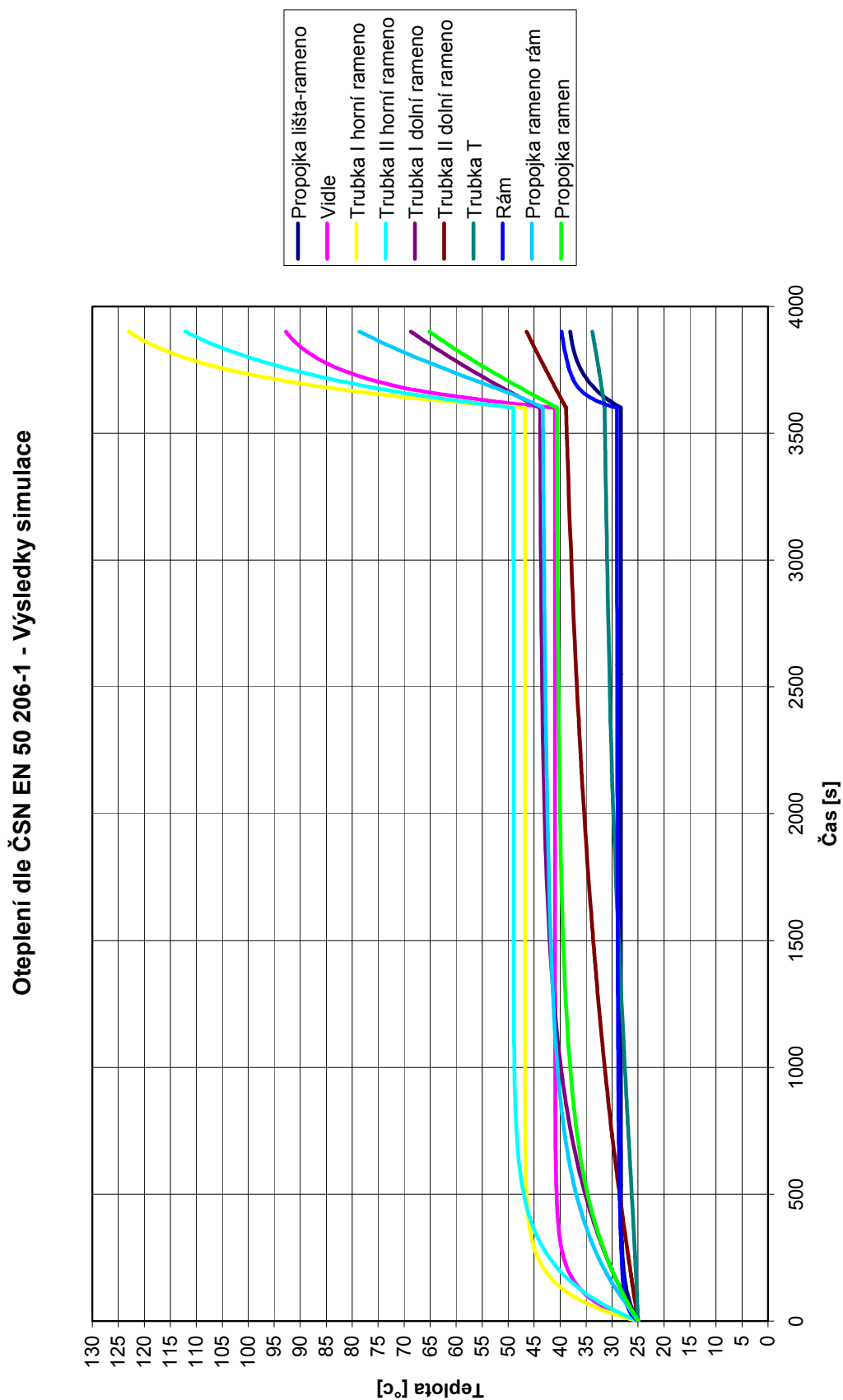
Naměřené průběhy oteplení vyňaté ze zkušebního protokolu jsou na následujícím obrázku.



Časový průběh teplot a proudu při zkoušce proudem jedoucího vozidla (900/1800 A).

Obr. 52. Průběh oteplení částí sběrače při oteplovací zkoušce

Průběhy oteplení jednotlivých částí sběrače zjištěné při verifikaci modelu simulací v Matlab Simulink jsou na následujícím obrázku.

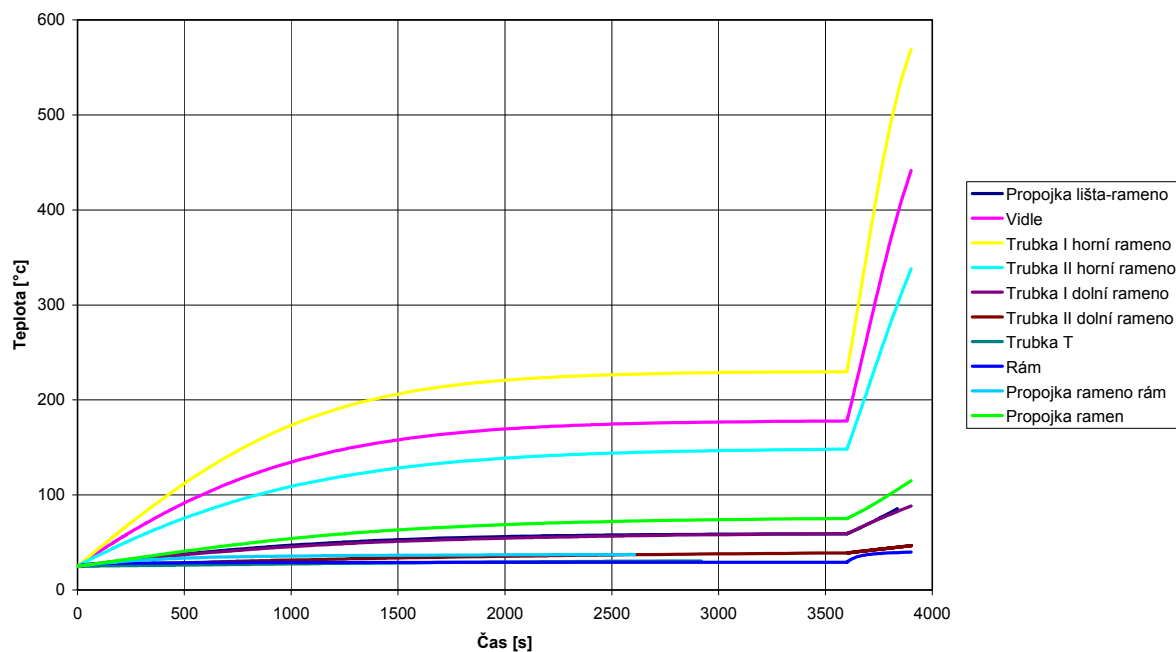


Obr. 53. Průběh oteplení částí sběrače při simulaci s proděním vzduchu

Z uvedených výsledků lze soudit, že model dosahuje dobré shody s reálným měřením jak v hodnotách teplot tak v charakteru oteplovacích křivek. Obecně lze říci, že model dosahuje přesnosti $\pm 10^\circ\text{C}$. Je však nutno zdůraznit, že oteplovací zkouška nebyla primárně prováděna za účelem verifikace modelu v Matlab Simulink, ale byla k němu pouze využita. Například měření rychlosti proudění by bylo vhodné provést detailněji a stejně tak záznam průběhů teploty by mohly být preciznější.

Pro opodstatnění důvodů zkoumání oteplení pantografového sběrače proudu zmíněných v kapitole Cíle a důvody zkoumání uvádím výsledek simulace oteplovací zkoušky bez umělého proudění vzduchu. Z výsledku je zřejmé, že v tomto případě by sběrač zkoušce nevyhověl, viz následující obrázek.

Oteplení dle ČSN EN 50 206-1 - Výsledky simulace bez proudění



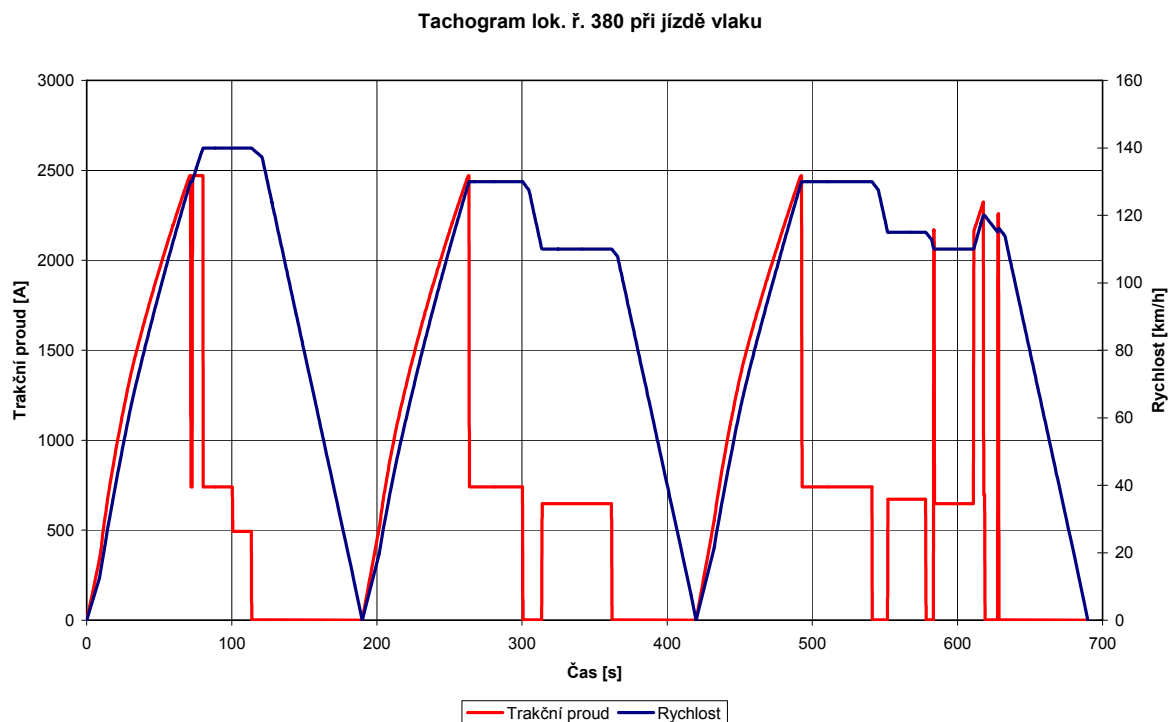
Obr. 54. Průběh oteplení částí sběrače při simulaci bez proudění vzduchu

Z výše uvedeného obrázku je dobře patrné přehřívání horního ramene sběrače, jehož hmotnost má zásadní vliv na dynamické vlastnosti sběrače proudu.

