

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Energeticko - ekonomická bilance trolejbusové dopravy

**vedoucí práce: Ing. Jiří Polívka
autor: Ondřej Pechman**

2012

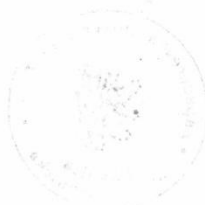
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

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

Jméno a příjmení: **Ondřej PECHMAN**
Osobní číslo: **E09B0174P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Energeticko-ekonomická bilance trolejbusové dopravy**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Analyzujte provoz vybrané trolejbusové linky z hlediska energetické náročnosti.
2. Porovnejte systémy regulace elektrického pohonu.
3. Popište kritická hlediska návrhu trolejbusového vedení.
4. Navrhněte vylepšení rizikových míst napájecí soustavy.



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


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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Polívka**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na trolejbusovou dopravu, přičemž je rozdělena na tři kapitoly.

V první kapitole je stručně popsána historie trolejbusové dopravy v Plzni, vývoj regulačních systémů a nezbytných součástí trolejbusového provozu. V práci se zmiňují o trendu snižování závislosti na trolejovém vedení. Druhá část obsahuje výpočet spotřeby elektrické energie trolejbusu. Ta je následně doložena naměřenými hodnotami. V práci je též popis měřeného vozu i měřicího vybavení. Poslední část je zaměřena na rizika při výstavbě nového trolejového vedení a vylepšení rizikových míst napájecí soustavy.

Klíčová slova

elektrická trakce, energetická bilance, ekonomická bilance, trolejbus, trolejové vedení, sběrač, spotřeba elektrické energie, 21 Tr, teplotní roztažnost vedení

Abstract

The present bachelor thesis is focused on the trolleybus transport and it is divided into three parts.

In the first part of this thesis, there is description of the history of trolleybus transport in Pilsen, the development of control systems and necessary parts of the trolleybus transport. I mention the trend of reducing dependence on the overhead lines. There is calculated electric energy consumption of trolleybus and subsequently it is supported by the measured values in the second part. There is also a description of the measured vehicle and the measuring equipment. The final part is focused on the risks in the construction of new overhead lines and improvement of power system in risk areas.

Key words

electric traction, energy balance, economic balance, trolleybus, trolley lines, collector, consumption of electric energy, 21 Tr, thermal expansion of lines

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 5.6.2012

Ondřej Pechman

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Polívkovi za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Poděkování patří společnosti *Plzeňské městské dopravní podniky, a.s.*, především však zaměstnancům Ing. Jiřímu Kohoutovi, Ph.D., Jiřímu Vinšovi, Václavu Sokolovi, Jiřímu Trnkovi, Pavlu Pirnerovi a Ing. Stanislavu Martínkovi za poskytnutí informací o měřeném vozidle, naměřených hodnot a dalších cenných rad a faktů.

Dále děkuji Prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackému, DrSc. za důležité rady při vzniku práce a Doc. Ing. Ladislavu Němcovi CSc. za podporu při výpočtu spotřeby elektrické energie dopravního prostředku.

Mé poděkování za ochotu při ladění měřicí jednotky patří Robertovi Šťastnému ze společnosti *C.T.M. Praha, s.r.o.*

Také bych rád poděkoval svým blízkým, kteří mě ve studiu podporovali.

Obsah

Obsah	8
Úvod	10
1 Trolejbus – moderní dopravní prostředek s historií.....	11
1.1 Vznik trolejbusu	11
1.2 Rozvoj plzeňských linek	11
1.3 Generace trolejbusů	13
1.3.1 Odporová	13
1.3.2 Tyristorová.....	13
1.3.3 Tranzistorová	14
1.3.4 Trolejbusové doplňky	14
1.4 Možnosti nezávislosti trolejbusů.....	15
1.4.1 Dieselgenerátory	15
1.4.2 Akumulátory	15
1.4.3 Superkondenzátory	15
1.4.4 Přínosy	16
1.5 Bez čeho se trolejbusy neobejdou.....	16
1.5.1 Měnírna	16
1.5.2 Trolejové vedení	18
1.5.3 Sběrače.....	18
1.5.4 Výhybky.....	19
2 Energetická bilance.....	20
2.1 Trolejbusová linka č. 11	20
2.2 Škoda 21 Tr.....	22
2.3 Škoda 21 Tr ACI, ev. č. 490.....	23
2.3.1 Trakční měnič	24
2.3.2 Trakční motor	24
2.3.3 Pomocný diesel agregát a alternátor Kirsch	24
2.4 Měřicí vybavení	25
2.4.1 Jednotka TM12	25
2.4.2 Vyhodnocovací program TACHOGRAF	25
2.5 Nákupní cena elektrické energie	26
2.6 Výpočet spotřeby elektrické energie.....	26
2.6.1 Výběr úseku, předpoklady	26
2.6.2 Analýza částí úseku	27
2.6.3 Jízdní odpory.....	28
2.6.4 Spotřeba energie	30
2.7 Naměřená spotřeba elektrické energie.....	33
2.7.1 Spotřeba na celé trase linky č. 11	33
2.7.2 Spotřeba na rovinaté části linky č. 11	35

2.7.3	Spotřeba při provozu ve stoupání a klesání	35
2.7.4	Spotřeba v počítaném úseku	37
3	Napájecí soustava pro vozy MHD	38
3.1	<i>Parametry vedení</i>	38
3.2	<i>Výstavba trolejového vedení</i>	39
3.3	<i>Teplotní roztažnost vedení</i>	42
3.4	<i>Negativní jevy na vedení</i>	43
3.5	<i>Možná řešení poklesu napětí</i>	45
3.5.1	Položení dalšího přívodního kabelu.....	45
3.5.2	Výstavba Energetické posilovací stanice.....	46
3.5.3	Výstavba nové měřírny	47
	Závěr	48
	Použitá literatura	50
	Seznam příloh.....	53
	Přílohy.....	I

Úvod

Hospodářský rozvoj světa se výrazně zrychlil v době, kdy se lidstvo naučilo využívat koncentrované formy energie. Energii v různých skupenstvích nalézáme v přírodě. Bohužel její kapacita však jistě není neomezená. Tak proč s jejím darem nezačít zacházet efektivněji?

Rostoucí trend počtu obyvatel a zrychlený životní styl neustále zvyšují nároky kladené na přepravu obyvatel. Mnohé rodiny se z center měst stěhují na jejich periferie, kde vznikají nové obytné zóny, čímž města posouvají své hranice. Ze strany obyvatel dochází k nárůstu poptávky po spojení s centrem ať už z důvodu dojíždění do zaměstnání nebo za zábavou. Individuální automobilová doprava (IAD) je velmi výrazným konkurentem zavedeným veřejným dopravním prostředkům. O komfortu takovéto přepravy není jistě třeba polemizovat. V otázce dopadu na životní prostředí IAD se svými konkurenty prohrává. Z pohledu dotváření kulisy v městských ulicích jsou na tom prostředky veřejné dopravy mnohem lépe než automobily. Dopravní prostředky využívající k pohonu elektrickou energii jsou pro své výhody populární nejen v městské dopravě. Tramvaj je velmi kapacitní a na vyhrazeném jízdním pásu také výrazně rychlejší než ostatní dopravní prostředky, pokud nebereme v úvahu podzemní nebo nadzemní dráhy. Je vhodná především v hustě osídlených oblastech s velkou poptávkou po dopravě. Úspornějším, tišším, dynamičtější i obratnějším dopravním prostředkem je trolejbus. Proč by tedy on nemohl v budoucnu řešit dopravní obslužnost do míst, kam je zavedení tramvajové dopravy nerentabilní?

1 Trolejbus – moderní dopravní prostředek s historií

Trolejbus je elektrické vozidlo pohybující se po silnicích. Je závislé na stejnosměrném napájení realizovaném dvoupólovým trolejovým vedením. Vzhledově i konstrukčně je velmi podobný autobusu. Pohybuje se po pneumatikách, přičemž ty na první nápravě jsou říditelné volantem, vozová skříň je odpružena. Hlavní rozdíl spočívá v rozdílném principu pohonu, tj. elektrickým trakčním motorem. [1, str. 39]

1.1 Vznik trolejbusu

Byl to Werner von Siemens, kterému se podařilo sestrojít a veřejnosti představit první elektricky poháněné silniční vozidlo, dříve spíše kočár, napájené ze vzdušné sítě. Tehdy se psal rok 1882. Provoz na trati neměl dlouhého trvání, přestože se koncepce osvědčila. Nevyřešenou otázkou byl především způsob přenosu elektrické energie, neboť vlečný vozík, spojený s vozidlem kabelem, nebyl nejvhodnějším řešením, už třeba z důvodu křížování. [2], [3]

Následný vývoj přinesl výsledky v podobě otevření veřejné trolejbusové trati v Paříži na začátku 20. století. Na území dnešní České republiky se trolejbusy prvně rozjely 1907 v Českých Velenicích. Propracovanější systém sběračů a zvýšený komfort cestování se postaraly o popularizaci trolejbusů. Nezávislost na importované ropě byla výrazným podnětem pro rozvoj trolejbusové dopravy především v období druhé světové války. [2]

Celkově se trolejbusy na území České republiky rozjely v 17 městech. Bohužel ne všechna města si tuto výsadu dokázala udržet a ve 4 z nich provoz dříve či později skončil. Trolejbusový provoz lze nalézt v Brně, Českých Budějovicích, Hradci Králové, Chomutově, Jihlavě, Mariánských Lázních, Opavě, Ostravě, Pardubicích, Plzni, Teplicích, Ústí nad Labem a Zlíně. V Plzni se trolejbusy prvně rozjely v roce 1941. [4]

1.2 Rozvoj plzeňských linek

Z počátku cestujícím sloužila pouze linka „A“ na trase od Městských lázní na Doubravku. Provoz na ní byl zahájen 9. dubna 1941. Brzy poté se přidala linka „H“ směřující k Ústřednímu hřbitovu na Rokycanské třídě. Délka tratí dosahovala 7 km. Pro napájení trolejbusů byla vystavěna měnárna Pietas. Dobré zkušenosti s trolejbusy a špatný stav tramvajových vozů a tratí po světové válce byly impulzem k rozšíření dosavadní trolejbusové infrastruktury. Nově vystavěné linky zlepšily dostupnost do okrajových částí města a velkých průmyslových podniků. V roce 1948 se dopravní obsluhy dočkaly městské části Skvrňany a Božkov, přičemž následující rok se přidaly Doudlevec a Bolevec. Došlo také k změně

označení linek z písmen na číslice, které slouží dodnes. Roku 1950 vznikla trať z Doudlevec na Košutku, čímž se dokončila páteřní trolejbusová síť, protínající se dodnes u Mrakodrapu. [2], [5], [6]

V 50. letech pokračoval rozmach trolejbusů po celém světě, přičemž dopravního spojení se dočkaly i další plzeňské části. Do Černic se trolejbus prvně rozjel 1953. Zátíší a Nová Hospoda následovaly o 2 roky později. Kvůli nutnosti zvýšit dopravní kapacitu pro rozrůstající se Slovany musela trolejbusová linka 12 ustoupit tramvajím a dodnes na cestě do Božkova obsluhuje Petrohrad. Na konci 50. let bylo v provozu 5 linek, které dosahovaly 35 km. Dopravní podnik vlastnil téměř 100 vozů, které ročně přepravily na 27 mil. cestujících, což představovalo téměř polovinu celkového počtu přepravených osob. Výhradním dodavatelem byl průmyslový podnik Škoda v Plzni. [2], [5], [7]

Následujících patnáct let docházelo k modernizaci vozového parku. V roce 1975 byla postavena a zprovozněna nová linka 15, obsluhující městskou čtvrť Lobzy. Kvůli výstavbě panelových sídlišť v 70. letech bylo nezbytné zvýšit přepravní kapacitu do čtvrtí Bolevec a Košutka. Požadavek byl vyřešen, stejně jako dříve, zavedením tramvajové dopravy. K přeložení několika tratí vedlo i zrušení konečné Městské lázně, přičemž těmito místy dnes vede důležitý silniční průtah. [2], [5]

Pro zvýšení přepravní kapacity se používalo obdobné řešení jako u autobusů. Proto mezi lety 1949 a 1973 byly v ulicích k vidění trolejbusy s vlečnými vozy. Tento problém byl následně vyřešen používáním kloubových trolejbusů, které se do služeb prvně dostaly roku 1984. Masivnějšího nasazení se dočkaly až v roce 1993. Kloubové vozy byly ideální k náhradě autobusů na nejvytíženější lince z Bor na Doubravku, proto počátkem roku 1988 začala cestujícím sloužit linka 16, na kterou se kloubové vozy, dodnes, nasazují nejčastěji. [2], [8]

Osazení trolejbusů pomocným dieselagregátem umožnilo v novém tisíciletí nasazení trolejbusů na úsecích bez trolejového vedení. Došlo k prodloužení linky č. 12 z Božkova do Letkova a linky č. 13 z Černic k nákupnímu centru Olympia Plzeň. V srpnu 2010 byla prozatím dokončena nejnovější trať spojující obchodní a průmyslovou zónu Borská pole s centrem města. Z důvodu velkého náporu cestujících, především v době ranní a odpolední špičky, je i tato trať osazována moderními kloubovými vozy. [2], [7]

Po 70 letech rozvoje trolejbusové dopravy je možno spatřit v ulicích Plzně na 9 linkách v odpolední špičce až 68 trolejbusů. Délka linek je 81 km, přičemž za celý rok plzeňské trolejbusy urazí více než 4 mil. kilometrů. [2], [7]

1.3 Generace trolejbusů

1.3.1 Odporová

Jedná se o nejstarší regulaci, která se pro svou jednoduchost a univerzálnost v některých východních státech dodnes používá. Ve 30. letech 20. století vznikl systém řízení trolejbusů pomocí nožních pedálů – pedál jízdy a mechanické brzdy. U některých typů se vyskytoval i třetí pedál, který ovládal elektrickou brzdou. V dnešních typech trolejbusů je brzdový pedál jen jeden, který v sobě spojuje funkci obou brzd. Řidič s ohledem na minimalizaci opotřebení styčných ploch pneumatických brzd převážně používá dynamickou brzdou. Vhodný motor pro tuto regulaci je sériový stejnosměrný motor, který díky svému zapojení vykazuje měkkou momentovou charakteristiku a lze dobře řídit napětím. Princip regulace spočívá v přeměně přebytečné elektrické energie na teplo v soustavě odporníků. Poměr zmařené a využití energie řídil kontrolér, který byl ovládán pedály. Kontrolér byl předchůdce dnešních řídicích jednotek, pracoval však na elektromechanickém principu. Vhodným spínáním a rozpínáním stykačů se ovládal výsledný proud motorem a tudíž i jeho výkon. U dlouhotrvajících a statických procesů by množství zmařené energie při rozběhu a zastavování nehrálo významnou roli, jenže u neustále zrychlujícího a zpomalujícího dopravního prostředku docházelo ke ztrátě velkého množství energie. Proto byl žádoucí rychlý rozjezd a následný pohyb setrvačnou silou. V opačném případě by jízda byla neúsporná a docházelo by k přehřívání jízdních odporů. Při jízdě malou rychlostí by docházelo ke stejnému jevu, proto řidič musel pedál jízdy střídavě sešlapovat a pouštět. Pro snížení důsledků ztrát bylo možno využít odpadní teplo pro vyhřívání interiéru. Se skokovým přepínáním odporů souvisí i skokové řízení, které se projevovalo cukáním a dynamickými rázy. S trochou cviku a snahy ze strany řidiče šlo cukání omezit, nikoli však odstranit. Z uvedených negativ by mohlo vyplynout, že byl kladen důraz na změnu regulace především z řad dopravních podniků. Z počátku tomu tak nebylo především z hlediska jednoduchosti regulace a případných oprav. Nebylo třeba speciálního vybavení dílny ani znalostí ze strany personálu, proto se odporovou regulací osazovaly trolejbusy až do konce 70. let. [2], [9, str. 78-79], [10], [11]