17.10 Aplikace modelu na reálné vozidlo

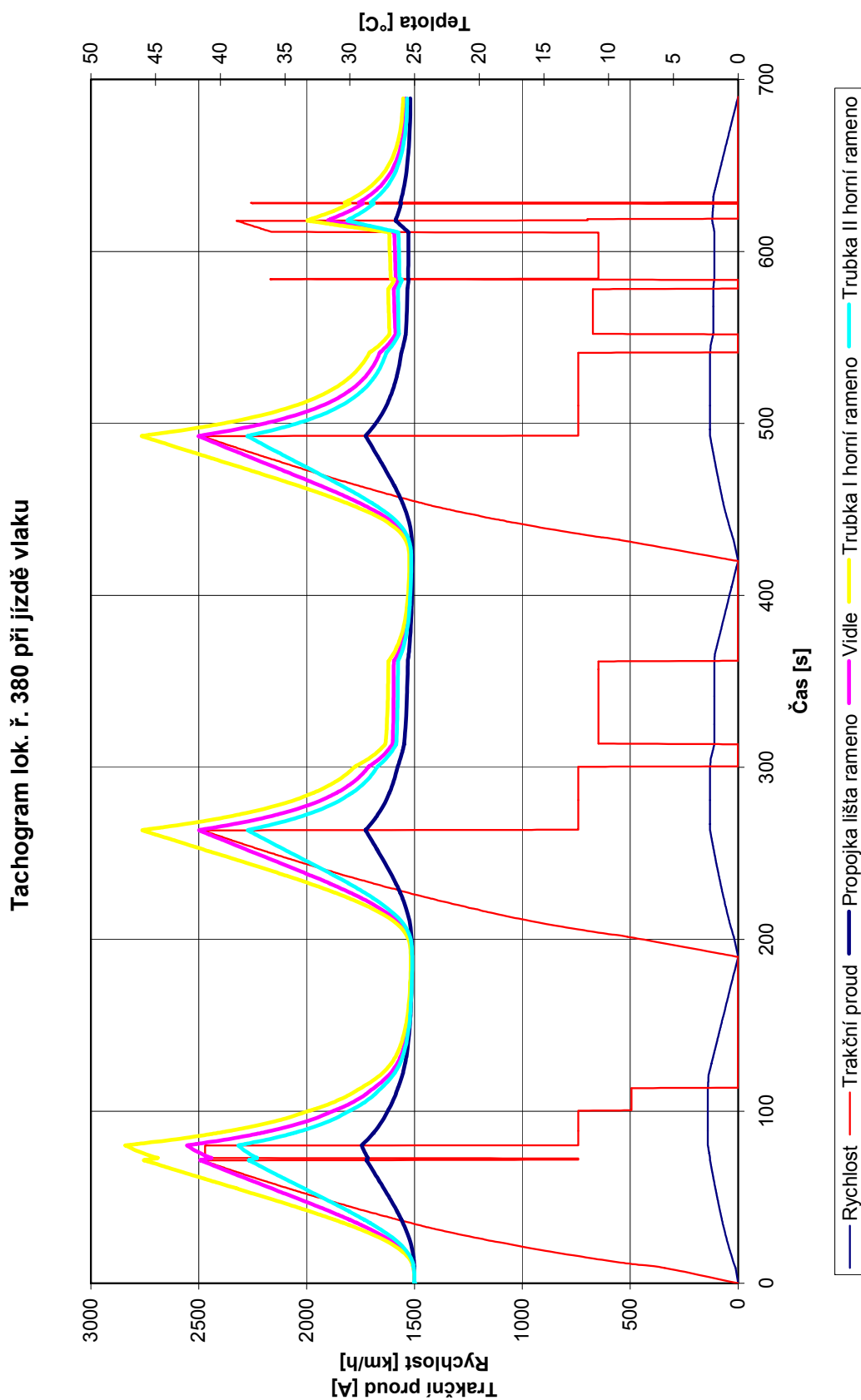
Verifikovaný model je použit pro simulaci na reálném vozidle a konkrétním traťovém úseku kopcovité trati v ČR. Sběrač jehož model byl verifikován, je použit i na lokomotivě ř. 380 ČD. Hodnoty trakčního proudu a rychlosti pro spěšný vlak o hmotnosti 500t tažený touto lokomotivní řadou je na následujícím grafu. Hodnoty jsou

vypočteny pomocí simulačního programu, který používá český správce železniční infrastruktury při tvorbě jízdních řádů pro kontrolu zatížení měřičů a napájecích stanic.



Obr. 55. Rychlost a proud lokomotivy ř. 380 v traťovém úseku

Hodnoty z výše uvedeného grafu jsou použity v simulačním modelu. Trakční proud vozidla je aplikován jako proud sběrače a rychlost vozidla jako rychlost proudění vzduchu. Výsledky oteplení jednotlivých elementů proudové dráhy jsou uloženy v souboru *Otepleni-Vlak.xls*, který je součástí elektronické verze této práce. Průběh oteplení elementů proudové dráhy, které mají nejvyšší oteplení je uveden na následujícím grafu.



Obr. 56. Oteplení proudové dráhy sběrače při jízdě vlaku

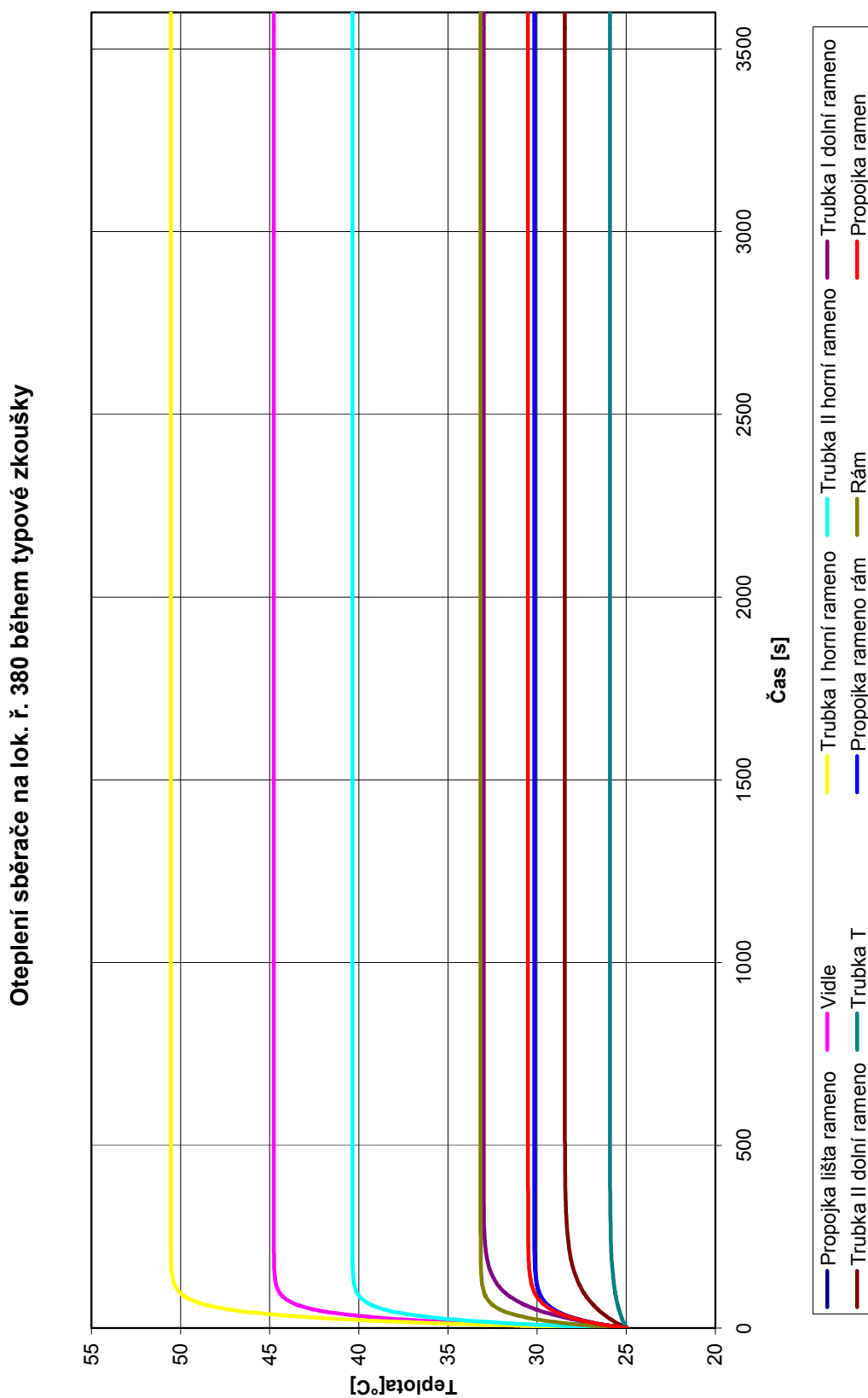
Z výsledků simulací je patrné, že žádná z částí sběrače se nebude přehřívat v provozu ani za vyšších okolních teplot. Přehříváním je myšleno, že nedosáhnou teploty vyšší než 120°C. Při překročení této teploty již dochází k poškozování nátěrových materiálů použitých k protikorozi ochraně.

Dalším důležitým předmětem simulace je oteplení sběrače na lokomotivě ř. 380 ČD během typové oteplovací zkoušky vozidla prováděné na Železničním zkušebním okruhu Výzkumného ústavu železničního v Cerhenicích. Během této zkoušky se pohybuje lokomotiva svým jmenovitým výkonem po okruhu po dobu 60 minut. Z dat výrobce lokomotivy (Škoda Transportation a.s.) má lokomotiva při následující parametry:

Trvalý výkon:	6400kW
Rychlost při trvalém výkonu:	102km/h
Proud při trvalém výkonu na systému 3kV DC:	2100A

Tuto zkoušku lze považovat za největší možnou proudovou zátěž sběrače při odpovídajícím chlazení proudícím vzduchem. K větší zátěži nedojde ani na kopcovité trati, kde při jízdě z kopce bude vozidlo rekuperovat energii zpět do trakční sítě plným výkonem. Uvedené technické parametry byli opět použity při simulaci. Vliv větru byl zanedbán pro jeho těžko popsateľný směr na železničním okruhu.

Výsledky simulace jsou na následujícím grafu z něž vyplývá, že sběrač se během zkoušky nepřehřeje nad mez 120°C a je tedy pro vozidlo použitelný.



Obr. 57. Oteplení sběrače lok. ř. 380 při typové zkoušce vozidla

17.11 Závěr a zhodnocení výsledků

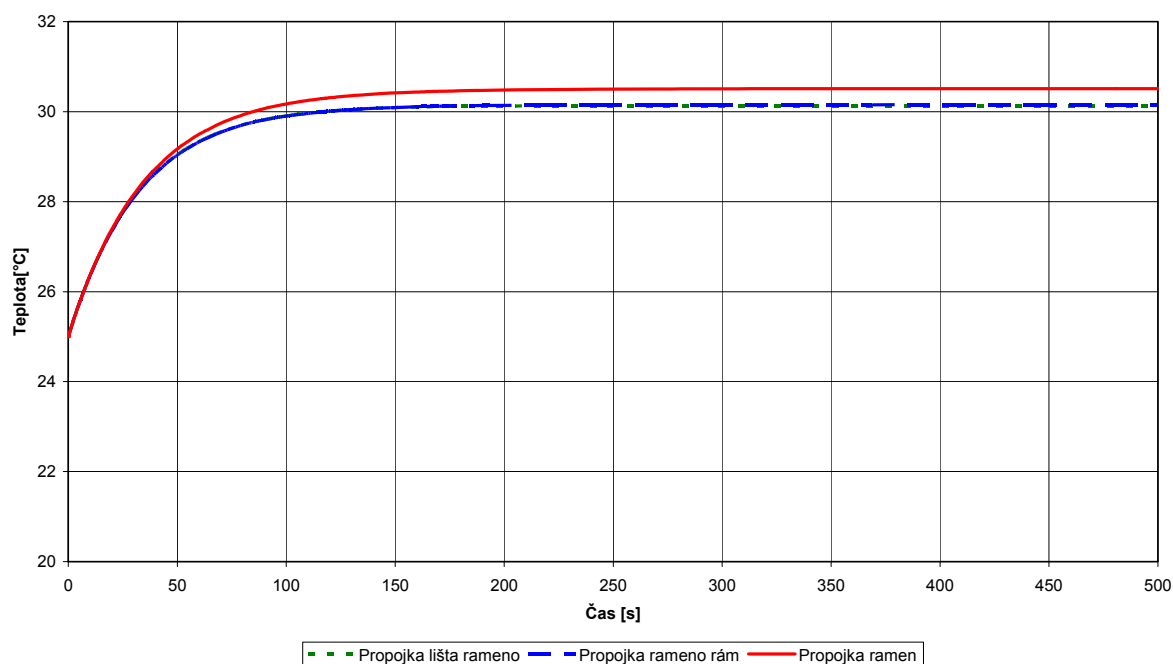
Model oteplení sběrače vytvořený pomocí tepelné sítě realizované v Matlab Simulink s využitím knihovny Simscape je verifikovatelný s dostačující přesností pro výrobce sběrače.

Ze simulací vyplynulo, že sběrač typu AX je kompromisním řešením mezi nízkou hmotností ramen a jejich oteplením trakčním proudem, viz. výsledky zkoušky oteplení dle ČSN EN 50 206-1 bez ofukování. Vytvořený model lze využít pro ověřování hodnot oteplení v souvislosti s konkrétními parametry nového vozidla.

Žádný z výsledků simulací zjevně nevykazuje rozpor s logickými fyzikálními předpoklady. Dále se potvrdilo, že výpočet koeficientu α_k je možný bez zavlečení výrazných chyb oproti realitě, ovšem pro velmi přesné simulace znamená nejslabší článek simulačního modelu vzhledem k výraznému vlivu na odvod tepla.

Na základě výsledků simulací, lze v budoucnu zanedbat vliv vedení tepla mezi flexibilními propojkami a konstrukcí sběrače. Toto tvrzení se opírá o předpoklad malé kontaktní plochy těchto propojek s masivními ocelovými díly a dále o výsledek simulace oteplení během typové zkoušky vozidla, kde jak je patrné z následujícího grafu dochází pouze k minimálním rozdílům oteplení pro jinak shodně zatížené a definované propojky.

Oteplení sběrače na lok. ř. 380 během typové zkoušky



Obr. 58. Detail oteplení propojek sběrače během typové zkoušky vozidla

18 Závěr

Práce se zabývala aktuální problematikou, která je trvale zkoumána a nově nabývá na důležitosti s ohledem na zvyšování cen elektrické energie, vyšší hustoty provozu i dostupnosti nových technologií, zejména polovodičů a superkondenzátorů. Práce navazuje na publikované teoretické poznatky prof. Františka Jansy a aplikuje je do reálných poměrů. V práci je analyzována dynamika jízdy vozidla a možnost rekuperace energie na reálné lince tramvajové dopravy. Jsou vyčísleny a graficky zpracovány energetické bilance bez rekuperace a s rekuperací pro jednotlivé úseky i celou tramvajovou linku. Jsou také posouzeny napájecí i zkratové poměry v souvislosti s rozbory nebezpečných stavů, které vznikají s příchodem vozidel s rekuperací a s instalací akumulátorů el. energie do stávajících napájecích úseků. Práce poskytuje simulační nástroje pro posouzení bezpečnosti trakční sítě při provozu rekuperujících vozidel nebo při využití akumulčních stanic. S využitím těchto nástrojů byla prokázána závažnost problematiky zkratových poměrů a nastavení ochran měníren při provozu moderních vozidel vysokých výkonů a možností rekuperačního brzdění. Pro tyto nebezpečné stavy byla navržena možná bezpečnostní opatření.

Práce dále reflektuje zvyšující se proudové zatížení pantografových sběračů proudu na moderních vozidlech a předkládá simulační model v Matlab Simulink pro výpočet oteplení sběrače proudu. Tento model je verifikován reálnou oteplovací zkouškou a jeho realizace je detailně popsána. Model je aplikován na několik klíčových situací, jako je jízda konkrétního vozidla na sklonově náročné trati a při typové oteplovací zkoušce konkrétního vozidla na železničním zkušebním okruhu.

18.1 Vlastní přínosy

Za vlastní přínos považuji shromáždění podkladů a přípravu metodiky pro srovnání energetické bilance provozu městské dráhy s vozidly bez rekuperace a s rekuperací a jejich praktickou aplikaci na konkrétní linku PmDP v Plzni. Z výsledků energetické bilance jsem navrhl vlastní opatření pro zlepšení výsledků provozu s rekuperujícími vozidly. Takto získané podklady byly využity i pro další část práce, vytvoření modelu zatížení dílu trakčního vozidla. Přínosem je navrhované řešení pro bezpečnost během zkratů v napájecím úseku a jejich správné detekce při vzdáleném zkratu.

Vlastním přínosem je vytvoření teoretického modelu proudové dráhy pantografového sběrače využitelného pro dva rozdílné režimy jízdy: dosavadního bez rekuperace a nového s rekuperací. Oba mají časově rozdílná přerušovaná proudová zatížení, rekuperace vyšší. Vzhledem k poněkud volnějším definování podmínek zkoušek proudového zatížení pantografu umožňuje teoretický model posuzovat optimalizaci konstrukčních částí sběrače, jako jsou ramena a také úzká místa, jako jsou flexibilní propojky. Flexibilita modelu může být využita k optimalizaci průřezů proudové dráhy pantografu i k optimalizaci programu zkoušek a hodnocení jejich výsledků při proměnných parametrech, např. režimu a nebo rychlosti jízdy. Přínosem je také možnost posuzování nasazení stávajících sběračů na moderní výkonnější vozidla, než pro která byl sběrač původně navrhován. Takový model je technicky a ekonomicky značným přínosem pro výrobce i pro zákazníky.

Literatura

- [1] Jansa, Fr.: Vozidla elektrické trakce, NADAS Praha, ISBN 31-069-87, 1987
- [2] Vojáček, A.: Superkondenzátory, www.elektronika.cz, 7.1.2007
- [3] Trade publications SIEMENS
- [4] Herzáň, F.: Mechanika kol'ajových vozidiel, NADAS Praha, 1989
- [5] Mayer, D.: Teorie elektromagnetického pole, ZČU Plzeň, 1999
- [6] VÚŽ: Průzkum šíření přepětových vln v trakčním vedení, Praha 1972
- [7] Matouch, Z.: Trakční energetika, NADAS Praha, ISBN 31-015-74, 1974
- [8] Hlava K.: Napájení elektrických drah, učební pomůcka UPa DFJP KEEZ, 2006
- [9] Krčma T., Satori M, Výkruta V.: Koordinace ochrany trakčního vedení a zařízení napájených z TV před přepětím a zkratem – 1. část, Sborník VTK Prostějov, 2008
- [10] Myslík J.: Elektrické obvody, BEN Praha, ISBN 80-86056-19-8, 1997
- [11] Rusňák Š.: Elektrické přístroje 1, ZČU Plzeň, ISBN 80-7082-825-0, 2001
- [12] Xu, J.F., He, J.H., Hu, J., Bo, Z. Q., Yu, L., Du, F.: Research and Simulation on the Regenerative Braking Process of DC Railway System, Electricity Distribution (CICED), 2010 China International Conference, 13.-16. Sept. 2010
- [13] Jianguo, Ch., Ming, F., Yuntai, Z.: Regenerativ braking current computation of city locomotive, Modern urban rail transit, 1: 39-42, 2008
- [14] Šimánek J.: Řešení napáječe a regulační struktury pro synchronní trakční motor s permanentními magnety, Disertační práce, Univerzita Pardubice DFJP, 2010
- [15] Šimánek J., Kudyn V., Krátký L.: Bezpečná funkce pevných trakčních zařízení při rekuperaci elektrických hnacích vozidel, Vědeckotechnický sborník ČD č. 31/2011, ISSN 1214-9047
- [16] Andersson, E.: Improved energy efficiency in future rail traffic. Proceedings of the UIC Energy Efficiency Conference, Paris, 2000
- [17] Stephan P., Kabelac S., Kind M., Holger M., Mewes D., Schaber K.: Heat atlas - Second edition. Springer, Berlin, 2010, ISBN 978-3-540-77876-9
- [18] Cherukuri K.: Thermal network theory for switchgear under continuous current, Rourkela, 2007
- [19] ČSN EN 50206-1, Praha: ČNI, 2000
- [20] ČSN EN 50206-2, Praha: ČNI, 2001

- [21] Team MathWorks.: Náповěda Matlab 7, 2007
- [22] ČSN EN 50388, Drážní zařízení - Napájení a drážní vozidla - Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanicí) a drážními vozidly pro dosažení interoperability. Praha : ČNI, 2006. 43 s.
- [23] ČSN EN 50163 ed.2. Drážní zařízení - Napájecí napětí trakčních soustav, Praha : ČNI, 2005
- [24] Kurihara M., Kuramochi S.: A new on-board energy storage system for the railway rolling stock utilizing the overvoltage durability of traction motors, Power Electronics and Applications 2009, EPE '09. 13th European Conference, ISBN 978-1-4244-4432-8
- [25] Baghzouz Y.: Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles, Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, ISBN 0-7803-7967-5
- [26] Dixon J.W., Espinoza J.R., Pontt J., Lezana P.: PWM regenerative rectifiers: state of the art, IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 52, no. 1, February 2005, ISSN 0278-0046
- [27] Ortuzar M.E., Dixon J.W.: Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, no. 2, April 2006, ISSN 0278-0046
- [28] Rael S., Davat B.: Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, no. 2, April 2006, ISSN 0278-0046
- [29] Rael S., Davat B.: Control Strategy of Fuel Cell and Supercapacitors Association for a Distributed Generation System, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 6, December 2007, ISSN 0278-0046
- [30] Irving M.R., Case S.H.: Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking, Generation Transmission and Distribution, IEE Proceedings September 1995, ISSN 1350-2360
- [31] Shukla A. K., Sampath S., Vijayamohanan K.: Electrochemical supercapacitors: energy storage beyond batteries Current Science, 2000, p. 1656-1661, ISSN 0011-3891

- [32] Miller J., Patrice R., Patrice S.: Electrochemical capacitors for energy management, Science Magazine, 2008, vol. 321 (n° 5889), p. 651-652, ISSN 0036-8075
- [33] Gutmann G.: Hybrid electric vehicles and electrochemical storage systems - a technology push - pull couple, Journal of Power Sources 84,1999, page 275–279
- [34] Guoqing Xu, Weimin Li, Kun Xu, Zhibin S.: An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles, Energies Journals, September 2011, page 1461-1477
- [35] ŠNAJDR J., SEDLÁČEK J., VOSTRACKÝ Z.: Numerical analyses of disconnecter heating. In Electric power engineering 2012. University of Technology Brno, 2012, s. 861 – 863., ISBN: 978 – 80 – 214 – 4514 - 7
- [36] VOSTRACKÝ Z., PÍCLOVÁ P., POLÍVKA J., ŠNAJDR J., KRUTINA A.: Increasing of Transmission Ability at High Voltage Overhead Lines Ampacity Model. In Electric power engineering 2011, Kouty nad Desnou: VSB - Technical University of Ostrava, 2011, s. 53-56, ISBN: 978-80-248-2393-5
- [37] VOSTRACKÝ Z., KORECKÝ M.: Applying Project Management to Portland Low Floor Tram Project, PICMET '03, Portland, 2003, Oregon, USA
- [38] ULRYCH B., DOLEŽEL I., JASKOVSKÁ M., ŠKOPEK M., VOSTRACKÝ Z.: Coupled Electromagnetic-Thermal Analysis and Optimisation of a DC Actuator-Based Linear Drive, Proceedings of PPE'2002, Kijev, Ukraina 2002