1.3.2 Tyristorová

S rostoucím počtem obyvatel ve městech se zvyšovala i poptávka po moderních a účinnějších trolejbusech. Přes mnohá vylepšení byla důležitá především změna principu regulace výkonu trakčních motorů. Dochází k výměně soustavy odporníků za tyristorové pulzní měniče. I nadále řidič ovládá jízdu pedály, přičemž následuje elektronický regulátor. Tento blok řídí vhodné spínání tyristorů vysláním proudových impulzů a následné

generování napěťových impulzů pohánějících motor. Výsledkem regulace již není přímá změna střední hodnoty napájecího napětí elektromotoru, nýbrž k tomu dochází změnou střídy pulzů. [2], [12]

Spínaný tyristor při své činnosti prakticky používá jen stav propustný a blokovací. To v důsledku znamená výrazné omezení ztrát při regulaci, ke kterým dochází především po dobu přechodu pracovního bodu tyristoru mezi dvěma mezními stavy. Tato doba je však dostatečně malá, a tak výsledný zmařený výkon ani zdaleka nedosahuje hodnot u odporové regulace. Výše úspor závisí na nasazení dopravního prostředku, přičemž příznivějších hodnot dosahuje v dynamickém nasazení. Výraznou výhodu vidím v plynulé regulaci, jež jízdu zbavuje jakýchkoli rázů. Jako drobnou nevýhodu bych označil zvukový doprovod vydávaný pulzními měniči. [10]

1.3.3 Tranzistorová

Stále probíhající vývoj trolejbusů má za cíl zvyšovat komfort cestování, bezpečnost, usnadňovat práci řidiči a zavádět další možnosti moderní přepravy. Velkou obměnou prochází především celková elektrická výzbroj trolejbusů. Nadále už není používán stejnosměrný motor, ale asynchronní, který je kromě výměny ložisek bezúdržbový. [13] O regulaci se stará mikroprocesorem řízený napěťový střídač se změnou napětí. Akčními členy regulace jsou vysoce účinné výkonové tranzistory typu IGBT. [2]

Výborná regulovatelnost pozitivně ovlivňuje plynulost provozu. Ve srovnání s tyristory dosahují vyšší spolehlivosti, lepší říditelnosti a v neposlední řadě i nižší hladiny akustického projevu. Vzhledem ke schopnostem řídicí jednotky je možné energii vyrobenou při brzdění posílat do napájecí sítě a tím zlepšovat energetickou bilanci provozu. [2], [10]

1.3.4 Trolejbusové doplňky

Pro zvýšení komfortu řidiče a nepřímo i aktivní bezpečnosti se stala standardem klimatizace kabiny řidiče. Klimatizování celého trolejbusu zvyšuje pořizovací cenu a je energeticky náročné, a tak se montuje jen na přání zákazníka. Na druhou stranu bych za velký přínos označil kompletní nízkopodlažní provedení, které usnadňuje nástup a výstup do vozidla např. zdravotně postiženým lidem se sníženou pohyblivostí. Výbornou službou, která aspoň podvědomě zkracuje dobu přepravy, je zavedení bezdrátového připojení k internetu na palubě trolejbusu. S expanzí chytrých mobilních telefonů a dalších podobných zařízení, bude tato služba oslovovat stále více cestujících. Bojím se jen toho, že problém může nastat u pasažérů, kteří upřednostní tuto službu nad bezpečnou jízdou, a to hlavně při náhlém brzděném nebo vyhýbacím manévru. [2], [14]

1.4 Možnosti nezávislosti trolejbusů

Na prahu nového tisíciletí začal rapidně vzrůstat počet trolejbusů schopných provozu bez přímého napájení z trolejového vedení. Záloha elektrické energie se zatím provádí dvěma způsoby, ale třetí je otázkou blízké budoucnosti. [2]

1.4.1 Dieselgenerátory

Prozatím nejpoužívanějším je osazení trolejbusové karoserie dieselovým agregátem, jenž pohání synchronní generátor s permanentními magnety, u vozů 21 Tr asynchronní. [15] Generátor vyrábí potřebnou trakční energii, která je přímo využívána k jízdě. Toto řešení není pro konstruktéry žádným velkým oříškem, neboť v zájmu snížení návrhových i výrobních nákladů se karoserie trolejbusů výrazně shodují s autobusovými. Výhodou je relativně velký akční rádius při provozu na dieselagregát, dále také již léty prověřený, spolehlivý a téměř nezávislý princip výroby elektrické energie. Nevýhodou je zvýšení servisních nákladů a nárůst hluku při mimotrolejovém provozu. Některé vozy se osazují slabšími dieselgenerátory, které ve výsledku negativně ovlivňují rychlost a zrychlení vozu, ale hlavně jeho stoupavost. Např. na velmi strmý úsek silnice z Plzně-Božkov do Letkova není vhodné nasazovat vozy typu 21 Tr. Právě pro nízký výkon dieselagregátu nejsou schopny stoupání překonat především s využitím plné přepravní kapacity. Je tedy nutné na tento úsek nasazovat silnější vozy typu 24 Tr a novější. [10], [16]

1.4.2 Akumulátory

Osazení trolejbusu sadou akumulátorových baterií je druhou možností. Oproti prvnímu způsobu se jedná o tiché a čisté řešení. Jízdní výkony vozu jsou většinou negativně ovlivněny v porovnání s trolejovým provozem. Akumulátory nejsou schopny dodávat velký trvalý výkon. Nízká teplota okolí a stáří snižují kapacitu baterie. Nabíjecí doba se s ohledem na předpokládané dlouhodobé připojení k síti nejeví jako velký problém. Ohledně dojezdu je to však jiné. Nezbytný kompromis mezi pořizovací cenou, hmotností a prostorovými nároky je kompenzován krátkým dojezdem. Ve většině aplikací to nevádí, jelikož prodloužení trasy málokdy přesahuje jednotky kilometrů, přesto to může limitovat v možném nasazení trolejbusů. Nezbyvá, než věřit výrobcům akumulátorů, že budeme svědky rostoucí hustoty energie a výkonu akumulátorů, přičemž jejich cena bude sledovat opačný trend. [10], [17, str. 34]

1.4.3 Superkondenzátory

Zařízení podobné konstrukcí kondenzátorům, schopné při rekuperačním brzdění pojmout v krátkém časovém okamžiku velké množství energie je nejnovější technologie, kterou jsou

osazovány nejen trolejbusy. Jedná se o superkapacitory. Přijatou energii následně spotřebuje elektromotor při rozjezdu. Dochází k redukci odebrané energie ze sítě, čímž se snižuje spotřeba, tedy náklady na provoz dopravního prostředku. Také v tomto případě brání masovému nasazení cena a dále hustota energie, která je řádově nižší než u konvenčních akumulátorů. Na druhou stranu dosahovaná hustota výkonu je velká, což se odráží v krátké době trvání nabíjecích a vybíjecích cyklů. [10], [18]

1.4.4 Přínosy

Příčin osazení trolejbusů některou z výše uvedených technologií mohlo být v počátcích několikero. Možná někdo může mít názor, že elektřina je „po ruce“ 365 dní. Ve skutečnosti může kdykoli dojít k výpadku a v tu chvíli vyvstává otázka, co s plným trolejbusem v křižovatce. Za vozidlem se tvoří dopravní zácpa a čekací doba na odtah je nekonečně dlouhá. Spoj nabírá zpoždění. Naštvaní cestující v duchu snižují draze budované hodnocení dopravního podniku. Jak jsem nastínil výše, existuje řešení. Řidič nahodí klasický spalovací motor a křižovatku opustí během chvilky a pokračuje v jízdě. Stejný průběh nastane u rozsáhlých nehod. Řidič se situaci vyhne a pokračuje v jízdě. Snad už jen drobností je zjednodušená manipulace trolejbusu mimo troleje.

Další vhodnou aplikací je prodloužení stávajících linek. Dochází k němu u několika spojů za den a to v relativně malé vzdálenosti. I pro krátké prodloužení trolejového vedení je mnohdy nezbytné vybudování nové měnírny. Investiční náklady rapidně vzrostou, a tak je nasazení „vylepšených trolejbusů“ levnějším řešením. Z krátkodobého hlediska určitě. [19]

1.5 Bez čeho se trolejbusy neobejdou

1.5.1 Měnírna

Trolejbus pohání elektrická energie, ne však libovolná, nýbrž 600 V stejnosměrných. Trolejbusové provozy budované od přelomu 80. a 90. let minulého století se budují s nominálním napětím 750 V. Tomu jsou přizpůsobeny i elektrické části pohonu. Plzeňské měnírny pro městskou dopravu jsou připojeny k třífázové síti 22 kV/ 50 Hz. Vstupní napětí a proud podléhají měření a je možno měnírnu kdykoli odpojit vypínačem od primární sítě. Následuje transformace napětí a jeho usměrnění křemíkovými diodami. Transformátorů je obsaženo několik. Usměrňovač je 12-ti pulzní. Z napěťové sběrnice 660 V je elektrický proud veden přes rychlovypínače do napájecích kabelů pro jednotlivé úseky. Měnírny jsou strategicky rozmístěny po celé napájecí trati. Mohou to být zděné budovy, nebo tzv. buňky, či jejich sestavy. Jedná se o systémové řešení, v němž se slučují všechny potřebné technologické a stavební charakteristiky v minimálním prostoru. [20] Buňka se na místo instaluje v téměř

kompletním stavu. Její instalace, v porovnání s budováním nové stavby, zabere minimum času. Unifikace a hromadná výroba zajistila snížení pořizovacích nákladů, což usnadňuje nákup nových měřiren, potřebných nejen při rozšiřování tratí. [9, str. 44], [10], [19], [21], [22]

Napájecí síť Plzeňských dopravních podniků se nově skládá z 8 měřiren. Karlovska měřirna je nejnovější, přičemž vybudována byla v roce 2010. Bylo to nezbytné řešení, které umožnilo rozšíření trolejbusové dopravy na Borská pole. Plzeňské měřirny používají suché transformátory. Použití vícero transformátorů v jedné měřirně umožňuje zálohování v případě poruchy jiného. Celá síť je navržena s ohledem na možnost výpadku jedné měřirny, neboť její výkon lze kompenzovat ostatními. Dříve měli jednotlivé měřirny svou přímou obsluhu. Dnes ji plně nahrazuje centrální elektrodispečink na Denisově nábřeží, který vše ovládá dálkově a integruje do uživatelské podoby. Tím dochází ke zrychlení reakce na problémy v síti a snížení mzdových nákladů. V budově dispečinku se nachází i hlavní plzeňská měřirna Hydro, která je i největší měřirnou v České republice. [23] Měřirny Bolevec a Lochotín slouží pouze pro tramvajovou dopravu linek 1 a 4. Možná, že se v budoucnosti uplatní i pro napájení trolejbusových tratí, neboť se zvažuje jejich navrácení na Severní předměstí města. [2], [19], [22]

Tab. 1.1 Měřirny PMDP [22]

měřirna	počet transformátorů [ks]	výkon 1 transformátoru [kVA]	celkový výkon měřirny [kVA]
Hydro	4	4500	18000
Slovany	3	1660	4980
Zátiší	3	1650	4950
Lochotín	3	1650	4950
Bolevec	3	1100	3300
Letná	2	1650	3300
Bory	2	1650	3300
Karlovy	2	1100	2200
celkový výkon všech měřiren [kVA]			44980

Pokud není na napájecím vedení dané měřirny jiný vůz, požadující v daném momentu energii na jízdu, je nutné rekuperovanou energii zmařit v odporcích. To je zbytečná ztráta, a tak pro vylepšení energetické bilance měřirny umožňují přelévání rekuperované energie i do jiných úseků. Tyristorové měřirny toto neumožňují. Nově lze měřirny vybavit

superkapacitory. Ty energii naakumulují a v případě potřeby se energie bere přednostně z nich. [2], [19]

1.5.2 Trolejové vedení

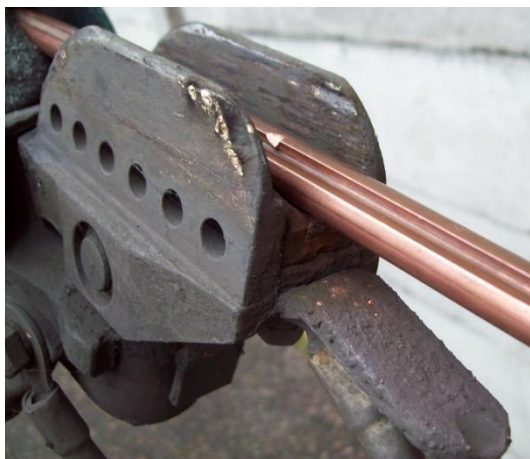
Vhodně upravená elektrická energie je posílána soustavou podzemních kabelů k napájecím bodům. Jsou to místa, kde podzemní kabel vystupuje nad povrch a přes odpojovač je spojen s trolejovým vedením. To je rozděleno na úseky a vzájemně odděleno úsekovými děliči. Úseky mají vhodně zvolenou délku, aby v případě potřeby bylo možné je vypínat nezávisle na zbytku sítě. Je to výhodné především v době oprav, poruch, případně výstavby nových napájecích úseků. Úsekový dělič je část izolovaného vedení bez napětí a v okamžiku průjezdu přes něj je nutné pohybovat se setrvačnou silou. V opačném případě by docházelo ke vzniku elektrického oblouku, který by opaloval děliče i samotný sběrač. Pozorným cestujícím by nemuselo ujít cukání celého vozu. [1], [24]

Drážní vozidla jsou k elektrické síti připojena většinou přes jednu trolej a druhý pól zajišťuje kolej. Trolejbus se nepohybuje po kolejích, a tak jeho elektrický rozvod musí obsahovat troleje dvě s normovanou roztečí 600 mm. Pro dobré elektrické i mechanické vlastnosti se trolejový drát vyrábí z mědi, přičemž musí být daného tvaru, aby jej bylo možné pevně přichytit svorkami. Používané průřezy trolejového drátu jsou 80 až 150 mm². Plzeňské trolejbusové vedení je založeno na 100 mm², přičemž jsou lokality, kde jsou z hlediska snížení elektrického odporu, nebo zvýšení mechanické pevnosti použity průřezy 120 a 150 mm². Jako převěs slouží ocelové nebo umělohmotné lano, které je nataženo přes šířku ulice mezi sloupy, případně zdmi domů. Druhou možností je připevnění k izolované ocelové, nebo laminátové tyči zvané výložník. Ten se v drtivé většině upevňuje na sloup. Troleje jsou vedeny ve výšce 5 m nad zemí. [1], [2], [10], [24]