19 Vlastní publikace

Publikace

- [1] ELSTNER, V. VOSTRACKÝ, Z.: Recuperation energy systems in electric transportation, AMTEE – International Conference, Pilsen 10.-12. September 2007
- [2] ELSTNER, V. VOSTRACKÝ, Z.: Akumulace rekuperované energie, XXX. konference Elektrické pohony, Plzeň 12.-14. června 2007
- [3] ELSTNER, V.: Akumulátory rekuperované energie v dopravě, Elektrotechnika a informatika, Nečtiny 2007
- [4] ELSTNER, V.: Zvýšení účinnosti rekuperace na tramvajové trati, Elektrotechnika a informatika, Nečtiny 2008
- [5] LIŠÁKOVÁ, J., ELSTNER, V., VOSTRACKÝ, Z.: Possibility of using electric cars for stability distribution electrical network. In Electric Power Engineering 2012 -Technical university Brno 2012. s. 699 – 671. ISBN: 978-80-214-4514-7
- [6] VOSTRACKÝ, Z., ELSTNER, V., LIŠÁKOVÁ, J.: Large parking houses can be used to start the power stations from darkness. CIGRE Session 2012, September, Group Ref : C6 Pref.. Subjekt: Question N° : 2.4. Sborník v tisku. Registration Number: 2375.

Výzkumné zprávy

- [7] Elstner, V. Vostracký, Z.: Řešení vývojových úkolů pro PMDP, a.s. 1. etapa 1.1.2006-31.12.2006, str. 105
- [8] Elstner, V. Vostracký, Z.: Řešení vývojových úkolů pro PMDP, a.s. 2. etapa 1.1.2007-31.12.2007, str. 127
- [9] Elstner, V. Vostracký, Z.: Řešení vývojových úkolů pro PMDP, a.s. 3. etapa 1.1.2008-30.06.2008, str. 84
- [10] Elstner, V. Vostracký, Z.: Řešení vývojových úkolů pro PMDP, a.s. 3. etapa 1.1.2010-30.12.2010, str. 71

Připravované publikace z tématu disertační práce

- [11] ELSTNER, V., ŠNAJDR, J., VOSTRACKÝ, Z.: Energetická bilance proudové části pantografu elektrického vozidla.

20 Práce na oponovaných vývojových projektech

Projekty pro PmDP v Plzni

1. **Řešení vývojových úkolů pro Plzeňské městské dopravní podniky 1. etapa**
(Vývoj mechanických a elektrických systémů 1.1.2006 – 31.12.2006)
2. **Řešení vývojových úkolů pro Plzeňské městské dopravní podniky 2. etapa**
(Vývoj mechanických a elektrických systémů 1.1.2007 – 31.12.2007)
3. **Řešení vývojových úkolů pro Plzeňské městské dopravní podniky 3. etapa**
(Vývoj mechanických a elektrických systémů 1.1.2008 – 30.6.2008 a 1.1.2010 – 31.12.2010)

Projekty pro výrobní podnik (důvěrné nepublikovatelné firemní zprávy a protokoly)

4. **TTNG**
(Vývoj a testy elektricky ovládaného pantografu pro vozidlo lehké drážní stavby)
5. **NTV**
(Vývoj a testy pantografu pro vysokorychlostní jednotku spol. ALSTOM)
6. **109E**
(Vývoj a testy více-systémového pilotovaného pantografu pro univerzální lokomotivu spol. Škoda Transportation)
7. **RGV 2N2**
(Vývoj a testy pilotovaného pantografu pro vysokorychlostní jednotku spol. ALSTOM určenou pro SNCF)
8. **DASYE**
(Vývoj a testy pantografu pro vysokorychlostní jednotku SNCF)
9. **ALBATROS**
(Testy pantografu pro vysokorychlostní jednotku spol. Ansaldo-Breda určenou pro HSA)
10. **RS2 – RS3**
(Pantograf pro metro v Dillí)

21 Odborná praxe

- 2006 – 2008**
- 3 etapy výzkumných projektů pro PmDP – člen řešitelského týmu
 - Vedení cvičení předmětů Elektrické přístroje, Základy elektroinženýrství na FEL ZČU v Plzni
 - Samostatná přednáška na téma Doprava
- 2008 – 2010**
- Samostatná přednáška na téma Napájení elektrických drah
 - Designer – Testing engineer Faiveley Transport Lekov a.s. Blovice
 - Výzkum chování polopantografového sběrače proudu při vysokých rychlostech
 - Vývoj bezpečnostního systému ADD (automatic drop device) pro pantografy Faiveley
 - Vývoj nových zkušebních metod pro vysokorychlostní pantografy
 - Zahraniční pracovní pobyt (2 měsíce) Dillí, Indie – práce na realizaci projektů RS2 a RS3 Metro Dillí
 - Zahraniční pracovní pobyt (1 měsíc) Amsterdam, Holandsko - Mons, Belgie – práce na realizaci projektu HSA
 - Zahraniční pracovní pobyt (1 měsíc) Tours, Francie – práce na realizaci projektu NTV
- 2010 – 2012**
- Vývojový pracovník Sécheron Tchequie, spol. s r. o. – vývoj nových el. přístrojů pro trakční vozidla

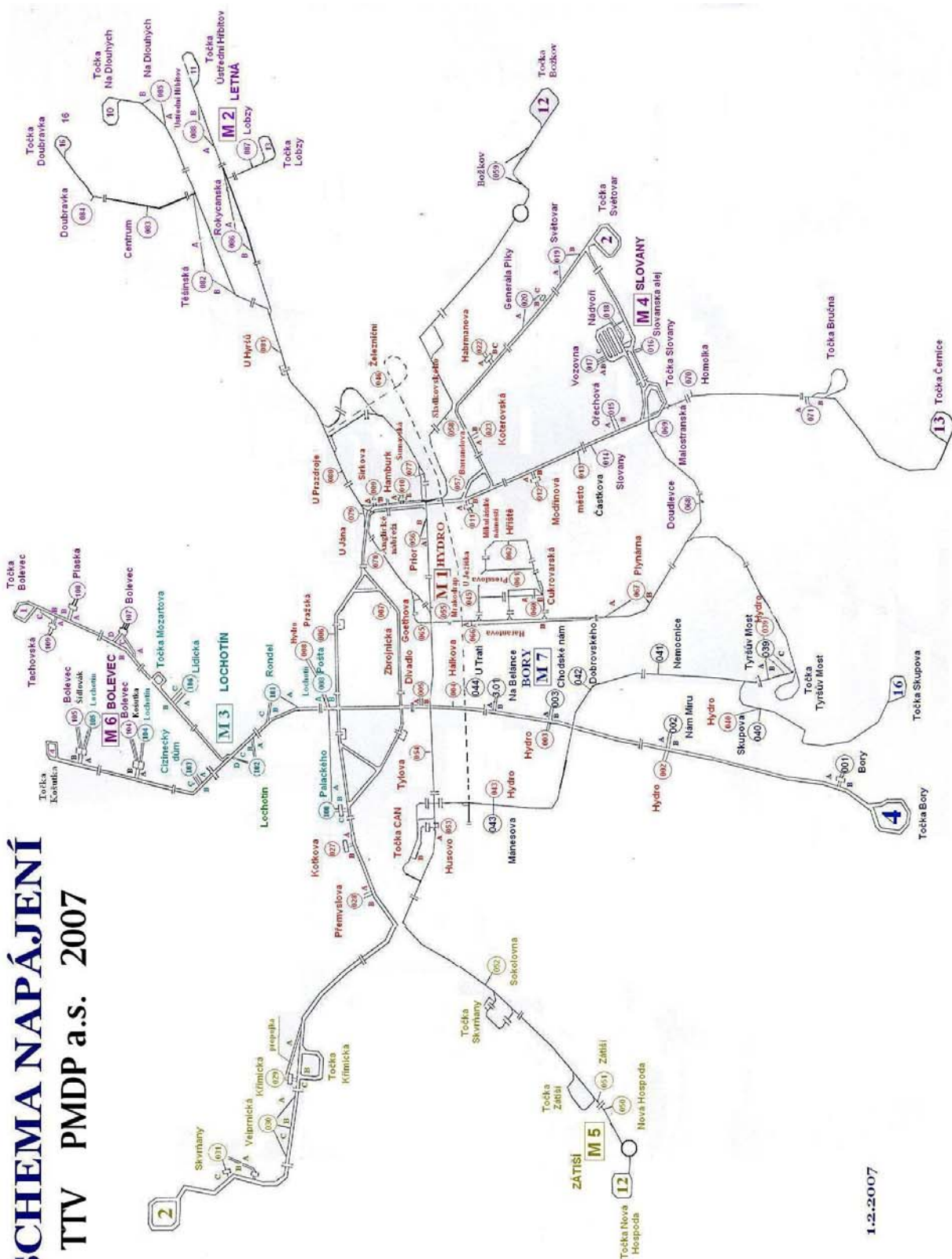
22 Seznam obrázků

Obr. 1.	Vývoj cen el. energie	9
Obr. 2.	Fáze pohybu vozidla	12
Obr. 3.	Trakční obvod moderního vozidla	13
Obr. 4.	Rotor moderního setrvačnicku	16
Obr. 5.	Moderní elektromechanický akumulátor	17
Obr. 6.	Stacionární akumulární zařízení Toyo Denki	20
Obr. 7.	Lithium-ion baterie použitá v akumulárním zařízení ToyoDenki	20
Obr. 8.	Akumulátory Siemens Sitras MES a HES	23
Obr. 9.	Struktura superkondenzátoru	26
Obr. 10.	Schéma stacionárního superkondenzátorového akumulátoru	28
Obr. 11.	Regulační smyčka stacionárního akumulátoru	29
Obr. 12.	Schéma trakční sítě s akumulátorem v měníně	30
Obr. 13.	Schéma trakční sítě s akumulátorem u trati	31
Obr. 14.	Umístění akumulátoru ve vozidle	32
Obr. 15.	Výškový profil linky č. 4 PmDP	40
Obr. 16.	Tachogram jízdy	42
Obr. 17.	Skutečná spotřeba na krytí trakční práce pro 2xT3M	48
Obr. 18.	Spotřeba 2xT3M za ideálních podmínek pro rekuperaci	51
Obr. 19.	Porovnání vozidel s různou regulací výkonu pro směr Košutka – Bory ..	54
Obr. 20.	Porovnání vozidel s různou regulací výkonu pro směr Bory – Košutka ..	55
Obr. 21.	Možné energetické úspory v jednotlivých úsecích	57
Obr. 22.	Topologie trakční sítě vzniklá historickým vývojem města	59
Obr. 23.	Idealizovaná topologie trakční sítě	60
Obr. 24.	Spínací stanice	61
Obr. 25.	Umístování stacionárních akumulátorů	62
Obr. 26.	Akumulátor el. energie pracující do sousedních úseků	64
Obr. 27.	Schéma úprav v úsecích Bory a Chodské náměstí	65
Obr. 28.	Náhradní schéma obvodu při zkratu v trakční síti	68
Obr. 29.	Zkratové poměry při vzdáleném zkratu	73
Obr. 30.	Uzemění trolejového systému v měníně	75
Obr. 31.	Princip šíření stavového signálu měnínny	76
Obr. 32.	Průběh brzdného proudu vozidla při rekuperaci	77
Obr. 33.	Průběh proudu při vzdáleném zkratu	78
Obr. 34.	Vzájemné zapojení vodičů v trakční síti	80
Obr. 35.	Rozměry trolejového drátu	81
Obr. 36.	Měření indukčnosti venkovního vedení	84
Obr. 37.	Úplný model napájecího úseku	87
Obr. 38.	Zkratový proud měnínny bez dalších zdrojů	89
Obr. 39.	Zkratový proud měnínny při přítomnosti vozidla, které zkrat detekuje	90
Obr. 40.	Zkratový proud měnínny a vozidla, které zkrat nedetekuje	91
Obr. 41.	Mezní výkon ostatních zdrojů	92
Obr. 42.	Náhradní schéma pro výpočet mezního výkonu	92
Obr. 43.	Závislost koeficientu přestupu tepla na rychlosti proudění	100
Obr. 44.	Tepelná síť	102
Obr. 45.	Symbol nelineárního zdroje tepla užívaný ve schématu	105
Obr. 46.	Symbol pro odvod tepla proudícím vzduchem užívaný ve schématu ...	106
Obr. 47.	Element tepelné sítě v prostředí Matlab Simulink	107

Obr. 48.	Rozčlenění sběrače na výpočetní elementy	109
Obr. 49.	Řazení elementů tepelné sítě proudové dráhy sběrače AX.....	110
Obr. 50.	Rychlostní profil proudění během oteplovací zkoušky	113
Obr. 51.	Koeficienty přestupu tepla α_k použité při validaci.....	113
Obr. 52.	Průběh oteplení částí sběrače při oteplovací zkoušce.....	115
Obr. 53.	Průběh oteplení částí sběrače při simulaci s proděním vzduchu	116
Obr. 54.	Průběh oteplení částí sběrače při simulaci bez proděním vzduchu	117
Obr. 55.	Rychlost a proud lokomotivy ř. 380 v traťovém úseku	118
Obr. 56.	Oteplení proudové dráhy sběrače při jízdě vlaku.....	119
Obr. 57.	Oteplení sběrače lok. ř. 380 při typové zkoušce vozidla	121
Obr. 58.	Detail oteplení propojek sběrače během typové zkoušky vozidla.....	122

23 Příloha 1

SCHEMA NAPÁJENÍ TTV PMDP a.s. 2007



1.2.2007

24 Příloha 2

TECHNICKÉ PARAMETRY GPS MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ

i-Tec Bluetooth GPS Slim

- Frekvence: L1 pracovní kmitočet / 1575.42 MHz
- Citlivost přijímače: -130dBm při poměru Signál/Šum > 39dB
- Režim 2D /3D
- Čipset SiRF Star III / 20 kanálů
- Start: studený start < 45s, teplý start < 38s, horký start < 8s
- Perioda záznamů od 0.1 s
- Standard pro záznam: standard NMEA-0183 na 57600 b/s
- Přesnost pozice: 15m 2D RMS bez SA 5m 2D RMS s WAAS (50%)
- Přesnost času 1us (synchronizace s časem GPS)
- Datum: WGS-84
- Perioda pro zjištění pozice: +/- 100ms
- Max. výškový dosah: 18000m
- Max. rychlost pohybu: 515 m/s
- Max. zrychlení: 4G

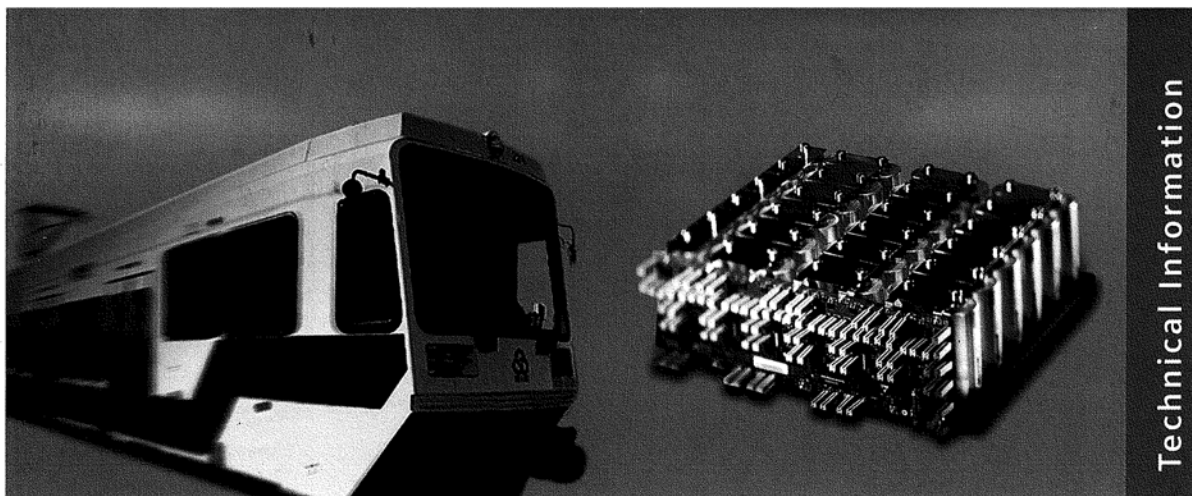
Snímané veličiny

- Zeměpisná šířka
- Zeměpisná délka
- Čas
- Nadmořská výška

25 Příloha 3



26 Příloha 4



SITRAS SES

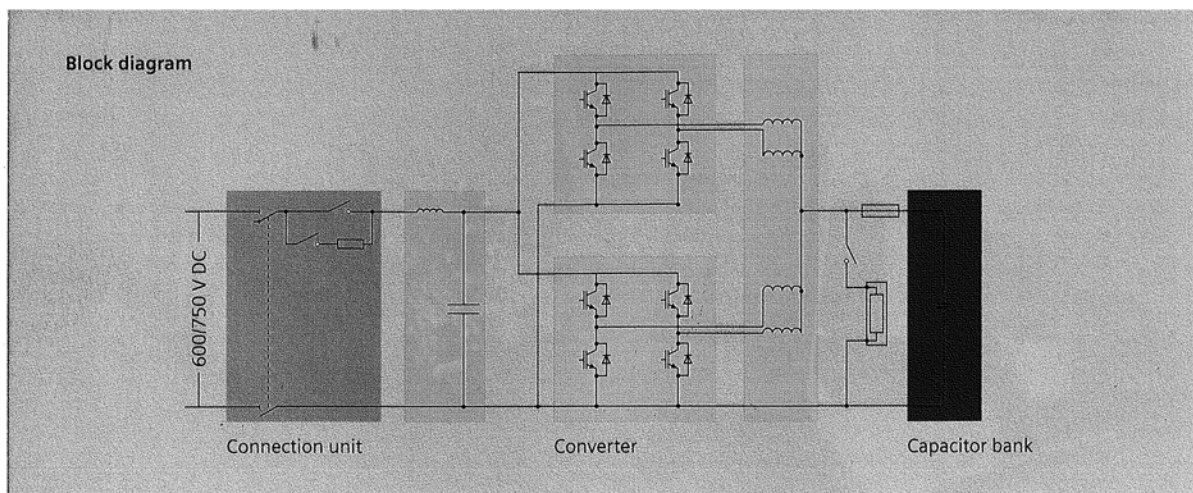
Energy Storage System for Mass Transit Systems

The SITRAS® SES static energy storage system has been developed to make use of the surplus braking energy generated by modern mass transit vehicles. The storage system operates in parallel with the existing traction power supply system and is based on double-layer capacitor technology.

Technical data	
Input voltage (tolerance range to EN 50163)	600/750 V DC
Total number of double-layer capacitors	approx. 1300
Total capacitance	64 F
Energy content	2.3 kWh
Maximum energy saving possible per hour	65 kWh/h
Peak power	1 MW
Efficiency of capacitor bank	0.95
Operating mode (switch-selectable)	Voltage stabilization Energy saving
Auxiliaries supply	400 V 3 AC 750 V DC optional
Temperature range	-20 to 40 °C (-4 to 104 °F)
Maximum operating altitude	1000 m (3280 ft)
Dimensions: layout with two rows of cubicles (l x w x h)	2.8 x 0.7 x 2.7 m (9.2 x 2.3 x 8.9 ft) 2.4 x 0.9 x 2.7 m (7.9 x 3.0 x 8.9 ft)
Complete weight	approx. 4.5 t (9900 Lbs)

SIEMENS

efficient rail solutions



General

The SITRAS SES static energy storage system comprises the following components:

1. Standard railway components for connecting to the traction power supply system
2. Standard vehicle converter
3. Capacitor bank, consisting of double-layer capacitors

Operating modes

The SITRAS SES operates in two modes:

- As a voltage stabilizer, its energy content is constantly kept at a high level and it discharges when the system voltage falls below a specified limit.
- In energy saving mode, it absorbs the energy generated by braking vehicles and stores it until the storage unit can feed it back into the power supply system at a later point when vehicles are accelerating.

The system can switch automatically between these two operating modes so that it can adapt perfectly to the prevailing operational requirements.

Mechanical design

The entire ready-to-connect energy storage system is laid out in two rows of cubicles for installation in existing or in new substations. The system can be connected either directly to the traction power supply system or to the busbar in the substation by means of the connection unit, which comprises the disconnector, the DC high-speed circuit-breaker and the precharging unit. The connection between the connection unit and the actual storage unit is made by the standard vehicle converter, which functions as a step-up/step-down converter.



Reg. No. 001869QM

Siemens AG
Transportation Systems
Electrification
P. O. Box 3240
91050 Erlangen
Germany

electrification@ts.siemens.de
www.siemens.com/
transportation/electrification

Printed in Germany
TH 179-040038 204382 DB 02040.5
Dispo 21711
Order No. A19100-V300-B276-V2-7600

The information in this document contains general descriptions of the technical options available, which do not always have to be present in individual cases. The required features should therefore be specified in each individual case at the time of closing the contract.