1.5.3 Sběrače

Pro tramvaj pohybující se po pevně dané trati je vhodnější pantograf. Trolejbusy by ho však musely mít hodně široký, aby jim umožnil volný pohyb. Proto se vývoj u trolejbusů odebíral jiným směrem. V počátcích se elektřina do trolejbusu dostávala kabelem z vozíku taženého po trolejích. Vzdušné výhybky musely být náročné konstrukce, přesto vozík často vykolejoval. Až později byl vynalezen tyčový sběrač, který byl pružinovým mechanismem přitlačován k napájecímu drátu. Tento princip je spolehlivě využíván do dnešní doby. Trolejbus k provozu potřebuje sběrače dva. Dříve se jednalo o ocelové trubky, dnes se využívá lehčího laminátu. Tyče mají délku 6,5 m a jsou duté, aby jimi mohl být veden kabel přivádějící elektrický proud do trakčního měniče. Sběrače jsou připevněny ke střeše, ale

otáčením podél vodorovné osy se přizpůsobují výšce vedení. Pro zajištění do zastávkového zářezu, objezdu překážky je nezbytné, aby se sběrače otáčely také podle svislé osy, přičemž dovolují trolejbusu při jízdě vychýlení 4 m od osy trolejového vedení. Na tenčím konci sběrače jsou umístěny tzv. „botky“ viz. obr. 1.1 a 1.2, což jsou mosazné vaničky, objímající trolejový drát. Minimalizují případ vyskočení sběrače z trolejového vedení. Vanička je osazena smykadlem, nejčastěji z uhlíku. Měkká uhlíková vložka zajišťuje elektrický kontakt s vedením a zároveň snižuje jeho odírání. V případě vyskočení sběrače z troleje a jeho prudkého vymrštění vzhůru by mohlo dojít k poškození trolejového vedení. Proto je konec sběrače opatřen pružinovým stahovákem. [1, str. 223-225]



Obr. 1.2 Botka sběrače s vloženým trolejovým drátem



Obr. 1.1 Botka sběrače s viditelnou drážkou od trolejového drátu

1.5.4 Výhybky

Nedílnou součástí rozsáhlých trolejbusových tratí jsou vzdušné výhybky. Bez nich by nebylo možné provozovat více trolejbusových linek. Nejnovější modely jsou řízeny rádiovým signálem. Ten ovládá servomotor nebo elektromagnet, který přestavuje výhybku. Již není třeba tolik zpomalovat, aby sběrač ve výhybce nevypadl. Průjezdové rychlosti přes trolejové křižení, sjezdové výhybky a výhybky jsou podrobně popsány v dopravně-provozním řádu. [2], [10]

2 Energetická bilance

2.1 Trolejbusová linka č. 11

Pro provedení energetické bilance jsem si z 9 plzeňských trolejbusových linek vybral linku č. 11, do roku 1948 označovanou písmenem H. „Jedenáctka“ spojuje Centrální autobusové nádraží (CAN) s Hlavním nádražím ČD a dále pokračuje, míjeje 3 obchodní domy a plzeňské pivovary, po Rokycanské třídě k Ústřednímu hřbitovu. Na poslední zastávce vystupují i cestující, kteří míří do dalšího přilehlého obchodního centra. [2]

Trasa má celkovou délku, neboli součet v obou směrech, 11,95 km. Přičemž směr od CAN k Ústřednímu hřbitovu měří 6,15 km, zatímco druhý 5,95 km. Je to dáno především rozdílným řešením křižovatky ulic Šumavská a Lobežská pro jednotlivé směry. Svou délkou je po lince č. 18 a č. 14 třetí nejkratší. Zastávky s příslušnou nadmořskou výškou obsluhované linkou č. 11 jsou uvedeny v tabulce 2.1. Výškový profil tratě je na obrázku 2.2. Nejstrmějšímu stoupání čelí trolejbusy mezi zastávkami Pietas a Hřbitovní viz. obr. 2.1. Míru naklonění silnice vyjadřuje sklon vyjadřovaný ve stupních, viz rovnice 2.1, případně stoupání v procentech dle rovnice 2.2. Číslo v procentech vyjadřuje počet nastoupaných (př. naklesaných) výškových metrů na 100 m ujeté dráhy. [25]

Tab. 2.1 Zastávky trolejbusové linky č. 11

zastávka [26]	nadmořská výška [m. n. m.] [27]
CAN, Husova	315
CAN, Tylova	320
Tylova	327
U Práce, Americká	325
Mrakodrap	319
Hl. nádr. ČD, Americká	311
Šumavská	319
Gambrinus	320
Stav. stroje, Rokycanská	307
Letná	327
Pietas	341
Hřbitovní	381
Ústřední hřbitov II.	387

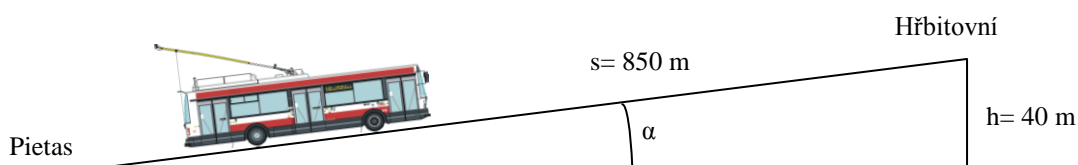
Vzdálenost mezi zastávkami Pietas – Hřbitovní: $s = 850$ m

Výškový rozdíl zastávek: $h = 40$ m

Sklon, stoupání silnice: α [°][%]

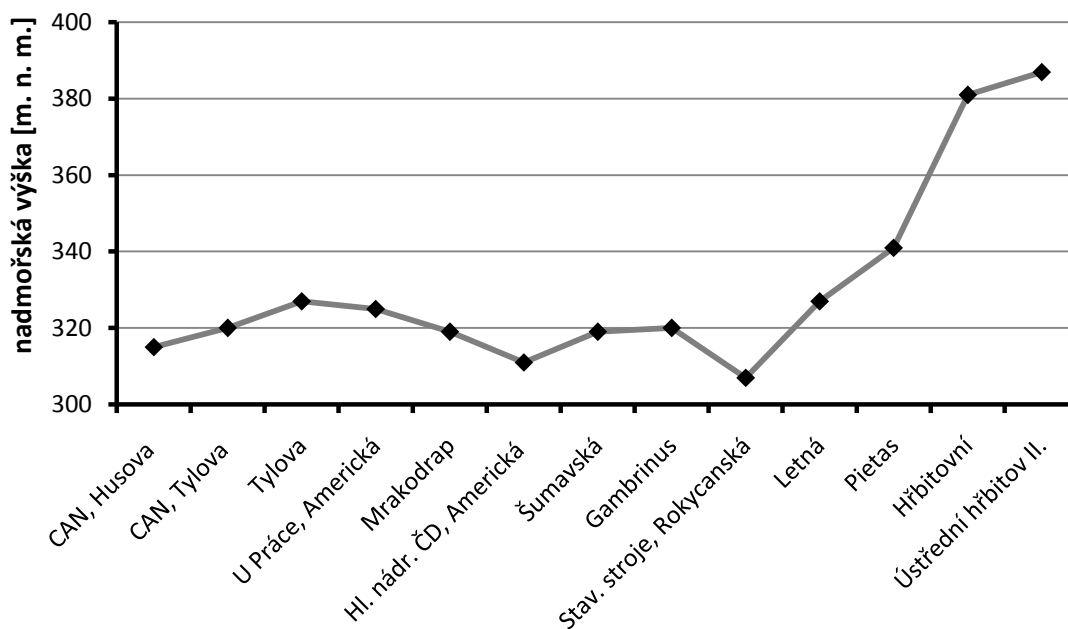
$$\sin \alpha = \frac{h}{s} \rightarrow \alpha = \sin^{-1} \frac{h}{s} = \sin^{-1} \frac{40}{850} = 2,697^\circ = 2^\circ 42' \quad (2.1)$$

$$\alpha[\%] = 100 \cdot \tan \alpha [^\circ] = 100 \cdot \tan 2,697^\circ = 4,71 \% \quad (2.2)$$



Obr. 2.1 Náskres stoupání mezi zastávkami (Obrázek 21 Tr převzat z: <http://www.trolejbus.cz/brno-21tr.htm> [15.4.2012])

Výškový profil tratě trolejbusové linky č. 11



Obr. 2.2 Výškový profil tratě trolejbusové linky č. 11

2.2 Škoda 21 Tr

Škoda 21 Tr, viz. obr. 2.3 a 2.4, je dvounápravový nízkopodlažní trolejbus. Vůz je poháněn elektrickým trakčním motorem, přičemž výkon je přenášen na zadní nápravu. Osazený motor a měnič jsou schopny při elektrodynamickém brzdění vyrábět elektrickou energii a případně ji i vrátet zpět do sítě. Pravá strana karoserie je osazena trojicí dvoukřídlých prosklených dveří, které jsou otvírané na poptávku ze strany cestujících. Pro nástup a výstup zadními dveřmi je nezbytné překonat mimo jiné i schod vysoký 200 mm. Zbýlá dvojice dveří usnadňuje nástup a výstup osobám se sníženou pohyblivostí vzhledem k nástupní výšce 345 mm nad vozovkou. Pneumatické pérování umožňuje další snížení nástupní výšky vozu. Stane se tak po vypuštění tlakového vzduchu na pravé straně hnací nápravy (kneeling). Nástupní výška se dostává na 275 mm nad vozovkou. 21 Tr má přepravní kapacitu 26 míst k sezení a cca 60 k stání. Tento typ trolejbusu nebyl z výroby, ani na přání zákazníka, osazován klimatizací kabiny řidiče. Existuje několik typů, které se liší osazeným motorem, případně zda obsahují diesel generátor. [28]

Všeobecné parametry: [28]

- Délka přes nárazníky 11 760 mm
- Šířka 2 500 mm
- Výška 3 365 mm
- Nejvyšší provozní rychlost 65 km/hod



Obr. 2.4 21 Tr ev. č. 490 odbočuje na obratiště (převzato se svolením autora z [29])



Obr. 2.3 21 Tr ev. č. 490 stojí v obratišti (převzato se svolením autora z [29])

2.3 Škoda 21 Tr ACI, ev. č. 490

Plzeňský trolejbus 21 Tr ACI ev. č. 490, viz. obr 2.5, byl vyroben v roce 2002 a nasazen do provozu 19. prosince téhož roku. Písmena „AC“ značí osazení trolejbusu procesorově řízeným asynchronním trakčním pohonem. Elektrická výzbroj trolejbusu je dimenzována na trolejové napětí 600 i 750 V DC. Většina je umístěna ve střešní nástavbě v zadní části střechy. Dále je na střeše umístěn brzdový odporník se jmenovitým výkonem 140 kW a pomocný rám pro přichycení páru sběračů. Vůz je z výroby osazen pomocným diesel generátorem pro výrobu elektrické energie umožňující pohon vozu mimo trolejové vedení. To značí v názvu písmeno „I“. V roce 2008 vůz prodělal tzv. Velkou prohlídku, při níž byl osazen automatickými stahováký sběračů. Na podzim 2011 dostal vůz moderní LED světla pro denní svícení. Bylo tomu tak jednak z důvodu úspory elektrické energie, neboť vůz musí být osvětlen i v průběhu dne, ale i servisních nákladů. Dříve se totiž často stávalo, že vozu během služby prasklo vlákno žárovky a z bezpečnostních důvodů bylo žádoucí provést okamžitou opravu. Na zavolání ji prováděla havarijní služba dopravních podniků a tím docházelo k nárůstu servisních nákladů. Na obr. 2.6 je 21 Tr při provozu na diesel agregát se staženými sběrači. [10], [15], [28], [30]

Stav najetých km k 23.5.2012 [15]:

379 456 km



Obr. 2.6 21 Tr ev. č. 490 při dieselovém provozu (převzato se svolením autora z [29])



Obr. 2.5 21 Tr ev. č. 490 v zastávkovém zálivu Gambrinus (převzato se svolením autora z [29])

2.3.1 Trakční měnič

Processorově řízený trakční měnič je složen z třífázového napěťového střídače. Jako výkonový prvek je použita trojice výkonových IGBT modulů. Napájení použitého motoru je prováděno změnou velikosti a frekvence napětí. Dále obsahuje pulzní měnič pro odporové brzdění a rekuperační spínač. [28]

- Jmenovité vstupní napětí 750 V DC
- Jmenovitý vstupní proud 490 A
- Hmotnost 249 kg
- Jmenovitý výkon střídače 360 kVA

2.3.2 Trakční motor

Pohon vozu je zajištěn třífázovým čtyřpólovým asynchronním motorem s kotvou nakrátko. Neoddělitelnou součástí motoru je redukční převodovka s trvalým převodovým stupněm 1:1,85. [28]

- Jmenovitý výkon 156,5 kW
- Max. napětí při jm. výkonu 3 x 420 V AC
- Jmenovitý proud 275 A
- Jmenovité otáčky 802 min⁻¹
- Hmotnost vč. převodovky 750 kg

2.3.3 Pomocný diesel agregát a alternátor Kirsch

Trolejbus je vybaven vznětovým spalovacím motorem umístěným za prostorem pro cestující v zadní části skříně. Jedná se o řadový přeplňovaný vzduchem chlazený čtyřválec. Je spojen s asynchronním třífázovým alternátorem. Jalovou energii dodává trojice kondenzátorů o kapacitě 150 μF. Vyrobena střídavá energie je přes třífázový diodový můstek přiváděna do stejnosměrného meziobvodu trakčního měniče. [28]

- Objem motoru 2732 cm³
- Jm. výkon spal. mot./ ot. 55,5 kW / 2800 min⁻¹
- Jm./ max. výkon alternátoru 45 / 50 kW
- Celková hmotnost bloku 540 kg

2.4 Měřicí vybavení

2.4.1 Jednotka TM12

Plzeňské trolejbusy jsou osazeny tachografem přímo z výroby. Jeho informace jsou nápomocny např. při vyšetřování nehod. Rovněž jsou schopny měřit spotřebu elektrické energie. Přesto se dopravní podnik rozhodl zakoupit zařízení od nezávislého výrobce, které by suplovalo funkci tachografu a měřiče spotřeby v jednom. Volba padla na společnost C.T.M. Praha, s.r.o. a její paměťovou a komunikační jednotku TM12, viz. obr. 2.7. Přístroj zaznamenává okamžitou rychlost vozu, 32 dvoustavových a 8 analogových signálů skrz vozidlové sběrnice CAN a IBIS. Záznam se ukládá do vnitřní paměti a lze následně zkopírovat na USB flash disk. [15], [31]



Obr. 2.7 Jednotka TM12
Obrázek převzat z [31]

2.4.2 Vyhodnocovací program TACHOGRAF

Analýza zaznamenaných dat probíhá skrz příjemné uživatelské rozhraní vyhodnocovacího programu Tachograf viz. obr. 2.8, jehož autorem je Ing. Václav Kuřík. Sám jsem používal verzi programu 4.5.7 a 4.6.62. Po načtení záznamu se v horní části hlavního okna zobrazí graf průběhu jízdy. Je to závislost rychlosti vozu na ujeté dráze nebo času. Časové zobrazení mi přišlo přehlednější, neboť dávalo informaci o době zastavení v zastávkách a na světelných křižovatkách, ale především v obratištích. Průběh rychlosti je zobrazen křivkou červené barvy. Okno v dolní části zobrazuje průběhy analogových veličin, např. křivku napětí v troleji červeně, celkového odebíraného proudu zeleně, proudu vraceného zpět do sítě (rekuperace) černě. Mezi těmito okny se v lištách zobrazují přírůstky + 0,1 kWh, u starších verzí naměřených dat + 1 kWh, spotřebované a rekuperované energie. Pravá strana programu je tzv. stavové okno, kde se zobrazují podrobné informace o jízdě v časovém okamžiku označeném kurzorem. [15]



Obr. 2.8 Náhled vyhodnocovacího okna

2.5 Nákupní cena elektrické energie

Nákupem elektrické energie pro společnost PMDP, a.s. se zabývá Ing. Stanislav Martínek. Pro letošní rok zajistil nákupní cenu 2,73 Kč/kWh. Jedná se o cenu bez DPH se sazbou 20 %. Celková cena je dána vztahem 2.3. [32]

$$\text{celk. cena} = \text{cena bez DPH} \cdot 1,2 = 2,73 \cdot 1,2 = 3,276 \doteq 3,3 \text{ Kč/kWh} \quad (2.3)$$

2.6 Výpočet spotřeby elektrické energie

2.6.1 Výběr úseku, předpoklady

Naměřené hodnoty spotřeby jsem se rozhodl podložit teoretickým výpočtem. Vycházel jsem především ze znalostí a poznatků Prof. Františka Jansy, DrSc., který se ve své knize [1] výpočtem spotřeby trolejbusu také zabývá. Výpočet spotřeby trolejbusu také zpracoval Vlastimil Duda ve své diplomové práci [33] obhajované roku 2010.