27 Příloha 6

Kód bloku Nelineární zdroj tepla

```
component nonlinear_heat_source_input
% Nonlinear HT source

inputs
    I = { 0, 'A' };           % I_ef: bottom
end

parameters
    cross = { pi*0.1^2, 'm^2' }; % Material cross-section
    length = { 1, 'm' }; % Material length
    rho_el = { 0.028126e-6, 'Ohm*m' }; % Material resistivity at 20°C
    b = { 0.00403, '1/K' }; % Thermal coef. of resistivity
    k_ac = 1.0123; % DC to AC coefficient
    Nwires = 1; % Number of parallel wires
end

nodes
    A = foundation.thermal.thermal; % A:bottom
    B = foundation.thermal.thermal; % B:top
end

variables
    Q = { 0, 'J/s' };
    T = { 0, 'K' };
end

function setup
    through( Q, A.Q, B.Q );
    across( T, A.T, B.T );
end

equations
    let
        Rmat = length*rho_el/cross*(1 + b*(B.T - {293.15, 'K'}));
        R = Rmat/Nwires;
    in
        Q == R * k_ac * I^2;
    end
end

end
```

28 Příloha 7

Kód bloku Proudění vzduchu

```
component convection_wind_lookup
% Convective HT wind/temperature
inputs
    wind = 0; % wind: left
end

parameters
    surface = { 0.1, 'm^2' }; % Surface
    x = [0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.5 3 4 5 7 10
13 16 20];
    alfa5 = [3.851764887 5.237222782 6.80387578 8.209602422 9.483267259 10.65752504
11.75514549 12.7918075 13.77864252 14.72382425 15.6335382 17.36478514 19.00040933
20.55921457 22.05452237 23.4961716 26.91093537 30.11403364 36.06466856 41.57864269
51.72992492 65.5387964 78.24875815 90.19999201 105.2711423];
    alfa25 = [5.735602552 6.488591695 7.60498377 8.755302767 9.869412565
10.93442701 11.95174086 12.92606086 13.86240465 14.7653006 15.63863727 17.30927508
18.89498807 20.41076343 21.86774935 23.27445657 26.61168044 29.74610686 35.57406229
40.97657096 50.92312082 64.45032212 76.89684275 88.59698357 103.3475064];
    alfa45 = [6.613636268 7.192303459 8.116390671 9.12526624 10.13784675
11.1274169 12.08625683 13.0134803 13.91063017 14.78000762 15.6240246 17.24487493
18.78877949 20.2679877 21.69204738 23.06847304 26.33777148 29.41139456 35.12972064
40.43190787 50.19320403 63.46441278 75.67087175 87.14184964 101.5994016];
    alfa65 = [7.21965468 7.707782783 8.516281028 9.429407408 10.36787644
11.29975257 12.21255864 13.10201981 13.96737821 14.80937126 15.62933039 17.20920798
18.71868203 20.1678149 21.56485023 22.91647967 26.1303684 29.15462139 34.78436134
40.00582869 49.61861703 62.68534766 74.70057481 85.98936071 100.2144103];
end

nodes
    A = foundation.thermal.thermal; % A:left
    B = foundation.thermal.thermal; % B:right
end

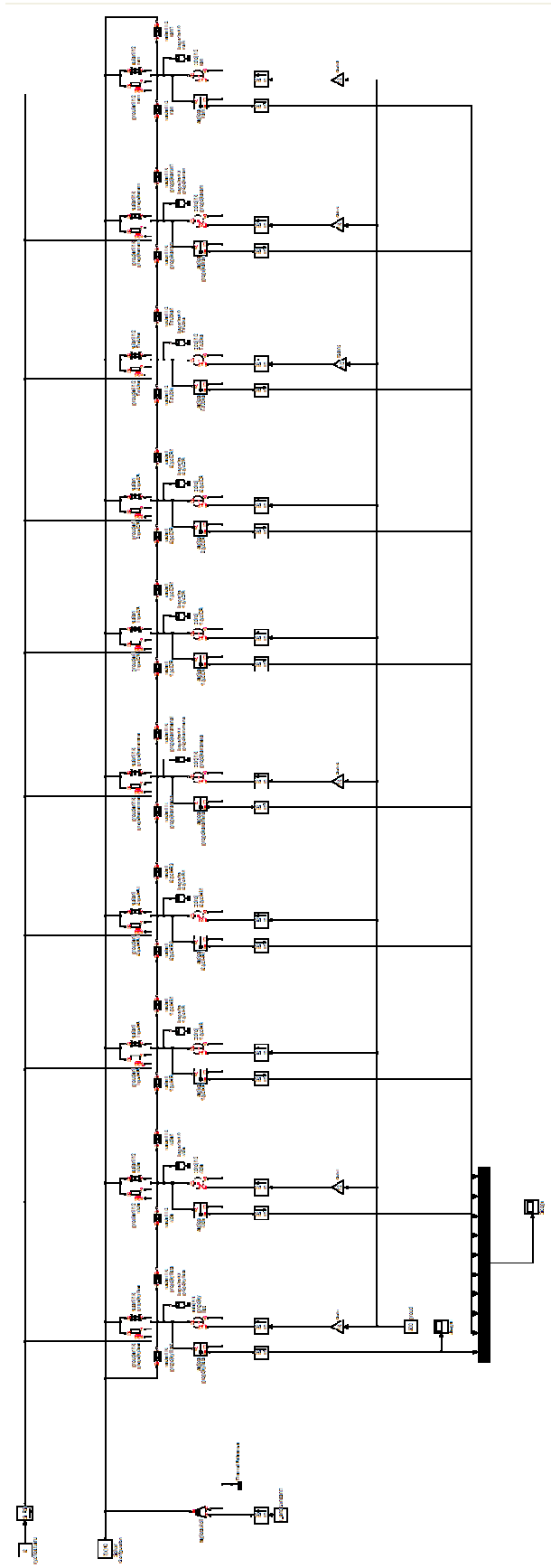
variables
    Q = { 0, 'J/s' }; % heat
    T = { 0, 'K' }; % temperature
end

function setup
    through( Q, A.Q, B.Q );
    across( T, A.T, B.T );

    % Parameter range checking
    if surface <= 0
        pm_error('simscape:GreaterThanZero','Surface')
    end
end

equations
    if value(T,'K') <= 5
        Q == surface * T * {tablelookup(x, alfa5, wind), 'W/(m^2*K)'};
    elseif value(T,'K') > 5 && value(T,'K') <= 25
        Q == surface * T * {tablelookup(x, alfa25, wind), 'W/(m^2*K)'};
    elseif value(T,'K') > 25 && value(T,'K') <= 45
        Q == surface * T * {tablelookup(x, alfa45, wind), 'W/(m^2*K)'};
    else
        Q == surface * T * {tablelookup(x, alfa65, wind), 'W/(m^2*K)'};
    end
end
end
```


30 Příloha 9

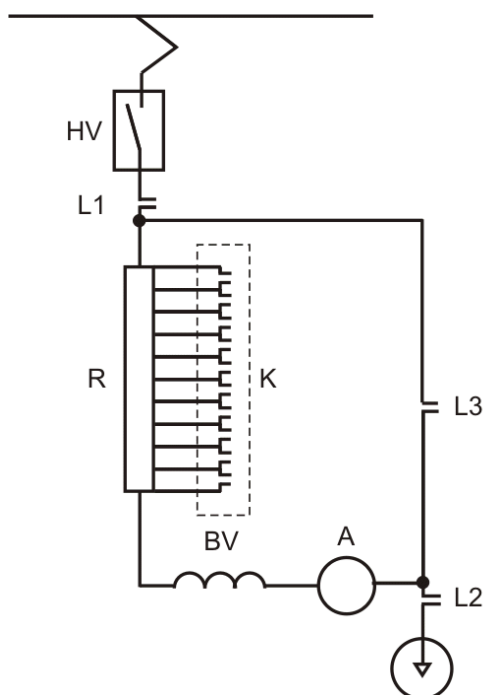


31 Příloha 10

Koncepce vozidla s odporovou regulací výkonu

Vozidlo s odporovou regulací výkonu je historicky nejstarší. Odporová regulace je ve svém principu velice jednoduchá a lze ji realizovat pouze s použitím mechanických spínacích přístrojů. Jako trakční motor je ve vozidle s odporovou regulací výkonu použit stejnosměrný sériový motor většinou s pomocnými póly a u vyšších výkonů doplněný kompenzačním vinutím v pólových nástavcích hlavních pólů. Výkon tohoto stejnosměrného stroje, lze řídit velikostí napájecího napětí. Napájecí napětí regulováno pomocí odporníku v kombinaci s kontrolérem spínajícím odbočky odporníku. Tím vzniká stupňovitě proměnný odpor.

Z výše uvedených skutečností je zřejmé, že tato regulace je zatížena značnými ztrátami na rozjezdovém odporníku, které jsou přímo úměrné násobku úbytku napětí na odporníku a trakčnímu proudu. Při tomto způsobu regulace se vozidlo pohybuje bezztrátově, pouze v situaci, kdy je již celý rozjezdový odporník vyřazen, jede tedy svým jmenovitým výkonem. Počet hospodárných stavů trakčního obvodu, lze rozšířit různým řazením trakčních motorů ze sériových do paralelních spojení. Princip trakčního obvodu je patrný z následujícího obrázku.



Princip trakčního obvodu – odporová regulace

Popis k obrázku:

HV - Hlavní vypínač

L1-3 - Linkové stykače

R - Rozjezdový odporník

K - Spínací kontrolér

BV - Budící vinutí

A - Kotva trakčního motoru

Vozidlo provádí rozjezd se sepnutými linkovými stykači L1 a L2. Na počátku rozjezdu (nejnižší výkon) jsou všechny kontakty kontroleru rozpojeny. Postupně jsou během rozjezdu spínány a vyřazují rozjezdový odpor.

Vozidla městských drah využívají trakční obvod k elektrodynamickému brzdění změnou konfigurace obvodu, linkové stykače L1 a L2 jsou rozpojeny a stykač L3 sepnut. Trakční motor pracuje v generátorickém režimu a svou energii maří v odporníku (většinou se využívá rozjezdový odporník). K regulaci brzdné síly se pak může využít shodný kontrolér jako pro rozjezd.

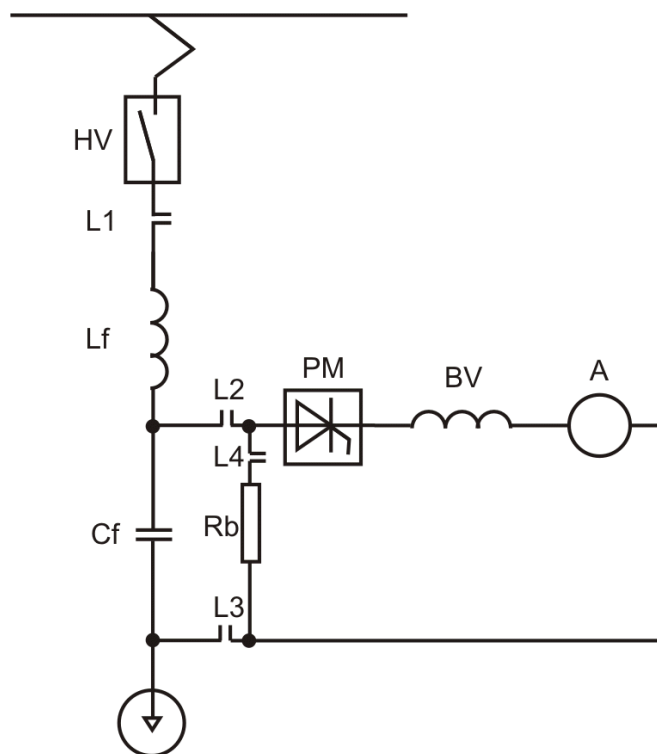
Z uvedeného je patrné, že veškerá kinetická energie vozidla je přeměněna v odporníku na teplo a zmařena.

Trakční obvod vozidla s odporovou regulací výkonu je v principu schopen rekuperace, ovšem těžkopádnost spínacích přístrojů a jejich omezená životnost vedla v minulosti k tomu, že tato možnost nebyla u vozidel vůbec využívána. Trakční obvod je v podstatě zapojen obdobně jako při rozjezdu vozidla, pouze trakční motor je natolik nabuzen, že na sběrači vozidla je vyšší napětí než je napětí sítě, což vyvolá zpětný tok energie a patřičný brzdný efekt na trakčním motoru. V reálném provozu se však vyskytovali problémy s dostatečně citlivou regulací proudu během rekuperace.