Linka č. 11 je často osazována nízkopodlažními vozy 21 Tr, které usnadňují dopravu starším osobám, směřujícím na konečnou stanici a na přilehlý Ústřední hřbitov. [15]

Z celé trasy linky č. 11 jsem zvolil úsek mezi zastávkami *Pieatas* a *Hřbitovní*. Mé rozhodnutí ovlivnila především absence světelné křižovatky. Jedná se o nepredikovatelný prvek silniční dopravy, který by mohl vnášet do výpočtu chybu. Výhodou je také přímočarost dvoupruhové silnice, u které předpokládám plynulost dopravy. Jedná se o kopcovitý úsek se stoupáním 4,71 %. Předpokládám, že se trolejbus bude chovat takto:

- 1) Ze zastávky Pietas se trolejbus plynule rozjede s konstantním zrychlením a_1 . Po ujetí dráhy s_1 , za dobu t_1 , vůz dosáhne provozní rychlosti v . Rychlost jsem zvolil 40 km/h (11,11 m/s), neboť této rychlosti vozy ve většině případů dosahují.
- 2) Po dosažení provozní rychlosti se vůz pohybuje rovnoměrně přímočaře rychlostí 40 km/h k další zastávce. Úsek o délce s_2 zdolá za čas t_2 .
- 3) Před zastávkou Hřbitovní trolejbus brzdí konstantním zpomalením a_2 , přičemž k zastavení potřebuje dráhu s_3 , ujetou za dobu t_3 .

2.6.2 Analýza částí úseku

Ad1)

- Z naměřených provozních hodnot trolejbusu Škoda 21 Tr jsem vypočetl průměrné zrychlení při rozjezdu ze zastávky Pietas vztahem 2.4:

$$a_1 = 0,85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 3,6 \cdot 0,85 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 3,06 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.4)$$

- Při počáteční nulové rychlosti platí pro rychlost vztah 2.5, z něž si vyjádřím dobu t_1 , potřebnou pro rozjezd vozidla na cestovní rychlost:

$$v = a \cdot t \rightarrow t_1 = \frac{v}{a_1} = \frac{40}{3,06} = 13,07 \text{ s} \quad (2.5)$$

- Dráha potřebná pro rozjezd vozidla se spočítá vztahem 2.6:

$$s_1 = \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot t_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,85 \cdot 13,07^2 = 72,6 \text{ m} \quad (2.6)$$

Ad3)

- Z naměřených provozních hodnot trolejbusu Škoda 21 Tr jsem vypočetl průměrné zpomalení při brzdění do zastávky Hřbitovní dle vztahu 2.7:

$$a_2 = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 3,6 \cdot 1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 3,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.7)$$

- Doba zpomalování je na rychlosti a zpomalení závislá dle následujícího vztahu 2.8:

$$v = a \cdot t \rightarrow t_3 = \frac{v}{a_3} = \frac{40}{3,6} = 11,11 \text{ s} \quad (2.8)$$

- Dráha potřebná pro zastavení vozidla s počáteční rychlostí v se spočítá vztahem 2.9:

$$s_3 = v \cdot t_3 - \frac{1}{2} \cdot a_3 \cdot t_3^2 = 11,11 \cdot 11,11 - \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 11,11^2 = 61,72 \text{ m} \quad (2.9)$$

Ad2)

- Z dosud vypočítaných hodnot lze dopočítat délku části úseku, kde trolejbus jede rovnoměrným přímočarým pohybem a to ze vztahu 2.10:

$$s_2 = s - s_1 - s_2 = 850 - 72,6 - 61,72 = 715,68 \text{ m} \quad (2.10)$$

- Doba potřebná pro ujetí druhé části úseku se vypočítá z následujícího vztahu 2.11:

$$s = v \cdot t \rightarrow t_2 = \frac{s_2}{v} = \frac{715,68}{11,11} = 64,42 \text{ s} \quad (2.11)$$

2.6.3 Jízdní odpory

Proti pohybu těles působí, ve většině případů nežádoucí, jízdní odpory. Do výpočtu jsem zahrnul jízdní odpor vozidla (P_0), který se skládá z valivého tření kol po vozovce (P_v), tření v ložiskách (P_t) a tření karoserie trolejbusu o vzduch (P_d). Při změnách rychlosti je nezbytné počítat se setrvačnou silou (P_a), která působí proti změně rychlosti vozidla. Je však důležité zahrnout do výpočtu i odpory traťové, především odpor stoupání (P_s) a oblouku (P_r). Na vybraném přímočarém úseku lze odpor oblouku zanedbat, zatímco odpor stoupání nikoliv.

Jízdní odpor vozidla

Pro měrný jízdní odpor vozidla P_0 [N/kN] v závislosti na rychlosti platí vztah 2.12 dle [1]:

$$P_0 = P_t + P_v + P_d = a + c \cdot v + b \cdot v^2 \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}}, \frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \quad (2.12)$$

Pro trolejbusy platí:

Člen a

- reflektuje drsnost povrchu vozovky
- $a = 12$ pro hladkou, betonovou nebo asfaltovou vozovku
- $a = 20$ až 25 kamenná dlažba
- vzhledem k charakteru vozovky na lince č. 11 jsem zvolil hodnotu $a = 12$

Člen c

- Člen $c = 0,07$ jsem převzal z [1]

Člen b

- reflektuje měrný aerodynamický odpor vozu v závislosti na jeho tvaru, velikosti a hmotnosti, je dán vztahem 2.13

$$b = \frac{0,1 \cdot c \cdot S}{G} = \frac{0,1 \cdot 0,8 \cdot 8,41}{116,21} = 5,79 \cdot 10^{-3} \quad (2.13)$$

Koeficient c

- součinitel tvaru vozové skříně
- $c = 0,6$ pro zakrytý spodek skříně a její proudnicový tvar
- $c = 1$ pro nezakrytý spodek skříně a její hranatý tvar
- Škodu 21 Tr bych nepřičítal ani do jedné skupiny. Rozhodl jsem se ke kompromisu, neboť skříně vykazuje zlepšení aerodynamiky oproti předchůdcům. Hodnotu členu jsem zvolil $c = 0,8$

Koeficient S

- čelní plocha vozidla
- Škoda 21 Tr má čelní rozměry tyto: 2,5 m x 3,365 m (šířka x výška) [28]
- čelní plocha tudíž je $S = 2,5 \cdot 3,365 = 8,41 \text{ m}^2$

Koeficient G

- tíha vozidla dle vzorce 2.14:

$$G = m \cdot g = 11,85 \cdot 9,80665 = 116,21 \text{ [kN, t, m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (2.14)$$

Pro vybraný vůz 21 Tr na zvolené trati platí vztah 2.15:

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 5,79 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}}, \frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \quad (2.15)$$

Setrvačná síla

Po úpravách dle [1] je výsledný vztah 2.16 pro měrnou zrychlující sílu:

$$P_a = \pm 28,325 \cdot \xi \cdot a \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}}, \xi > 1, \text{ km/h} \cdot \text{s} \right] \quad (2.16)$$

- přičemž ξ je tzv. poměrná přirážka, neboť všechna rotující tělesa, převody atd. zvyšují potřebnou setrvačnou sílu
- tj. respektuje kinetickou energii rotujících těles na vozidle
- dále respektuje poloviční obsazení vozidla cestujícími
- u elektrických vozidel MHD je $\xi = 1,25$

Trat'ové odpory

Odpor stoupání

- při překonávání stoupání je nezbytné zvýšit tažnou sílu nebo dojde k poklesu rychlosti vozidla
- pro zjednodušení předpokládám konstantní sklon vozovky
- po úpravě dle [1] dostaneme pro měrný odpor sklonu vztah 2.17:

$$P_S = \frac{h}{s} = \frac{40}{0,85} = 47,06 \left[\frac{N}{kN}, m, km \right] \quad (2.17)$$

2.6.4 Spotřeba energie

Na následujících stranách je výpočet spotřeby pouze znázorněn. Aby byla přesnost výpočtu co nejvyšší, je výhodné počítání jízdních odporů pro jednotlivé rychlosti. Proto jen demonstruji použitý postup výpočtu a kompletní výpočet pro rychlosti s krokem 1 km/h je uveden v přílohách A až J. Přílohy K a L graficky zobrazují dosažené výsledky.

Ad1)

Demonstraci předvedu pro $v = 20 \text{ km/h}$

Jízdní odpor vozidla P_0 (2.18)

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 5,79 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 20 + 5,79 \cdot 10^{-3} \cdot 20^2 = 15,72 \text{ N/kN} \quad (2.18)$$

Setrvačná síla (2.19)

$$P_a = 28,325 \cdot \xi \cdot a_1 = 28,325 \cdot 1,25 \cdot 3,06 = 108,34 \text{ N/kN} \quad (2.19)$$

Odpor stoupání (2.20)

$$P_S = \frac{h}{s} = \frac{40}{0,85} = 47,06 \text{ N/kN} \quad (2.20)$$

Pro dosažení nerovnoměrného pohybu se zrychlením a_1 je zapotřebí vyvinout tažnou sílu dle vztahu 2.21:

$$F_t = G \cdot (P_0 + P_a + P_S) = 116,21 \cdot (15,72 + 108,34 + 47,06) = 19885,86 \text{ N} = 19,886 \text{ kN} \quad (2.21)$$

Potřebný tažný výkon je dán vztahem 2.22:

$$P_t = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{19,886 \cdot 20}{3,6} = 110,48 \text{ kW} \quad (2.22)$$

Pokud výše demonstrováný postup (2.18 až 2.22) provedu pro rychlosti s dostatečně malým krokem. Dosáhnu tím vyšší přesnosti. Z vypočítaných tažných výkonů spočítám aritmetický průměr, čímž dostanu střední výkon na první část úseku (P_{01}) a následně zjistím energii potřebnou pro dosažení cestovní rychlosti trolejbusu dle vztahu 2.23:

$$W_1 = \frac{P_{01} \cdot t_2}{\eta_{mot}} = \frac{115,17 \cdot 13,07}{0,9} = 1672,52 \text{ kWs} = \mathbf{0,46 \text{ kWh}} \quad (2.23)$$

Ad2)

V druhé části jízdy, tj. při rovnoměrném pohybu, nepočítám se setrvačnou silou. Ve výpočtu se objevuje pouze jízdní odpor vozidla při rychlosti 40 km/h a odpor stoupání.

Jízdní odpor vozidla P_0 (2.24)

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 5,79 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 40 + 5,79 \cdot 10^{-3} \cdot 40^2 = 24,07 \text{ /kN} \quad (2.24)$$

Odpor stoupání (2.25)

$$P_S = \frac{h}{s} = \frac{40}{0,85} = 47,06 \text{ N/kN} \quad (2.25)$$

V tomto případě je tažná síla dána rovnicí 2.26:

$$F_t = G \cdot (P_0 + P_S) = 116,21 \cdot (24,07 + 47,06) = 8266 \text{ N} = 8,266 \text{ kN} \quad (2.26)$$

Tažný výkon dle vztahu 2.27:

$$P_t = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{8,266 \cdot 40}{3,6} = 91,84 \text{ kW} \quad (2.27)$$

Na ujetí prostřední části úseku trolejbus spotřebuje množství energie dle vztahu 2.28:

$$W_2 = \frac{P_{01} \cdot t_2}{\eta_{mot}} = \frac{91,84 \cdot 64,42}{0,9} = 6573,7 \text{ kWs} = \mathbf{1,83 \text{ kWh}} \quad (2.28)$$

Ke zrychlení trolejbusu a ujetí části úseku mezi zastávkami je potřeba této energie (2.29):

$$W_{1+2} = W_1 + W_2 = 0,46 + 1,83 = \mathbf{2,29 \text{ kWh}} \quad (2.29)$$

Ad3)

Při řešení této části úseku jsem uvažoval rovnoměrně zpomalený pohyb se zpomalením (2.30):

$$a_2 = 3,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.30)$$

Kinetická energie rozjetého trolejbusu je snižována jízdním odporem vozidla (P_0) a odporem sklonu (P_s). Zbylá kinetická energie se v nejlepším možném případě přemění v elektromotoru o účinnosti η_{mot} na elektrickou energii dodanou jinému vozidlu na napájecí síti stejné měřírny. V horším případě se rekuperované energie použije pro napájení pomocných pohonů trolejbusu, osvětlení, případně topení nebo se zmaří v odpornících, přičemž dochází k šetření třecích elementů pneumatických brzd. Pro poměr efektivně využitě k celkově vyrobené energii při brzdění jsem zavedl koeficient u . Na zvoleném úseku dosahuje nízké hodnoty. Je to dáno především malou vytížeností linky a technologií měřírny. Tyristorová měřírna není schopna převést rekuperovanou energii do jiného úseku, neboť proud tyristorem teče pouze v propustném směru. K přímému využití energie jiným trolejbusem dochází velmi sporadicky. Intenzivního brzdění není při jízdě do kopce třeba. Z těchto důvodů a naměřených hodnot jsem zvolil hodnotu koeficientu $u = 10\% = 0,1$ [15] [19]

Vztah 2.31 pro výpočet kinetické energie elektrických vozidel MHD je doplněn o poměrnou přírážku ξ , stejně jako v případě výpočtu setrvačné síly.

$$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot \xi = \frac{1}{2} \cdot 11,85 \cdot 11,11^2 \cdot 1,25 = 914,35 \text{ kJ} \quad (2.31)$$

Brzdná síla jízdních odporů působící proti pohybu trolejbusu je dána vztahy 2.32 až 2.35:

Při výpočtu budu opět používat rychlost $v = 20 \text{ km/h}$

Jízdní odpor vozidla P_0 (2.32)

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 5,79 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 20 + 5,79 \cdot 10^{-3} \cdot 20^2 = 15,72 \text{ N/kN} \quad (2.32)$$

Odpor stoupání (2.33)

$$P_s = \frac{h}{s} = \frac{40}{0,85} = 47,06 \text{ N/kN} \quad (2.33)$$

Setrvačná síla (2.34)

$$P_a = 28,325 \cdot \xi \cdot a_2 = 28,325 \cdot 1,25 \cdot 3,6 = 127,46 \text{ N/kN} \quad (2.34)$$

Brzdná síla jízdních odporů (2.35)

$$F_b = G \cdot (P_0 + P_s - P_a) = 116,21 \cdot (15,72 + 47,06 - 127,46) = -7516 \text{ N} = -7,52 \text{ kN} \quad (2.35)$$

Opět opakuji výpočty 2.32 až 2.35 pro rychlosti s krokem 1km/h a aritmetickým průměrem spočítám střední brzdnu sílu F_{b03} na třetí části úseku. Jelikož se jedná o rovnoměrný zpomalený pohyb, působí setrvačná síla proti pohybu změny, proto ji dosazují zápornou. Výsledek použiji pro výpočet množství energie (2.36), které je odebráno z kinetické energie trolejbusu (2.31) jízdními odpory vozidla a trati.

$$W_b = F_{b03} \cdot s_3 = -7,41 \cdot 61,72 = -457,4 \text{ kJ} \quad (2.36)$$

Celková kinetická energie trolejbusu schopna přeměny na elektrickou energii při brzdění (2.37), (2.38) je dána rozdílem kinetické energie trolejbusu (2.31) a energie jízdních odporů (2.36):

$$W_{kinc} = W_{kin} - W_b = 914,35 - (-457,4) = 1371,75 \text{ kJ} \quad (2.37)$$

$$W_{rek} = \frac{W_{kinc} \cdot \eta_{mot}}{3600} = \frac{1371,75 \cdot 0,9}{3600} = 0,34 \text{ kWh} \quad (2.38)$$

S přihlédnutím na výše zmíněný koeficient u je efektivně využitá energie dána vztahem 2.39:

$$W_{zrek} = W_{rek} \cdot u = 0,34 \cdot 0,1 = 0,03 \text{ kWh} \quad (2.39)$$

S velmi malým příspěvkem rekuperované energie, který na zvoleném úseku spotřebu téměř neovlivní, je výsledná teoretická spotřeba trolejbusu Škoda 21 Tr na zvoleném úseku uvedena ve vztahu 2.40:

$$W_{1+2+3} = W_{1+2} - W_{zrek} = 2,29 - 0,03 = 2,26 \text{ kWh} \quad (2.40)$$

2.7 Naměřená spotřeba elektrické energie

2.7.1 Spotřeba na celé trase linky č. 11

Při provozu na lince č. 11 vozy nepoužívají konečnou stanici CAN, Husova k dlouhodobému stání. Odpočinková přestávka v průměrné délce trvání 15 minut probíhá na obřatišti Ústřední hřbitov II. Jako jeden jízdni cyklus jsem si označil jízdu trolejbusu ze zastávky Ústřední hřbitov II. na druhý konec linky, s následným průměrným 2 minutovým čekáním, a zpět do obřatiště na Rokycanské třídě. Do tohoto cyklu jsem započel i čtvrt hodinovou přestávku. Dne 10.5.2012 vůz ev. č. 490 těchto cyklů zajel 13. Do výpočtu jsem nezahrnul nekompletní cykly, při nichž se vůz na linku dostal, případně ji opouštěl zpět do vozovny v ulici Cukrovarská. Průběh jízdy je vidět v příloze O.

Těchto 13 jízdních cyklů vůz projel za 13:40 hod. Jízdu strávil 47,3 % celkové doby, tedy 6:27 hod, za niž ujel vzdálenost 155,1 km. Tachograf dále zaznamenal 856 stání. Bez započítání doby stání byla průměrná rychlost v městském provozu 24 km/h. Maximální dosažená rychlost lehce překonala 55 km/h. Energetické veličiny jsou zaznamenány v následující tabulce.

Tab. 2.II Spotřeba během 13-ti jízdních cyklů

celková spotřeba (CS) [kWh]	235,1
rekuperace (R) [kWh]	34,1
spotřeba pomocných pohonů (SPP) [kWh]	29,6

Řádek „celková spotřeba“ reflektuje množství energie odebrané z trolejového vedení. Druhý údaj značí množství energie vrácené zpět do trolejového vedení při rekuperačním brzdění. Tato hodnota však zcela nevyovídá o využití energii při brzdění. Trolejbus při elektrodynamickém brzdění generuje v trakčním motoru elektrickou energii, s kterou nakládá dle aktuální situace. Je žádoucí předat ji jinému vozu. Není-li „kolega“ k dispozici, využívá se vyrobená energie k hrazení spotřeby pomocných pohonů. Jedná se např. o pohon kompresoru, posilovače řízení, topení řidiče a topení do salonu pro cestující. Měření elektrické energie pro pomocné pohony, která se hradí z energie vzniklé při brzdění, nebylo provedeno. Z toho plyne, že celková využitá energie při brzdění je vyšší než udává hodnota rekuperace, bohužel není blíže specifikována. [15]

Z výše uvedeného vyplývá, že energie spotřebovaná trakčním motorem (TM) pro pohyb vozu je dána následujícím vztahem 2.41: [15]

$$TM = CS - SPP = 235,1 - 29,6 = 205,5 \text{ kWh} \quad (2.41)$$

Na dráze 155,1 km trakční motor spotřeboval 205,5 kWh, tj. 1,33 kWh/km. Budeme-li uvažovat i spotřebu pomocných pohonů, zvýší se průměrná spotřeba na 1,52 kWh/km. Naopak, vezmeme-li v úvahu rekuperaci, je spotřeba vozu (SV) dána vztahem 2.42: [15]

$$SV = CS - R = 235,1 - 34,1 = 201 \text{ kWh} \quad (2.42)$$

Tuto spotřebu můžeme vztáhnout k cyklu (15,46 kW/cyklus), případně kilometru dráhy (1,3 kW/km). Vzhledem k ceně elektřiny viz. kapitola 2.5 jsou náklady vozu 51 Kč/cyklus a 4,3 Kč/km za elektrickou energii. Pro získání celkových provozních nákladů by bylo třeba započítat plat řidiče, opotřebení vozu, trolejí atd.

2.7.2 Spotřeba na rovinaté části linky č. 11

Trasa linky č. 11 zdaleka nepatří mezi rovinaté, přesto jsem zvolil úsek mezi zastávkami CAN, Husova a Stav. stroje, Rokycanská, abych na něm zjistil spotřebu v hustém městském provozu, který je zbaven výrazných stoupání a klesání. Pro demonstraci jsem použil jízdu 10.5.2012 v 16:18 vyjíždějící z CAN, Husova, jejíž průběh je k vidění v příloze P.

Měřený úsek je 3,63 km dlouhý, přičemž vůz jej při průměrné rychlosti 23,4 km/h zdolal se zastávkami za 15 minut. Energetické veličiny jízdy jsou opět zaznamenány v následující tabulce.

Tab. 2.III Spotřeba na rovinatém úseku

celková spotřeba (CS) [kWh]	5,8
rekuperace (R) [kWh]	1,5
spotřeba pomocných pohonů (SPP) [kWh]	0,7

V tomto případě budu používat pouze spotřebu se započítanou rekuperací, jelikož se jedná o reálný stav. Spotřeba vozu (SV) na rovinatém úseku je dána vztahem 2.43:

$$SV = CS - R = 5,8 - 1,5 = 4,3 \text{ kWh} \quad (2.43)$$

Průměrná spotřeba je 1,19 kWh/km. Proti průměrné spotřebě za cyklus zde dochází k poklesu o 0,1 kWh/km. Důvodů je několik. V průběhu měření spotřeby v cyklech se za volantem vystřídali 2 řidiči. Každý z nich volí jiný jízdní režim. Žádný cyklus není shodný s jiným. Při měření spotřeby v rovinaté části jsem mohl zvolit ten, v němž vůz nenarazil na velké kolony, případně „červenou vlnu.“ Počasí hraje také svoji roli. Jelikož jsem použil odpolední jízdu, předpokládám nízký nebo dokonce nulový odběr topných těles. V neposlední řadě je v druhém případě téměř dvojnásobný podíl „rekuperace“ vůči „celkové spotřebě.“

Průměrné náklady za energii jsou 3,93 Kč/km v případě rovinatého úseku.

2.7.3 Spotřeba při provozu ve stoupání a klesání

Vozy na trase linky č. 11 čelí největšímu stoupání mezi zastávkami Stav. stroje, Rokycanská a Hřbitovní. Předpoklad, že je průměrná kilometrová spotřeba v tomto režimu větší, je správný. Ale o kolik to je? Pro ukázkou jsem opět zvolil jízdu jako v předchozím případě. Zastávku Stav. stroje, Rokycanská vůz opouští v 16:33 hod. Příloha Q zobrazuje průběh jízdy při stoupání. Energetické veličiny jízdy jsou zaznamenány v tabulce 2.IV.

Tab. 2.IV Spotřeba ve stoupání

celková spotřeba (CS) [kWh]	4,2
rekuperace (R) [kWh]	0
spotřeba pomocných pohonů (SPP) [kWh]	0,1

Úsek stoupání je 1,68 km dlouhý, přičemž se na něm nachází pouze jedna významná křižovatka se světelným řízením provozu. Úsek je přímý, dvouproudý pro oba směry jízdy. Vzhledem k těmto okolnostem vůz dosáhl průměrné rychlosti 32,65 km/h. Z naměřených hodnot je patrné, že vůz ve stoupání nevrátil zpět do sítě žádnou elektrickou energii. Spotřeba vozu za úsek je tedy 4,2 kWh. Při přepočtu na dráhu dostaneme 2,5 kWh/km, což je 8,25 Kč/km. V porovnání se spotřebou na rovinatém úseku se jedná o více než dvojnásobnou hodnotu. Příčinou je bezesporu větší energetický nárok ve stoupání a nulový podíl rekuperace.

Úsek mezi stejnými zastávkami, ovšem v opačném směru, je vhodný pro ukázkou energetických nároků při jízdě ze svahu. Jízda, která nevykázala zanedbatelné množství rekuperované energie, vyjela z počáteční zastávky Hřbitovní v 14:45 hod. Při pohybu ze svahu dolů průměrná rychlost dosahovala téměř 37 km/h. Spotřeby jsou zaznamenány v tabulce 2.V a průběh jízdy viz. příloha R.

Tab. 2.V Spotřeba při klesání

celková spotřeba (CS) [kWh]	1
rekuperace (R) [kWh]	0,7
spotřeba pomocných pohonů (SPP) [kWh]	0,2

Z naměřených hodnot je spotřeba vozu (SV) dána vztahem 2.44:

$$SV = CS - R = 1 - 0,7 = 0,3 \text{ kWh} \quad (2.44)$$

Při shodné délce úseku, tj. 1,68 km, je spotřeba 0,18 kWh/km, potažmo 0,59 Kč/km. V tomto případě je velký podíl rekuperované energie. Pokud by její podíl byl nulový, spotřeba za úsek by byla 1 kWh. Při vztažení na jednotku dráhy by spotřeba byla zhruba 3x větší. Z toho mi vychází, že rekuperace je velmi žádoucí z hlediska zvyšování efektivity provozu, a to nejen v kopcovitém terénu.

2.7.4 Spotřeba v počítaném úseku

V kap. č 2.6 jsem vypočítal energetickou náročnost na ujetí úseku mezi zastávkami Pietas a Hřbitovní. Z naměřených hodnot, viz Tab. 2.VI, mohu zjistit, zda můj předpoklad byl správný a reálný. Použil jsem jízdu 10.5.2012, která z počáteční zastávky odjížděla v 15:20 hod. Průběh jízdy je v příloze S.

Tab. 2.VI Spotřeba v počítaném úseku

celková spotřeba (CS) [kWh]	2,4
rekuperace (R) [kWh]	0
spotřeba pomocných pohonů (SPP) [kWh]	0

V kap. č. 2.6 jsem dospěl, se započtením rekuperace, ke spotřebě 2,26 kWh k ujetí úseku mezi zastávkami. Naměřená hodnota se vypočtené velmi přibližuje. Odchylka je 0,14 kWh. Příčinou může být technický stav vozu (podhuštěné pneumatiky, zvýšené tření v ložiscích, zvýšený aerodynamický odpor karoserie), povětrnostní podmínky (protivítr) nebo větší obsazenost vozu.

3 Napájecí soustava pro vozy MHD

Pro napájení elektrické trakce je nezbytné vybudovat napájecí soustavu. Pro městskou dopravu se nejčastěji používá stejnosměrné napětí 600 V, u novějších systémů 750 V. Vyšší napětí je výhodné zejména při zvyšování výkonů vozidel a přenosu elektrické energie na větší vzdálenosti. [9, str. 44] Transformace a usměrnění vstupního napětí 22 kV/50 Hz se děje v měničnách. Na území města Plzně jich je celkem 8. Z měníren je stejnosměrné napětí vedeno soustavou podzemních kabelů k napájecím bodům na vedení. Soustava je dále doplněna o odpojovače, úsekové děliče a výhybky. Schéma trakčního vedení, měníren, napájecích bodů a úsekových děličů je v příloze M. [19]

3.1 Parametry vedení

V stejnosměrné troleji nedochází k napět'ovým úbytkům na reaktancích. Trakční soustavu nezatěžuje jalový výkon. [1, str. 62] Trakční i přírodní vedení lze charakterizovat těmito parametry: [9, str. 44]

- Ohmický odpor vedení
 - je závislý především na materiálu vodiče jeho průřezu
 - obvyklá hodnota $R = 0,06$ až $0,09 \Omega/km$
 - odpor vykazuje též trolej, i přes používání mědi je odpor větší kvůli menšímu průřezu
- Indukčnost měnírny
 - na jednu napájecí jednotku $L \doteq 0,04 mH$
- Indukčnost vedení
 - $L = 0,75$ až $1 mH/km$
- Kapacita vedení
 - $C = 20 nF/km$
- Svod vedení
 - $G = 85 k\Omega/km$

I přes nulovou frekvenci napájecího napětí tyto parametry ovlivňují chování vedení při přechodových stavech. Odpor vedení má negativní vliv na velikost napětí v troleji. Pokud se na ní nachází dopravní prostředek, který v daný okamžik vyžaduje proudový odběr, dochází k přeměně části elektrické energie na teplo v celé délce vedení. Ztrátový výkon je na procházejícím proudu závislý kvadraticky dle vzorce $P = RI^2$. Mařením elektrické energie

dochází jednak k plýtvání finančních prostředků, zhoršení efektivity provozu elektrické trakce, ale především k poklesům napětí v troleji, které může klesnout i o více jak 30 %. Následně dochází k problémovému provozu elektrické trakce na daném úseku. Na zvýšenou poptávku přepravy nelze reagovat nasazením většího počtu dopravních prostředků, případně vozů s vyšší spotřebou, schopných pojmout větší počet cestujících (např. kloubové trolejbusy). Návrhem řešení tohoto problému se zabývám níže. [9, str. 44]

Dále odpor ovlivňuje velikost procházejícího proudu v situaci, kdy na vedení vznikne zkrat. Strmost nárůstu proudu omezuje indukčnost. [9, str. 44]

3.2 Výstavba trolejového vedení

Při plánování a následné realizaci nového trolejového vedení je nezbytné dodržet základní pravidla. V opačném případě může být provoz na daném úseku nespolehlivý, finančně náročnější a horší i v dalších hlediscích, než u vhodně realizovaného vedení.