Koncepce vozidla s pulsní regulací

Technický rozvoj polovodičových součástek v 70-tých letech dvacátého století umožnil výrobu vozidel s pulsní regulací výkonu. Trakční motor vozidla může být použit stejnosměrný sériový nebo cize buzený. Rozjezdový odporník je u vozidla nahrazen pulsním měničem napětí. Jde ve své podstatě o výkonový polovodičový spínač, který řídí střední hodnotu napětí na svém výstupu. Tím odpadá největší podíl ztrát na rozjezdovém odporníku. Pulsní měnič představuje ovšem také ztráty vlivem přechodového odporu v propustném směru elektronických součástek (nejčastěji tyristorů) a spínacích ztrát. Tyto ztráty se u starších měničů pohybují až okolo 5%

z trakčního výkonu vozidla. Beztrátový stav během jízdy vozidla neexistuje. Princip řízení napětí je pomocí pulsně šířkové modulace, kdy pulsní měnič spíná s konstantní spínací frekvencí, ale řídí se délka jednotlivých pulsů. Vozidlo může během rozjezdu postupně přecházet mezi několika spínacími frekvencemi. Jedním z důležitých požadavků regulace je napájení trakčních motorů takovým pulsním napětím aby nedocházelo k přerušování trakčního proudu. Základní princip vozidla s pulsní regulací je na následujícím obrázku.



Princip trakčního obvodu - pulsní regulace

Popis k obrázku:

- HV - Hlavní vypínač
- L1-4 - Linkové stykače
- Lf - Filtrační tlumivka
- Cf - Filtrační kondenzátor
- Rb - Brzdový odporník
- PM - Pulsní měnič
- BV - Budící vinutí
- A - Kotva trakčního motoru

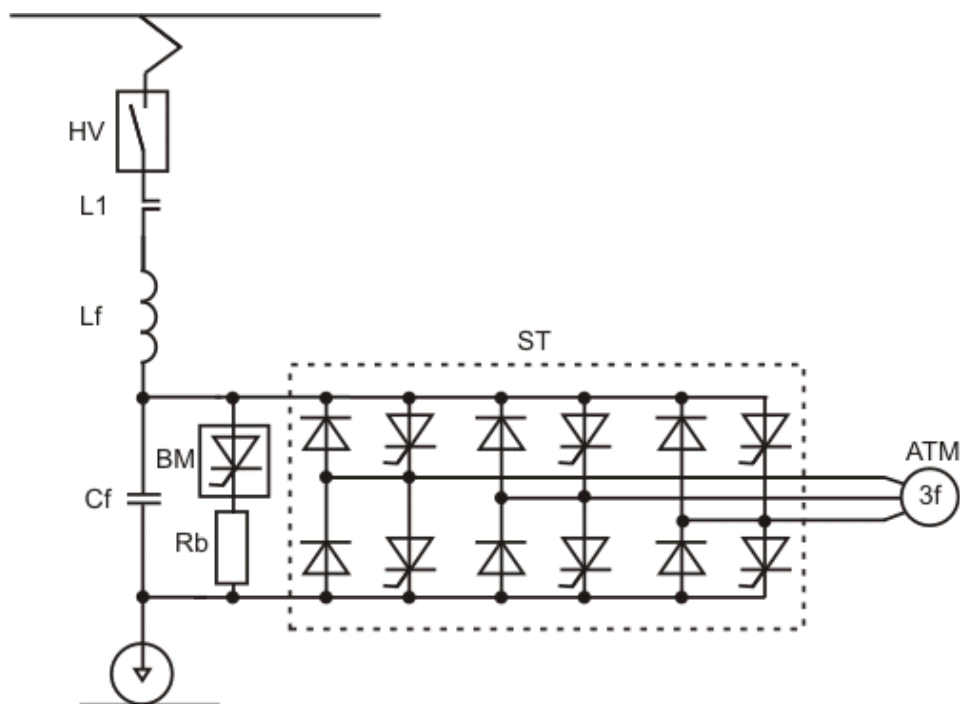
Vozidlo v režimu jízdy má sepnuty linkové stykače kromě stykače L4. Pulsní měnič řídí střední hodnotu napětí přiváděného do trakčního motoru. Veškeré ztráty představují jen ztráty v pulsním měniči a v odporu trakčního motoru.

V režimu brzda jsou rozpojeny linkové stykače L2 a L3. Stykač L4 je sepnut a připojuje do obvodu brzdový odporník Rb. Pulsní měnič v režimu brzdy řídí velikost brzdného proudu, resp. střední hodnotu brzdového odporu.

Rekuperační brzdění vozidla s výše popsáním „zastaralým“ tyristorovým pulsním měničem není možné, protože tyristory blokují zpětný tok energie. Přesto za použití dalších měničů nebo spínacích přístrojů by rekuperace možná byla, ovšem vozidla pro městské dráhy z produkce ČKD, tímto způsobem brzdění vybavena nebyla.

Koncepce vozidla s asynchronním pohonem s rekuperační brzdou

Asynchronní pohon je nejrozšířenějším druhem pohonu u nových nebo rekonstruovaných vozidel. Využití asynchronního stroje pro elektrickou trakci bylo možno až po zdokonalení (zrychlení, zlevnění, zmenšení, snížení ztrát) výkonových polovodičových součástek. Trakční motor je asynchronní stroj s kotvou nakrátko, který je napájen z trakčního střídače. Trakční střídač řídí otáčky a výkon motoru frekvencí a napětím 3f střídavého systému. V minulosti se využívaly proudové trakční střídače, které jsou dnes již zcela vytlačeny čtyřkvadrantovými napěťovými střídači, které umožňují plné řízení asynchronního motoru jak v motorickém, tak generátorickém režimu. Jinými slovy, umožňují tok energie oběma směry. Tento způsob pohonu je hospodárný a přináší výhodu bezúdržbového asynchronního stroje. Ztráty vznikají, podobně jako u vozidla s pulsní regulací, především přechodovým odporem na součástkách střídače (dnes IGBT tranzistory) a na ohmickém odporu trakčního motoru. Principiální schéma je na následujícím obrázku.



Princip trakčního obvodu – asynchronní pohon

Popis obrázku:

HV - Hlavní vypínač

L1 - Linkový stykač

Lf - Filtrační tlumivka

Cf - Kondenzátor stejnosměrného meziobvodu

BM - Brzdový – pulsní měnič

Rb - Brzdový odporník

ST - Trakční napěťový střídač

ATM - Asynchronní trakční motor

V motorickém režimu je střídačem odebírána elektrická energie z Cf kondenzátoru stejnosměrného meziobvodu, který se přímo nabíjí z trakční sítě přes sepnutý linkový stykač L1. Střídač ST využívá principu pulsně šířkové modulace a vytváří pulsní napětí jednotlivých fází 3f systému, jehož střední hodnota odpovídá sinusovému průběhu napětí. Většina pohonů dodržuje stálý poměr napětí a frekvence, pouze po dosažení vyšších otáček trakčního motoru a vyčerpání celého napětí kondenzátoru meziobvodu se zvyšuje pouze frekvence, trakční motor pak pracuje v odbuzení.

V brzdovém režimu pracuje obvod velmi obdobně pouze je motoru vnucována nižší frekvence než která odpovídá jeho otáčkám. Motor se pak začíná chovat jako

asynchronní generátor a střídač jako řízený usměrňovač, který nabíjí kondenzátor stejnosměrného meziobvodu. Pokud je napětí meziobvodu vyšší než napětí sítě dochází k toku energie z vozidla do trakční sítě. Pokud je napětí trakční sítě na své nejvyšší dovolené hranici linkový stykač L1 obvod odpojí od sítě a brzdový měnič BM zajistí svým spínáním přechod do režimu elektrodynamické brzdy, kdy je veškerá kinetická energie vozidla mařena na teplo v brzdovém odporníku Rb.

Z uvedeného je patrné, že k brzdovému odporníku nebo na jeho místo je možné připojit akumulátor elektrické energie, který by po přechodu do motorického režimu zásoboval střídač energií podobně jako kondenzátor Cf.

Koncepce vozidla se synchronním pohonem

Trakční obvod vozidla se synchronním pohonem je v podstatě velmi podobný jako obvod vozidla s asynchronním pohonem. Zásadní rozdíl je v použitém trakčním motoru. Je zde použit synchronní 3f motor s kotvou osazenou permanentními magnety. Takový motor vyniká dobrou momentovou charakteristikou a vysokou účinností jak v motorickém tak generátorickém režimu. Synchronní motor poskytuje více režimů brzdění a lze jej použít pro brzdění až do nulové rychlosti vozidla.

Největší nevýhodou synchronního trakčního motoru je v případě poruchy v trakčním obvodu nemožnost jeho odbuzení. Nebo naopak odmagnetování magnetů rotoru při zkratech, vlivem značných proudů ve vinutích statoru.

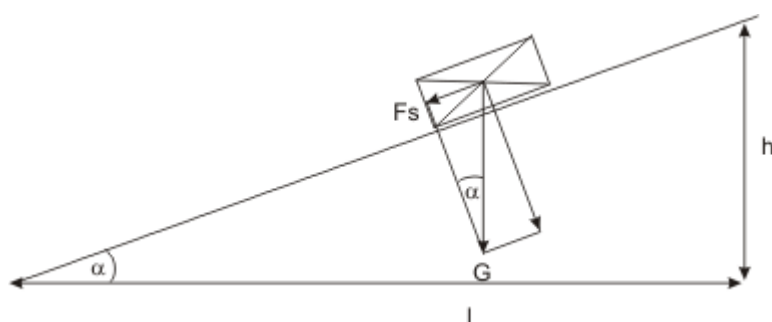
32 Příloha 11

Traťové odpory

Traťové odpory jsou závislé na stavu tramvajové trati a její stavební dispozici. Působí proti pohybu vozidla zejména při jízdě do stoupání, v obloucích a v tunelech.

Odpor ze stoupání

Odpor ze stoupání má největší podíl na celkovém traťovém odporu ze všech traťových odporů. Odpor ze stoupání je vyvolán složkou tíhy vozidla ve směru rovnoběžném s osou koleje. Označujeme jej p_s nebo s .



Odpor ze stoupání

Pro malé úhly α lze psát:

$$F_s = G \cdot \sin \alpha = G \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

potom

$$F_s = G \cdot \frac{h}{l} = m \cdot g \cdot \frac{h}{l} = \frac{m \cdot g}{1000} \cdot 1000 \frac{h}{l}$$

$$s = 1000 \frac{h}{l} [\text{‰}]$$

$$p_s \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \approx s [\text{‰}]$$

$$F_s = p_s \cdot G$$

Odpor ze stoupání lze tedy brát přímo jako hodnotu sklonu úseku tratě v promilích. Veličina nabývá kladných i záporných hodnot (vznik volné energie pro rekuperaci).