- 1) Pro vozy městské hromadné dopravy se používá tzv. prosté nekompenzované vedení. Jedná se o trolejový drát zavěšený na převěsech nebo výložnicích, bez možnosti podélného posuvu. Nevýhodou je, že při změnách teploty dochází vlivem tepelné roztažnosti trolejového drátu k změně průhybu. Aby byl průhyb ještě přijatelný, je nutné klást podpěry velmi hustě a dodržovat klikatost natažení. Jedná se o hojně používaný systém, především pro městskou dopravu, neboť tamější vozy zpravidla nedosahují takových rychlostí, při kterých by odskok sběrače na zlomech byl výrazný. Nejlepší systémy používané v železniční dopravě dosahují průhybu 0,01 m a menší. [24], [34], [35]

Pohybuje-li se sběrač po napnutém trolejovém drátu směrem od jeho uchycení, dochází k poklesu troleje, která nutí k poklesu i sběrač. Přítlak sběrače roste a dochází k zvýšenému otěru smykadla sběrače. Tento jev trvá až do poloviny vzdálenosti mezi uchycením troleje. Od nejnižšího místa se trolej opět zdvíhá, přičemž vlivem setrvačné energie sběrače klesá přítlak. Na těchto úsecích troleje dochází k opalování drátu. Z tohoto důvodu je výhodné vyrábět tyčové sběrače co nejlhčí konstrukce, aby se minimalizoval vliv setrvačných sil. [34]

- 2) Tyčové sběrače jsou k trolejovému drátu tlačeny šroubovými pružinami, které vyvíjejí sílu 80 – 120 N. Je důležité zajistit konstantní přítlak v celé pracovní výšce

sběrače. Při velkém přitlaku se minimalizuje riziko vypadnutí sběrače z troleje, ale dochází k nadměrnému odírání především uhlíkové vložky sběrače. Naopak při malém přitlaku vzniká mezi sběračem a trolejovým drátem jiskření. [1, str. 224], [9, str. 53], [24]

- 3) Je důležité dodržovat maximální povolenou rychlost pro dané vedení. Při rychlostech vyšších působí na sběrač aerodynamické a setrvačné síly, které přitlak zvyšují, případně snižují. Změna přitlaku může způsobit odskok sběrače, jiskření nebo zvýšení odírání. Životnost vedení v obloucích je na průjezdné rychlosti značně závislá. [9, str. 53], [24]
- 4) Při výběru materiálu smykadla je možno se vydat dvěma směry. Kontaktní vložku lze vyrábět spékáním kovu a grafitu, v tomto případě je vložka velmi trvanlivá. Vydrží desítky tisíc kilometrů. Zásadní nevýhodou je silné odírání trolejového drátu a snížení jeho trvanlivosti. Výhodnějším řešením je používání samotného grafitu. Uhlík je měkký materiál a oproti prvnímu případu vedení neodírá a zvyšuje jeho životnost na přímých úsecích až na 25 let. V obloucích se životnost drátu pohybuje v závislosti na průjezdnosti a rychlosti mezi 7 a 10 lety. Uhlíková vložka zpravidla vydrží v dobrém počasí 1500 km. Za deště nebo dokonce trolejové námrazy ubývá vložka rychleji. Přesto se jedná o výhodnější řešení. V prvním případě je nutné po čase vyměnit kilometry trolejového drátu, což není levná záležitost. V druhém případě trolej vydrží mnohonásobně déle a mění se pouze uhlíková vložka v ceně několika korun. Dále není nutné odstavovat provoz, neboť výměnu vložek si provádí řidič trolejbusu v průběhu své jízdy, zejména na konečných zastávkách. Okamžik nutné výměny trolejového vedení je dán úbytkem průřezu o 40 % jeho původní hodnoty. [9, str. 224-225], [24]
- 5) Trolejové vedení se nebuduje jako jednolitě, nýbrž se dělí do úseků. Délka jednotlivých úseků se obvykle pohybuje mezi 500 až 1000 m. Délka se odvíjí od proudové zatížitelnosti napáječe, průjezdnosti, povoleným úbytkům napětí. Vhodným dělením lze jednodušeji nalézt poruchu na vedení, nebo přes odpojovače vypnout napájení úseku. Tohoto je využíváno především v době oprav, poruch, případně při výstavbě nové trati. Délka úseku ovlivňuje tvrdost napájení. Na dlouhém úseku dochází vlivem většího elektrického odporu k většímu poklesu napětí a napájení se

stává měkčím. Od délky vedení se odvíjí nastavení vypínací hodnoty protékajícího proudu u rychlovypínačů. Jestliže by nastal zkrat na nejvzdálenějším konci vedení od napájecího bodu, dosahoval by zkratový proud vlivem celkového elektrického odporu nízké hodnoty, která by ani nemusela být považována za zkratovou. Je proto nutné zkratový proud v tomto místě změřit a dle ní nastavit rychlovypínač. Nízká nastavená hodnota negativně ovlivňuje průjezdnost daného úseku. Tyto dopady lze eliminovat umístěním několika napájecích bodů v rámci úseku. [1, str. 121-122, 201], [19], [24]

- 6) Prostorové poměry městských ulic většinou dovolují natažení trolejového vedení pro oba směry, tzv. dvoustopě. Na převěsech nebo výložnicích tedy visí čtveřice drátů, přičemž ty blíže k podpěrám či okraji vozovky jsou připojeny k záporné nebo uzemněné polaritě. Vnitřní vodiče jsou kladné polarity. Na obou koncích úseku jsou oba příslušné póly vodičů spojeny příčnými spojkami. Dále jsou spojky kladeny v blízkosti napájecích bodů. Obvykle jsou spojky umístěny každých 300 až 500 m. Při propojení dochází k paralelnímu spojení dvou vodičů. Vzniklý pár vykazuje menší elektrický odpor a tudíž i menší ztráty, zvyšuje se tvrdost napájení. [1, str. 201-202], [19], [24]
- 7) Při stavbě trolejového vedení pro kolejová vozidla je důležité, aby věrně kopírovalo kolejovou dráhu. Má-li např. tramvaj pantografický sběrač, je nutné natáhnout trolejový drát s bočními výchylkami. V opačném případě by docházelo k nadměrnému vydírání smykadla na jednom místě. U trolejbusů musí být použit jiný přístup. Bez kolejový provoz umožňuje odchylky jízdní dráhy od osy trolejí. Vedení musí být nataženo s přihlédnutím na zajíždění do zastávkových zálivů, objíždění překážek na trati. [34], [36]
- 8) Vybočení z jízdní dráhy je dáno výškou a polohou vedení, ale i délkou tyčových sběračů. Obvyklé vybočení je umožněno o 4 m. [1, str. 40]
- 9) Je-li provoz složen z několika linek elektrické trakce, vyskytují se na trolejovém vedení výhybky a křížení. U křížení je důležité, aby byly jednotlivé trolejové stopy vzájemně odizolovány. Při jízdě by trolejbus přes tato místa měl projíždět vlastní setrvačností. Stejně by se měl chovat při přejíždění úsekových děličů, které poznáme podle zeleného čtverce se čtveřicí bílých teček. [24], [36]

10) Vedení by nemělo překážet v uličním prostoru. Výška montáže se pohybuje mezi 5 a 6 m nad zemí. Plzeňské vedení je zavěšeno ve výšce 5,5 m, přičemž na některých úsecích je z důvodu předpokládané dopravy nadrozměrných nákladů posunuto o 20 cm výše. Potíže mohou vznikat s nevhodně umístěným trolejovým vedením v místě zastávkového zálivu. Do vozovky trčící sběrače stojícího trolejbusu jsou snadným cílem vyšších vozidel. Okolo projíždějící nákladní vůz je schopný do sběračů narazit. Pro označení těchto nebezpečných míst existuje informativní provozní dopravní značka viz. obr. 3.1. Např. v Pardubicích byla v minulosti instalována. [24], [37], [38]



Obr. 3.1 Změna místní úpravy
Obrázek převzat z [37]

3.3 Teplotní roztažnost vedení

Trolejový drát je vyráběn z mědi, která při změně teploty mění své rozměry. U trolejí převažuje rozměr délkový. Změna rozměrů v ostatních směrech je zanedbatelná. O kolik se 1 m materiálu prodlouží při zvýšení teploty o 1 K, udává součinitel teplotní délkové roztažnosti α . Pro měď platí: $\alpha = 0,017 \frac{\text{mm}}{\text{m}\cdot\text{K}}$. [39], [40]

Změna délky je dána vztahem 3.1: [40]

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \left[\text{mm}, \text{m}, \frac{\text{mm}}{\text{m}\cdot\text{K}}, \text{K} \right] \quad (3.1)$$

Kde:

Δl = prodloužení

l_0 = počáteční délka tyče

ΔT = teplotní rozdíl počáteční a koncové teploty

Trolejový drát mění svou teplotu v závislosti na teplotě okolní, ale zároveň i na zatížení. Přestože je měděný trolejový drát výborný elektrický i tepelný vodič, vykazuje jistý elektrický odpor. Ten způsobuje při průchodu proudu další ohřev. Průměrná roční teplota na území Plzně je 7,5 °C, přičemž nejvyšší a nejnižší hodnota byla 40,1 a -28 °C. [41] Pro zjednodušení nebudu ohřev trolejového drátu průchodem proudu ve výpočtu uvažovat. [24]

Budeme-li předpokládat pokládku např. 1000 m trolejového drátu při teplotě 7,5 °C, bude při poklesu teploty na -28 °C změna délky trolejového drátu dána vztahem 3.2:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1000 \cdot 0,017 \cdot (-28 - 7,5) = -603,5 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Při vzrůstu teploty na 40,1 °C dojde k prodloužení dle vztahu 3.3:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1000 \cdot 0,017 \cdot (40,1 - 7,5) = 554,2 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Z výše uvedených výpočtů je patrné, že při nízkých teplotách bude nekompenzované trolejové vedení náchylné na prasknutí, zatímco za vysokých teplot budou vznikat průvěsy. V nasazení pro městskou hromadnou dopravu lze tento jev eliminovat klikatostí vedení. [35]

3.4 Negativní jevy na vedení

Jak jsem již nastínil výše, na vedení dochází k situacím, kdy v důsledku požadavku odběru velkého proudu a s tím souvisejícími energetickými i finančními ztrátami, v úseku výrazně klesá napětí. U starších vozů docházelo k snížení výkonu trakčního motoru a následně poklesu dynamiky vozu. Moderní vozy disponují ochranou, která při výrazném poklesu tento stav signalizuje řidiči a odpojí vůz od trolejového vedení. Při vzrůstu napětí na požadovanou mez je vůz opět připojen. Výrazný pokles napětí je pozorovatelný na napájecím úseku č. 071 Bručná, který je napájen z měřírny Slovany. Profil trati je zvlněný, přičemž úsek obsahuje 6 zastávek, viz tab. 3.1, které jsou obsluhovány trolejbusy linky č. 10 a 13. [15], [19]

Tab. 3.1 Trolejbusové zastávky na nap. úseku č. 071

zastávka [42]	nadmořská výška [m. n. m.] [27]
Čehurov, rozcestí	349
Fialková	345
Gen. Lišky	351
Černice, K Plzenci	361
Černice, náves	363
Černice	379

Dle provedených měření zde při rozjezdu vozu dochází k poklesům napětí až na 400 V. V příloze N je zobrazen průběh poslední jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 dne 21.3.2012 na úseku mezi stanicemi Černice a Čechurov, rozcestí. Z obrázku je patrné:

- Kolísání trolejového napětí

Na trolejovém úseku se v jednu chvíli může nacházet větší počet vozů. Ty následně způsobují výkyvy napětí v troleji. Je to patrné zejména u stojícího vozu, který soustavu dále nezatěžuje. Např. na začátku náhledu průběhu jízdy klesá napětí, bez přičinění vozu ev. č. 490, k hodnotě 510 V. Ke konci úseku došlo k výraznému krátkodobému poklesu napětí při přejezdu křížení. Naopak dochází i k nárůstům napětí až k 780 V.

- Pokles trolejového napětí

V souvislosti s rozjezdem trolejbusu jsou ze sítě odebírány vysoké proudy. Velikost se velmi liší dle jízdního stylu řidiče a trati, ale nejsou neobvyklé hodnoty větší jak 350 A. Z naměřených hodnot se mi podařilo objevit opravdový extrém, který je v příloze N vyznačen kurzorem asi v polovině obrázku. Při rozjezdu trolejbusu ze zastávky Gen. Lišky narostl odebíraný proud na hodnotu 355 A, přičemž ztráty na přívodním vedení způsobily pokles trolejového napětí až na hodnotu 401 V.

- Růst trolejového napětí

K opačnému jevu dochází při rekuperačním brzdění. Brzdící trolejbus vrací elektrickou energii zpět do troleje a zvyšuje v ní napětí. Zpětné vracení energie do vedení je přípustné pouze tehdy, je-li trolejové napětí nižší než maximální. Při rekuperaci je patrné zvyšování napětí.

Pokud vezmu v úvahu pouze napájecí úsek č. 071 při výše zmíněné poslední jízdě vozu ev. č. 490, byla průměrná hodnota trolejového napětí 618 V. Do výpočtu jsem zahrnul pouze hodnoty při pohybu vozu. V době stojícího vozu je trolejové napětí ovlivňováno především jinými vozy. Průměrná hodnota trolejového napětí na zbylých napájecích úsecích linky č. 13 je 670 V. Tyto úseky jsou napájeny z měníren Letná, Hydro a Slovany. Použil jsem jízdu 21.3.2012 zahájenou v 14:33:13 ve směru Doubravka – Černice.

3.5 Možná řešení poklesu napětí

3.5.1 Položení dalšího přívodního kabelu

Méně vytížené napájecí úseky poblíž měníren jsou obvykle napájeny jedním párem kabelu AYKCY 500 mm². Pokud to podmínky jako častější provoz, stoupání nebo větší vzdálenost od měnírny vyžadují, je úsek napájen několika páry kabelu. Např. tramvajový napájecí úsek č. 102 Lochotín je ke stejnojmenné měnírně připojen čtveřicí kabelů. Kabely jsou po dvojicích přivedeny ke dvěma napájecím bodům. U trolejbusového trakčního vedení je použito dvou napájecích bodů především při větší délce daného úseku. Body jsou cíleně rozmístěny v rámci celého úseku. [19], [22]

Ztrátový výkon na vedení je dán vztahem 3.4:

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

Ze vztahu 3.4 vyplývá, že pro snížení ztrát v přívodním vedení by bylo výhodné omezit procházející proud, který zvyšuje ztráty kvadraticky. To by však negativně ovlivňovalo dynamiku vozů a využitelnost úseku. Další možností je snížení odporu přívodního kabelu. Odpor vodiče ovlivňuje jeho materiál, délka a průřez. Vzájemný vztah je dán rovnicí 3.5. [43]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega, \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}, m, mm^2] \quad (3.5)$$

Kde:

ρ – měrný odpor materiálu

l – délka vodiče

S – průřez vodiče

S délkou kabelů nejde ve většině případů dělat nic. Záměna hliníkových kabelů měděnými lze provést. Jsou s tím ale spojeny výkopové práce, které toto řešení prodražují. Další překážkou je vyšší cena mědi oproti hliníku. Zbývá tedy poslední možnost, a to zvýšení průřezu kabelu. Realizace probíhá přidáním paralelního kabelu. Napájecí úsek č. 071 Bručná je napájen dvěma páry kabelu přes jeden napájecí bod. Oproti dnešnímu stavu by položení další dvojice páru výsledný odpor snížilo na polovinu. Ztráty by se tím pouze snížily, nikoliv minimalizovaly. Realizace tohoto plánu by byla vzhledem k městské zástavbě a dvoukilometrové vzdálenosti od měnírny stavebně i finančně náročná. Proto se tato možnost realizace nejspíše nedočká. [19], [22]

3.5.2 Výstavba Energetické posilovací stanice

K poklesům napětí docházelo dříve i na napájecím úseku č. 052 Sokolovna. Úsek používají trolejbusy linky č. 12. Napájení úseku obstarává měničrna Zátíší, od níž vede k napájecímu bodu jeden pár kabelu AYKCY 500 mm² o délce 1,5 km. Úsek se nachází v širším centru města, přičemž v těsné blízkosti vede i dráha tramvajové trakce linky č. 2. Tramvajový úsek č. 028 Přemyslova je napájen čtveřicí párových kabelů. [22]

Vzhledem k tomuto stavu zde bylo zvoleno řešení, které bude postižený úsek dotovat energií z přilehlého tramvajového úseku a baterie superkapacitorů. Křižovatka byla v roce 2009 [44] osazena Energetickou posilovací stanicí (EPOS). Toto zařízení obsahuje silové obvody umožňující vzájemné přelévání energie mezi danými úseky, většinou však ve směru z tramvajového do trolejbusového. Přebytečná rekuperovaná energie již nemusí být mařena v odporcích, nýbrž je krátkodobě deponována v superkapacitorové baterii. Stanice EPOS snížila energetické ztráty na přírodním vedení z měčírny Zátíší a dále spotřebu elektrické energie efektivním využíváním rekuperované energie. [10], [19], [22]

V případě napájecího úseku č. 071 nelze přesně toto řešení úspěšně aplikovat. V blízkosti se nenachází žádný dobře napájený úsek. Možným řešením by bylo umístění stanice EPOS s kapacitnější superkapacitorovou baterií v těsné blízkosti trakčního vedení bez možnosti přelévání energie z jiného úseku. Stanice by byla s vedením propojena krátkou kabelovou propojkou. Superkapacity by ukládaly rekuperovanou energii, případně by mohly být nabíjeny z vedení. Na něm by vznikaly menší ztráty v důsledku průchodu řádově menšího nabíjecího proudu. Při požadavku na velký proudový odběr by jeho část byla hrazena z deponované energie. Realizace by nebyla stavebně nijak náročná, přesto se nejedná o ideální řešení. Provoz na úseku není nijak hustý, avšak mohly by nastat stavy, kdy by byla baterie prázdná a k poklesům by opět docházelo. EPOS by tedy problém zcela neodstranil, ale pouze ho eliminoval. Nejedná se o nevyčerpatelný zdroj. [19], [22], [45]

Další možností je osadit superkapacity samotné trolejbusy. Nedochozelo by k energetickým ztrátám na vedení ke stanici EPOS a k úspoře by docházelo při provozu v rámci celé sítě. Toto řešení je však ještě utopičtější, neboť by musely být osazeny všechny plzeňské trolejbusy. Schůdnější cestou by bylo vyhrazení několika osazených trolejbusů na danou linku. Překážkou je především finanční náročnost. [19], [22]

3.5.3 Výstavba nové měřírny

Vzhledem k ceně a diskutabilnímu přínosu dvou výše zmíněných řešení poklesu napětí vychází tato možnost jako nejvíce reálná s vedlejšími přínosy. Realizace výstavby buňkové měřírny poblíž trolejového vedení není stavebně náročná. Aby do výstavby nevstupovaly další náklady, je výhodné měřírnu umístit v blízkosti přenosové soustavy 22 kV/ 50 Hz. Na krátkém přívodním vedení k napájecím bodům již nebudou vznikat výrazné napěťové ztráty. Při vybudování měřírny uprostřed napájecího úseku č. 071 lze tento téměř 2 km úsek rozdělit na dvě části a napájet každý samostatně. Oproti předchozím řešením se jedná o velmi tvrdý zdroj napětí. V případě budoucího prodloužení trolejového vedení za stávajícího obratiště Černice do ulice K Cihelnám, případně až k nákupnímu centru Olympia Plzeň, bude měřírna dostatečným zdrojem trakční energie i pro toto prodloužení. Přivedení nových napájecích kabelů ze slovenské měřírny až do této oblasti by bylo nesmírně náročné a nákladné. Navíc by na velmi dlouhém přívodním vedení opět docházelo ke ztrátám. [19], [22]

Jelikož je finanční náročnost všech tří navržených řešení podobná v řádu jednotek milionů Kč, jsou rozhodující i další faktory. Předně první řešení by znamenalo náročné stavební práce spojené s pokládkou kabelů. Přínos by byl pouze ve snížení ztrát, nikoli v jejich minimalizaci. Osazení napájecího úseku, případně samotných vozů superkapacitory by bylo elegantní a efektivitu zvyšující řešení. Kvůli nedostatečnému výkonu a kapacitě superkapacitorové baterie by však byl stávající problém pouze eliminován, nikoli odstraněn. Další prodloužení trolejové dráhy by v obou případech nebylo výhodné. Poslední možnost, výstavba nové měřírny, se jeví pro své výhody jako nejvhodnější řešení s reálným výhledem na realizaci. [19]

Závěr

V práci jsem se seznámil s rozmanitou historií trolejbusové dopravy, která se v Plzni začala psát v období druhé světové války. Během více než 70 let provozování si trolejbusy našly mnoho příznivců, přičemž na ročním dopravním výkonu se podílejí více než čtvrtinovou měrou.

Technický vývoj znamená přínosy především v plynulosti, komfortu, tichosti, dynamice, efektivitě. Nové vozy jsou vybavovány moderními technologiemi, které dále dopravu zkvalitňují. Kompletní trolejbusová infrastruktura je podstatně složitější než autobusová, což se odráží ve větších investicích při pořízení i následné údržbě. Výhodou je její částečná shoda s tramvajovou, čímž je umožněno rozdělení těchto nákladů a zvýšení konkurenceschopnosti.

Velkým přínosem je bezesporu schopnost trolejbusů vzdát se jejich závislosti na trolejovém vedení. V některých případech se zatím jedná jen o řešení na krátké vzdálenosti a za snížených jízdních výkonů. Osazení dieselagregáty je u „zelených“ trolejbusů diskutabilní, ale prozatím se jedná o nejvhodnější řešení z hlediska dosahovaných výkonů a dojezdu.

V druhé kapitole jsem všechny potřebné informace čerpal z naměřených hodnot ve vyhodnocovacím programu Tachograf. To mi umožnilo vypočítat teoretickou spotřebu vozu 21 Tr na zvoleném úseku. Tato hodnota byla následně doložena hodnotami naměřenými v reálném provozu. Výpočet vzhledem k dosažené přesnosti hodnotím jako úspěšný. Z naměřených hodnot jsem zjistil spotřebu vozu v různých jízdních režimech pohybující se mezi 0,18 až 2,5 kWh/km. Za hodnotu s nejvyšší vypovídací schopností bych označil tu, k níž jsem dospěl v kapitole 2.7.1. Zde jsem uvažoval pohyb vozu po celé trase linky č. 11. Výpočtem z naměřených hodnot jsem zjistil spotřebu 1,33 kWh/km. Jedná se o spotřebu na jaře, kdy nebyla dále zvyšována elektrickým vytápěním vozu. S přihlédnutím k aktuálním nákupním cenám elektrické energie jsou náklady na ujetí 1 km u vozu 21 Tr ve výši 4,3 Kč/km. Je nezbytné dodat, že na dalších trolejbusových linkách a v jiných vozech bude spotřeba jistě odlišná. Spotřebu potažmo náklady ovlivňuje především hustota a plynulost dopravy, obsazenost, profil tratě, povětrnostní vlivy, jízdní styl řidiče a nasmlouvaná cena elektrické energie. Z naměřených hodnot je zřejmé, že spotřebu velmi ovlivnila i rekuperace. Její podíl na celkové spotřebě vozu je dán hustotou trolejbusového provozu, technologií měření, profilem trati. V porovnání s autobusem jsou náklady na „pohonnou energii“ minimálně poloviční. K této částce se ale připočítávají i další náklady, jež znevýhodňují právě trolejbusy. Dále nákupní cena trolejbusu vybaveného dieselgenerátorem může být oproti podobně vybavenému autobusu více než dvojnásobná. Kvůli těmto faktům se bohužel na trolejbusový provoz hledí z jiného úhlu.

Rizik při návrhu a výstavbě trolejového vedení je mnoho. V práci jsem zmínil jen jejich přehled. Vylepšení rizikových míst napájecí soustavy je možné provést několika způsoby. Každý z nich má své klady i zápory. Nejvýhodnějším řešením je výstavba nové měnirny. Ta zajistí nejtvrdší zdroj napětí za přijatelnou cenu.

Práce prohloubila mé znalosti z oblasti elektrické trakce, umožnila mi nahlédnout do společnosti PMDP, a.s. a přiučít se mnohému od jejích odborníků. Děkuji.

Použitá literatura

- [1] JANSKA, F. *Elektrická zařízení hnacích vozidel MHD*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1986.
- [2] *Dopravní Novinky: Plzeňské trolejbusy slaví 70 let*. Plzeň: NAVA TISK, roč. 2011, červen.
- [3] *TROLEJ - AUTO - BUS: Historie trolejbusu* [online]. [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://rajmmodel.webnode.cz/historie-trolejbusu/>
- [4] *Wikipedie: Seznam sítí trolejbusové dopravy v Evropě* [online]. [cit. 2012-03-11]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam_sítí_trolejbusové_dopravy_v_Evropě
- [5] DUŠEK, Pavel. *ENCYKLOPEDIE MĚSTSKÉ DOPRAVY v Čechách, na Moravě a ve Slezku: Plzeň: Historický vývoj městské a integrované dopravy: Trolejbusy*. Praha: Libri, 2003, s. 188 - 190. ISBN 80-7277-159-0.
- [6] *Plzeňské trolejbusy: Historie plzeňských trolejbusů* [online]. [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://trolejbusy1936.ic.cz/PNHlavninadraz.html>
- [7] *Deník Právo: Tykadláci a tátošové*. 2011, roč. 2011, 3. června.
- [8] *Radniční listy: Ekologicky šetrný dopravní prostředek - 70 let ve službách města*. Plzeň: NAVA TISK, 2011, 16., Říjen.
- [9] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce I*. Plzeň: Tiskové středisko ZČU, 2000. ISBN 80-7082-633-9.
- [10] konzultace s Ing. Jiřím Kohoutem, Ph.D., projektový manažer dopravy, PMDP, a.s., 2012
- [11] *Stránky trolejbusu 353: Š 9Tr* [online]. [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.trolejbus.cz/park92.htm>
- [12] OTÝPKA, Ing. Miloslav. *Výkonová elektronika: Tyristory* [online]. [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=4652>
- [13] *Škoda: Trolejbusy* [online]. [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/trolejbusy/>
- [14] konzultace s Jiřím Trnkou, technik elektrické dráhy, PMDP, a.s., 2012
- [15] konzultace s Jiřím Vinšem, elektromechanik, PMDP, a.s., 2012
- [16] *Vozový park: Škoda 21 Tr ACI* [online]. [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.plzensketrolejbusy.cz/vozy/skoda-21-traci.php>
- [17] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce II.: Vozidla s více způsoby napájení: Akumulátorová vozidla*. Plzeň: Tiskové středisko ZČU, 2001, s. 34. ISBN 80-7082-814-5.
- [18] DĚDOUREK, Pavel. *Superkondenzátor - princip, použití* [online]. 15. května 2007 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: http://www.dedalebeda.wz.cz/skola/upload/02FM1/super_capacitor.pdf
- [19] konzultace s Václavem Sokolem, vrchní mistr měření, PMDP, a.s., 2012
- [20] BETONBAU. [online]. [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: http://www.betonbau.cz/index.php?p=menirny_pro_mhd&site=default

- [21] ŠLEHOFER, Jan. *Plzeňské tramvaje: Napájení tramvají* [online]. [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.plzensketramvaje.cz/?page=menirny.htm>
- [22] interní informace PMDP, a.s. od Ing. Jiřího Kohouta, Ph.D., 2012
- [23] LOSOS, Ludvík. *Městská doprava v Plzni: Pevná trakční zařízení*. Praha: Nakladatelství dopravy a turistiky - NADATUR, 2004, s. 57. ISBN 80-7270-021-9.
- [24] konzultace s Pavlem Pirnerem, mistr horního vedení, PMDP, a.s., 2012
- [25] *Stoupání* [online]. [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Stoupání>
- [26] Jízdní řády PMDP: Zastávkové jízdní řády linky č. 11 [online]. [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: http://jizdnirady.pmdp.cz/dzjr.aspx?path=Trol11_60000899_60000161_16.3.2012_28.3.2012
- [27] SEZNAM.CZ, a.s. *MAPY* [online]. [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: www.mapy.cz
- [28] MRÁZ, František. ŠKODA OSTROV S.R.O. *Schvalovací list technických podmínek: Trolejbusové vozidlo 21 Tr*. 1998.
- [29] KRESA, Zdeněk. *Plzeňské trolejbusy: Škoda 21 Tr ACI ev.č. 490* [online]. [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <http://www.plzensketrolejbusy.cz/vozy/490.php>
- [30] *Vůz PMDP 490 (21TrACI)* [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://seznam-autobusu.cz/vuz/9280>
- [31] C.T.M. PRAHA, s.r.o. Tachografy - paměťové jednotky: TM12 - paměťová a komunikační jednotka [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://ctmpraha.cz/tachografy-pametove-jednotky.html>
- [32] konzultace s Ing. Stanislavem Martínkem, energetik – specialista nákupu, PMDP, a.s., 2012
- [33] DUDA, Vlastimil. *Využití superkapacitorů v trakčních pohonech*. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/36745/1/DudaV_Vyuziti_superkapacitoru_SG_2010.pdf. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Stanislav Gregora.
- [34] NOVOTNÝ, Jaroslav. Vědeckotechnický sborník ČD: Spolupráce sběrače proudu a trolejového vedení. Praha, 1998, roč. 1998, č. 5. ISSN 1214-9047. Dostupné z: <http://www.cdmail.cz/VTS/CLANKY/509.pdf>
- [35] PODIVÍN, Ladislav. Z historie trolejbusů v Pardubicích: Konstrukce trolejbusového vedení [online]. [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://353.hamradio.cz/kniha5.htm>
- [36] Propagace trolejbusů: Trolejové vedení [online]. [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: http://kolejarz.wz.cz/MHD/Tr_serial/serial-05.htm
- [37] *Archiv stránek trolejbusu 353: Páteční hlášení* [online]. 2007 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://353.hamradio.cz/archiv/1171669651-patecni-hlaseni.html>
- [38] *Informativní provozní značení: Změna místní úpravy* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.dopravni-znacení.eu/znacka/Změna-místní-úpravy/IP22/>
- [39] Středisko mědi: Tepelná roztažnost [online]. [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.medportal.cz/trubky-v-tzb/odborna-instalace-mednych-trubek/tepelna-roztaznost>

- [40] TECHMANIA. Edutorium: Teplotní roztažnost [online]. 2009 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.techmania.cz/edutorium/clanky.php?key=601>
- [41] Geografie: Klima [online]. 2009 [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.plzen.eu/o-meste/informace-o-meste/geografie/geografie.aspx>
- [42] Jízdní řády PMDP: Zastávkové jízdní řády linky č. 13 [online]. [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://jizdnirady.pmdp.cz/dzjr.aspx?path=Trol13_60000596_60000870_29.3.2012_31.12.2012
- [43] TYRBACH, Jaromír. Elektrický odpor a vodivost, měrný odpor a měrná vodivost [online]. 2008 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://web.telecom.cz/tyrbach/Odpor_a_vodivost.pdf
- [44] Naše tramvaje a trolejbusy jsou stále úspornější [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.pmdp.cz/zabava/zajimavosti/nase-tramvaje-a-trolejbusy-jsou-stale-uspornejsi.aspx>
- [45] konzultace s Prof. Ing. Zdeňkem Vostrackým, DrSc., 2012

Seznam příloh

Příloha A – Vstupní hodnoty pro výpočet spotřeby	I
Příloha B – Dráhy a doby jednotlivých částí úseku	II
Příloha C – Měrný jízdní odpor 21 Tr, vypočtené koeficienty	II
Příloha D – Jízdní odpor vozu, setrvačnosti, tratě, tažná síla a potřebný tažný výkon při rozjezdu.....	III
Příloha E – Střední výkon 1. části úseku, spotřebovaná energie při rozjezdu.....	IV
Příloha F – Jízdní odpor vozidla, tratě, tažná síla a potřebný tažný výkon pro rovnoměrnou rychlost	IV
Příloha G – Spotřebovaná energie při rovnoměrné jízdě a za 1. a 2. část úseku.....	IV
Příloha H – Jízdní odpor vozidla při zpomalování, brzdná síla jízdních odporů.....	V
Příloha I – Kinetická energie trolejbusu, brzdná síla a energie jízdních odporů, energie k rekuperování	VI
Příloha J – Efektivně využitá rekuperovaná energie, celková spotřeba úseku.....	VI
Příloha K – Závislost výkonu motoru a potřebné tažné síly na rychlosti.....	VII
Příloha L – Porovnání energií v jednotlivých fázích jízdy	VIII
Příloha M – Schéma napájení trakčního vedení veřejné dopravy v Plzni	IX
Příloha N – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 13, nap. úsek č. 071	X
Příloha O – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 - cykly	XI
Příloha P – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 - rovina.....	XI
Příloha Q – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 – stoupání.....	XII
Příloha R – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 – klesání.....	XII
Příloha S – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 – počítaný úsek ...	XIII