Odpor z oblouku

Odpor je způsoben třením okolku o kolejnice a částečným skluzem dvojkolí po kolejnici vlivem nestejně délky kolejnic vně a uvnitř oblouku. Kolo při průjezdu obloukem působí na kolejnici ve dvou bodech. V bodě na styčné kružnici kola s temenem kolejnice, kde se přenáší svislá kolová síla odpovídající tíze vozidla. Další stykový bod se nachází na okolku. Kolmo k těžnici okolku kola působí normálová síla. Složením normálové síly a součinitele smykového tření dostáváme sílu, jejíž průmět do osy x je vodící síla. Průmětem normálové síly do osy x je řídicí síla, která nutí podélnou osu vozidla do nové polohy. Tato řídicí síla vyvolá třecí tečnou reakci mezi kolem a kolejnicí, což představuje odpor v oblouku.

Nestejná délka kolejnic v oblouku se značně kompenzuje kuželovitostí jízdních ploch dvojkolí, ne však zcela. K jistému skluzu dochází jak u kola na vnitřní straně oblouku, tak u kola na vnější straně oblouku.

Další významnou silou přitlačující okolky na kolejnici v oblouku je vlastní odstředivá síla působící na vozidlo v oblouku.

$$F_o = \frac{m \cdot v^2}{R},$$

kde m je hmotnost vozidla

v je rychlost vozidla

R je poloměr oblouku.

Při vlečení vozidla jiným vozidlem vyvíjejícím tažnou sílu se snižuje odpor oblouku pro vlečené vozidlo. Tento jev způsobuje tažná síla, kterou spřáhlo přenáší tečně k ose koleje a tím navádí vlečené vozidlo do oblouku. Tento jev zmiňují, protože některé dopravní podniky se z ekonomických důvodů vracejí k dříve používanému uspořádání tramvajových souprav ve složení trakční vozidlo a vlečné vozidlo (např. DP Brno).

Z uvedeného lze říci, že odpor v oblouku závisí na:

- poloměru oblouku
- rozchodu kolejí
- rozvoru náprav v podvozcích
- na rychlosti projíždění obloukem
- na tažné síle
- odstředivé síle

- převýšení kolejnic
- součiniteli tření

Na základě mnoha závislostí se nedá odpor z oblouku přesně matematicky určit, proto se pro praktické výpočty používají empirické vzorce získané z měření na vozidlech. Těchto vztahů existuje celá řada, ovšem pro poměrně velké poloměry oblouků. Na tramvajové lince se však vyskytují oblouky velmi prudké, o poloměrech v řádech desítek metrů. Proto pro výpočty doporučuji použít obecnější vztah pro odpor z oblouku, který je ověřen a je dostatečně přesný.

$$p_r = \frac{0,5 \cdot f(e + a^2 + e^2)}{R_o},$$

p_r – odpor z oblouku [N/kN]

R_o – poloměr oblouku [m]

f – součinitel smykového tření mezi kolem a kolejnicí [N/kN]

e – rozchod kolejnic [m]

a – pevný rozvor podvozku vozidla [m]

Pokud se vyskytnou problémy se správným odhadem součinitele smykového tření mezi kolem a kolejnicí, je možné použít zjednodušený empirický vztah pro městské dráhy.

$$p_r = 350 \frac{e}{R_o},$$

kde mají symboly stejný význam jako v předchozí rovnici.

Doplňující informace:

V ostrých obloucích je nutné omezit rychlost, jednak kvůli pohodlí cestujících a také z hlediska bezpečnosti proti vykolejení. Traťová rychlost v oblouku se doporučuje stanovit podle následujícího vzorce (platí pouze pro rozchod 1435mm).

$$v_r \leq 2,8 \sqrt{R_o},$$

kde v_r je bezpečná rychlost a R_o je poloměr oblouku.

Metody snížení odporu z oblouku jsou postaveny na snižování koeficientu tření mezi okolkem a kolejnicí nebo na mechanické vazbě mezi podvozky. Obecně

Ize říci, že nejlepší chod v oblouku má čtyřnápravové vozidlo s dvěma otočnými podvozky s vhodným rozvorem.

Odpor v tunelu

Vozidlo v tunelu stlačuje svým čelem vzduch před sebou, dochází ke tření vzduchu o stěny tunelu a vozidla, dochází k intenzivnímu víření vzduchu, které zvyšuje odpor vozidla. Tento druh odporu je významně patrný až u tunelových tubusů minimální délky 100m, proto je pro náš případ nezajímavý neboť na tramvajové lince se tunely nevyskytují a v případě mimoúrovňového křížení s jinou komunikací je tento odpor zanedbatelný.

Pro úplnost uvádím odpory tunelových tubusů:

jednokolejný tunel $p_t = 2 \text{ N/kN}$

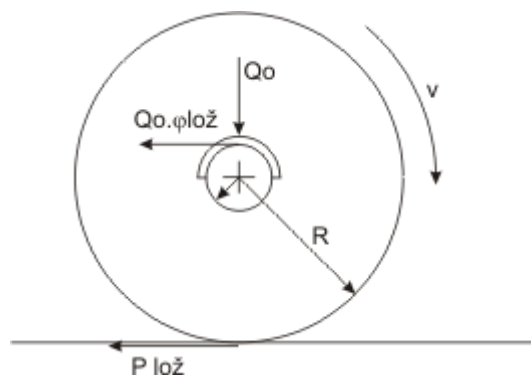
dvojkolejný tunel $p_t = 1 \text{ N/kN}$

33 Příloha 12

Vozidlové odpory

Odpor třením v ložiskách

Zde se zaměřím pouze na teorii týkající se ložisek valivých, neboť lze jen těžko předpokládat použití kluzných ložisek u nových vozidel.



Odpor třením v ložiskách

Z obrázku je patrný vztah mezi veličinami.

$$P_{lož} = \frac{r}{R} \cdot \varphi_{lož} \cdot Q_0,$$

kde $P_{lož}$ – odporová síla ložiska přenesená na obvod kola [N]

r – poloměr čepu nápravy [m]

R – poloměr kola [m]

$\varphi_{lož}$ – součinitel tření v ložisku [N/kN]

Q_0 – kolové zatížení [kN] $Q_0 = \frac{G}{2 \cdot n}$, kde G je tíha vozidla a n počet náprav vozidla.

Pro měrný odpor tedy lze psát:

$$p_l = \varphi_{lož} \cdot \frac{r}{R},$$

kde je význam symbolů shodný jako u předchozího vztahu.

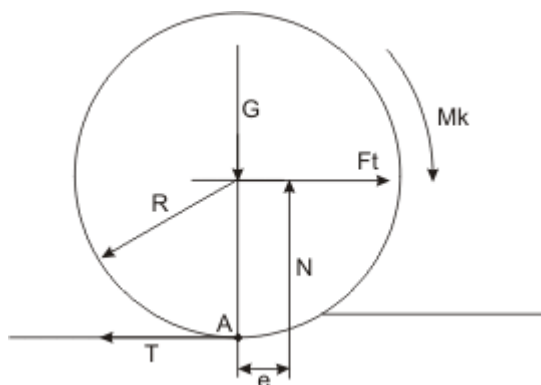
Velikost odporu ložisek a tím i jeho součinitele je velice proměnlivá hodnota závislá na typu ložiska a rychlosti jízdy. Ložiskový odpor je velký do rychlostí okolo

1km/h, pak prudce klesne a se zvyšující se rychlostí lehce stoupá. Tento průběh je způsoben přechodem ze suchého typu tření v ložisku do kapalinného. Odpor ložisek je též ovlivňován teplotou a stářím maziva.

Pro běžně používaná valivá ložiska je součinitel tření $\varphi_{\text{lož}} = 1 - 2,5 \text{ N/kN}$, tomu odpovídá měrný odpor třením v ložiskách $p_l = 0,115 - 0,29 \text{ N/kN}$.

Odpor tření kola o kolejnici

Tato část vozidlového odporu je vyvolána valením dvojkolí po temenu kolejnice. Je známa skutečnost, že reálné rotační těleso na drsné podložce se neuvede do pohybu, i když na něj působí určitá malá síla nebo moment. Existuje tedy určitá odporová složka síly, kterou nazýváme odpor valení. Brání rotačnímu tělesu ve valení a při tom nesouvisí se smykovým ani adhézním třením. Kolo je z tvrdšího materiálu než kolejnice a styk kola s kolejnicí se realizuje na minimální ploše, proto dochází k deformaci kolejnice. Pokud se kolo po kolejnici odvaluje je deformace kolejnice rychlejší než návrat kolejnice do původního stavu za kolem. Tento jev způsobí malé posunutí reakce na tíhu vozidla oproti tíže samotné. Vše je patrné z následujícího obrázku.



Odpor tření kola o kolejnici

Pokud vyjdeme ze skutečnosti, že součet všech momentů k bodu A je nulový můžeme napsat:

$$F_t \cdot R - N \cdot e = 0$$
$$p_{tk} = \frac{F_t}{N} = \frac{F}{G} = \frac{e}{R}$$

V praxi platí, že vzdálenost $e \leq \mu \cdot v$, kde $\mu \cdot v$ je poloměr valivého tření, který má pro ocel hodnotu 0,15.

Pak např. pro ocelové kolo o průměru 1m vychází odpor tření kola o kolejnici na 0,3 N/kN. Odpor valivého tření je lineárně závislý na rychlosti valení a má velmi malou hodnotu, což činí provoz tramvaje z tohoto hlediska výhodnější než provoz trolejbusů či autobusů.

Odpor tření vozidla o vzduch

Odpor vzduchu má výrazný vliv až při vysokých rychlostech vozidel. Odpor vzduchu je přímo úměrný kvadrátu rychlosti, lze jej určit ze všeobecně platného fyzikálního vztahu:

$$P_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot s \cdot \rho_{vzd} \cdot V_1^2 \cdot k_1 [N]$$

c_x – tvarový součinitel závislý na tvaru vozidla a počtu vozidel

s – příčný průřez čelního vozidla

ρ_{vzd} – hustota vzduchu

V_1 – relativní rychlost obtékání vzduchu okolo stěn vozidla

k_1 – koeficient na změnu rozměrů v rovnici

Odborná literatura dále uvádí empirický vztah pro výpočet odporové síly vzduchu:

$$P_{vzd} = 5 \cdot c \cdot S \left(\frac{V}{10} \right)^2 [N],$$

kde c je součinitel tvaru (0,45 – 1,2), S příčný průřez vozidla a V rychlost.

Pro konkrétní vozidlo je odpor vzduchu nejpřesněji zjistit měřením v aerodynamickém tunelu. Pro tramvajovou dopravu v centrálním městě, kde se vozidla pohybují rychlostí do 40km/h, by bylo možno odpor vzduchu zanedbat, ovšem vlivem větru se i u poměrně pomalu jedoucího vozidla může značně zvýšit vzájemná rychlost vozidla a vzduchu. To má za následek citelné zvýšení jízdního odporu. Bohužel vítr je natolik nahodilý jev, že jej není možno z hlediska trakční mechaniky tramvajové dopravy efektivně matematicky zahrnout mezi vozidlové odpory.

Odpor setrvačných hmot při výběhu

Při jízdě ve fázi výběhu se u hnacího vozidla městské dráhy projevuje zvýšený vozidlový odpor než při jízdě silou. Podstata problému spočívá v tom, že s dvojkolím

současně rotují i ozubené převody převodovek a kotvy trakčních motorů. V zubech a ložiskách převodů, v ložiskách kotev trakčních motorů a případně u motorů s vlastní ventilací i tření lopatek o vzduch vznikají třecí síly, které zvětšují vozidlový odpor. Hodnota, o kterou se zvyšuje vozidlový odpor, byla experimentálně zjištěna a je 2 – 3 N/kN.