Přílohy

Příloha A – Vstupní hodnoty pro výpočet spotřeby

		proměnné		
	tíhové zrychlení	g [m/s ²]	9,80665	
	zrychlení při rozjezdu	a_1 [m/s ²]	0,85	a_1 [km/h.s] 3,06
	zrychlení při brzdění	a_2 [m/s ²]	1	a_2 [km/h.s] 3,6
	rovnoměrná rychlost	v [km/h]	40	v [m/s] 11,11
čelní rozměry trolejbusu	šířka	\check{s} [m]	2,5	
	výška	v [m]	3,365	
	plocha	S [m ²]	8,41	
	hmotnost	m [t]	11,85	G 116,21
	součinitel tvaru skříně	c	0,8	
	dráha mezi zastávkami	s [m]	850	Pietas - Hřbitovní (linka č. 11)
	výškový rozdíl	h [m]	40	
	účinnost měniče, motoru	n	0,9	
	využití rekuperované energie	u	0,1	

Příloha B – Dráhy a doby jednotlivých částí úseku

	vzorec	hodnota	jednotka
doba pro dosažení požadované rychlosti	$t_1=v/a_1$	13,07	s
dráha potřebná pro zrychlení	$s_1=0,5 \cdot a_1 \cdot t_1^2$	72,62	m
doba pro úplné zastavení	$t_3=v/a_3$	11,11	s
dráha potřebná pro úplné zastavení	$s_3=v \cdot t_3 - 0,5 \cdot a_3 \cdot t_3^2$	61,73	m
dráha rovnoměrné jízdy	$s_2=s-s_1-s_3$	715,65	m
doba rovnoměrné jízdy	$t_2=s_2/v$	64,4	s

Příloha C – Měrný jízdní odpor $21 Tr$, vypočtené koeficienty

obecný tvar měrného jízdního odporu

$$P_0 = a + bV + cV^2 \text{ [N/kN, km/h]}$$

a	12
b	0,07
c	0,0057913

ξ	1,25
poměrná přírážka- reflektuje obsazení vozidla, setrvačnost rotačních dílů	

Příloha D – Jízdní odpor vozu, setrvačnosti, tratě, tažná síla a potřebný tažný výkon při rozjezdu

v [km/h]	P _o [N/kN]	P _a [N/kN]	P _s [N/kN]	F _t [kN]	P [kW]
1	12,08	108,34	47,06	19,46	5,41
2	12,16	108,34	47,06	19,47	10,82
3	12,26	108,34	47,06	19,48	16,24
4	12,37	108,34	47,06	19,50	21,66
5	12,49	108,34	47,06	19,51	27,10
6	12,63	108,34	47,06	19,53	32,54
7	12,77	108,34	47,06	19,54	38,00
8	12,93	108,34	47,06	19,56	43,47
9	13,10	108,34	47,06	19,58	48,95
10	13,28	108,34	47,06	19,60	54,45
11	13,47	108,34	47,06	19,62	59,96
12	13,67	108,34	47,06	19,65	65,49
13	13,89	108,34	47,06	19,67	71,04
14	14,12	108,34	47,06	19,70	76,61
15	14,35	108,34	47,06	19,73	82,20
16	14,60	108,34	47,06	19,76	87,80
17	14,86	108,34	47,06	19,79	93,44
18	15,14	108,34	47,06	19,82	99,09
19	15,42	108,34	47,06	19,85	104,77
20	15,72	108,34	47,06	19,89	110,47
21	16,02	108,34	47,06	19,92	116,21
22	16,34	108,34	47,06	19,96	121,97
23	16,67	108,34	47,06	20,00	127,76
24	17,02	108,34	47,06	20,04	133,58
25	17,37	108,34	47,06	20,08	139,43
26	17,73	108,34	47,06	20,12	145,31
27	18,11	108,34	47,06	20,16	151,23
28	18,50	108,34	47,06	20,21	157,18
29	18,90	108,34	47,06	20,26	163,17
30	19,31	108,34	47,06	20,30	169,19
31	19,74	108,34	47,06	20,35	175,26
32	20,17	108,34	47,06	20,40	181,36
33	20,62	108,34	47,06	20,45	187,50
34	21,07	108,34	47,06	20,51	193,69
35	21,54	108,34	47,06	20,56	199,92
36	22,03	108,34	47,06	20,62	206,19
37	22,52	108,34	47,06	20,68	212,50
38	23,02	108,34	47,06	20,73	218,86
39	23,54	108,34	47,06	20,79	225,27
40	24,07	108,34	47,06	20,86	231,73

Příloha E – Střední výkon 1. části úseku, spotřebovaná energie při rozjezdu

střední výkon	
$P_{1\text{usek}}$ [kW]	115,17

spotřebovaná energie na 1. úsek

$W_{1\text{usek}}$ [kWs]	1672,78
$W_{1\text{usek}}$ [kWh]	0,46

Příloha F – Jízdní odpor vozidla, tratě, tažná síla a potřebný tažný výkon pro rovnoměrnou rychlost

v [km/h]	P_o [N/kN]	P_s [N/kN]	F_t [kN]	P [kW]
40	24,07	47,06	8,27	91,84

Příloha G – Spotřebovaná energie při rovnoměrné jízdě a za 1. a 2. část úseku

spotřebovaná energie na 2. úsek

$W_{2\text{usek}}$ [kWs]	6572,32
$W_{2\text{usek}}$ [kWh]	1,83

spotřeba energie za dvě části jízdy	
W_{1+2} [kWh]	2,29

Příloha H – Jízdní odpor vozidla při zpomalování, brzdná síla jízdních odporů

v [km/h]	P _o [N/kN]	P _a [N/kN]	P _s [N/kN]	F _b [kN]
40	24,07	-127,46	47,06	-6,55
39	23,54	-127,46	47,06	-6,61
38	23,02	-127,46	47,06	-6,67
37	22,52	-127,46	47,06	-6,73
36	22,03	-127,46	47,06	-6,78
35	21,54	-127,46	47,06	-6,84
34	21,07	-127,46	47,06	-6,89
33	20,62	-127,46	47,06	-6,95
32	20,17	-127,46	47,06	-7,00
31	19,74	-127,46	47,06	-7,05
30	19,31	-127,46	47,06	-7,10
29	18,90	-127,46	47,06	-7,15
28	18,50	-127,46	47,06	-7,19
27	18,11	-127,46	47,06	-7,24
26	17,73	-127,46	47,06	-7,28
25	17,37	-127,46	47,06	-7,33
24	17,02	-127,46	47,06	-7,37
23	16,67	-127,46	47,06	-7,41
22	16,34	-127,46	47,06	-7,44
21	16,02	-127,46	47,06	-7,48
20	15,72	-127,46	47,06	-7,52
19	15,42	-127,46	47,06	-7,55
18	15,14	-127,46	47,06	-7,58
17	14,86	-127,46	47,06	-7,62
16	14,60	-127,46	47,06	-7,65
15	14,35	-127,46	47,06	-7,68
14	14,12	-127,46	47,06	-7,70
13	13,89	-127,46	47,06	-7,73
12	13,67	-127,46	47,06	-7,75
11	13,47	-127,46	47,06	-7,78
10	13,28	-127,46	47,06	-7,80
9	13,10	-127,46	47,06	-7,82
8	12,93	-127,46	47,06	-7,84
7	12,77	-127,46	47,06	-7,86
6	12,63	-127,46	47,06	-7,88
5	12,49	-127,46	47,06	-7,89
4	12,37	-127,46	47,06	-7,91
3	12,26	-127,46	47,06	-7,92
2	12,16	-127,46	47,06	-7,93
1	12,08	-127,46	47,06	-7,94

Příloha I – Kinetická energie trolejbusu, brzdná síla a energie jízdních odporů, energie k rekuperování

kinetická energie rozjetého trolejbusu

W_{kin} [kJ]	914,35
----------------	--------

střední brzdná síla jízdních odporů
--

F_{b03} [kN]	-7,41
----------------	-------

střední brzdná energie

W_b [kJ]	-457,40
------------	---------

zbylá rekuperovatelná energie

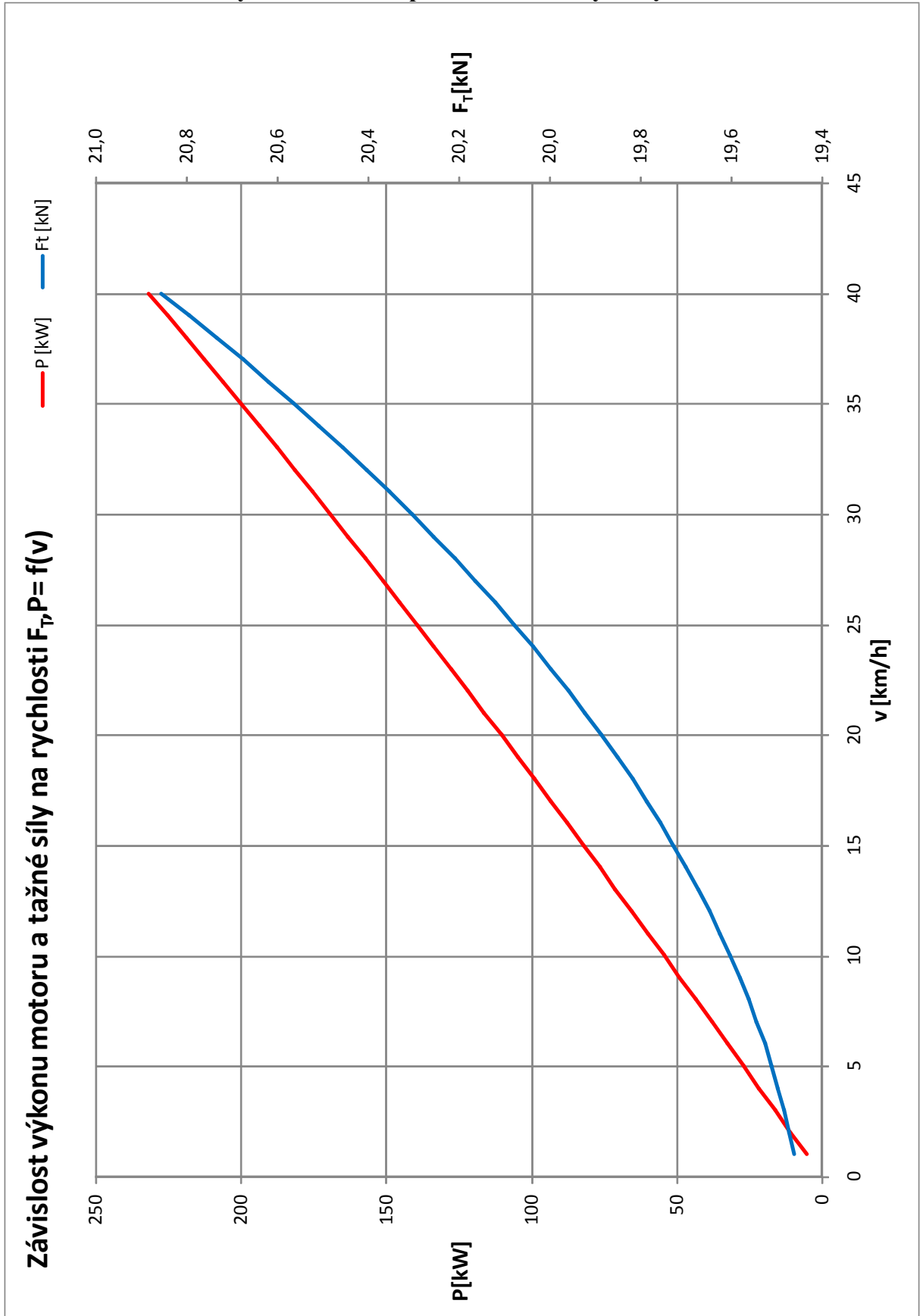
W_{rek} [kJ]	1371,75
W_{rek} [kWh]	0,34

Příloha J – Efektivně využitá rekuperovaná energie, celková spotřeba úseku

W_{zrek} [kWh]	0,03
------------------	------

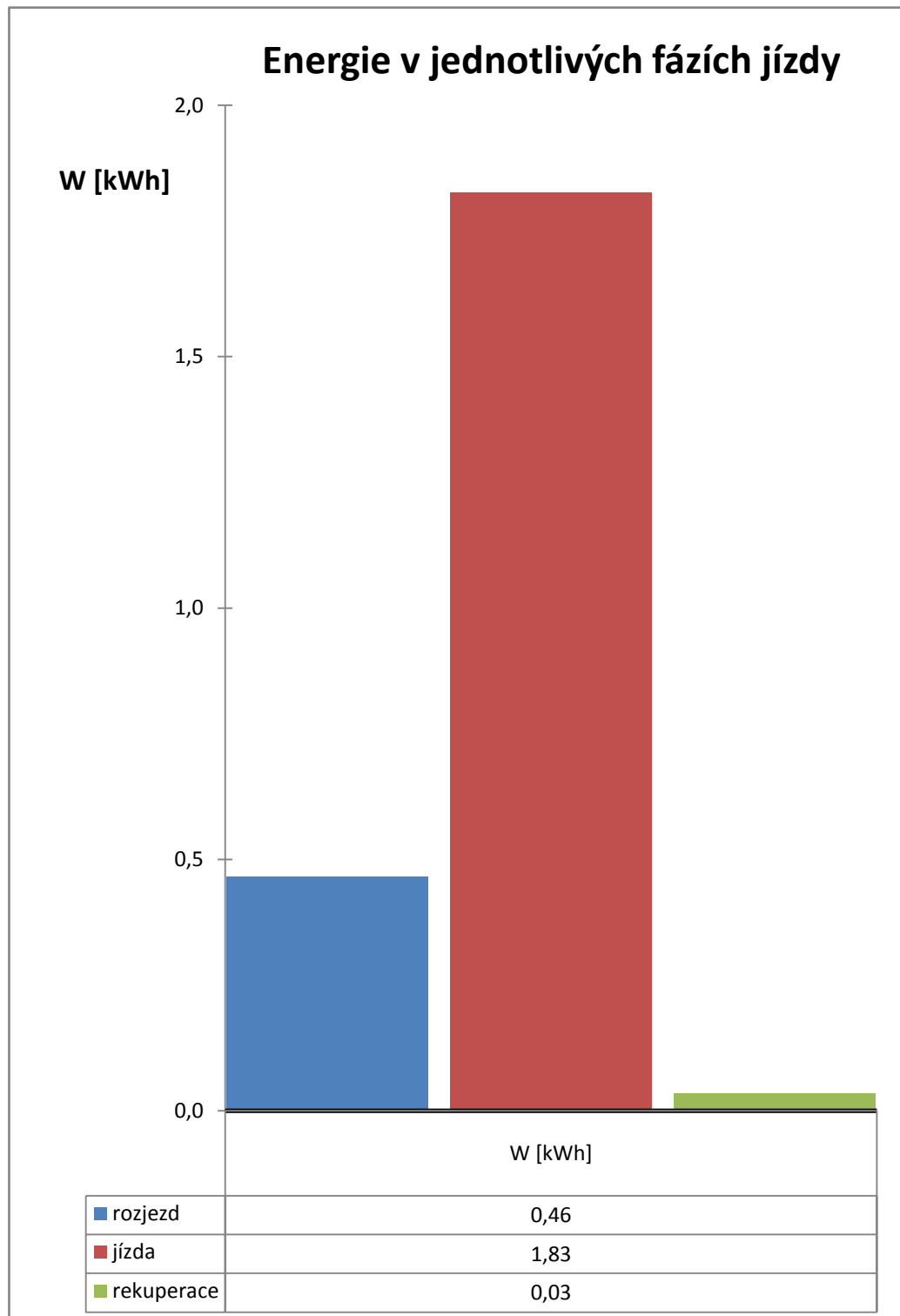
celková spotřeba	
W_{celk} [kWh]	2,26

Příloha K – Závislost výkonu motoru a potřebné tažné síly na rychlosti

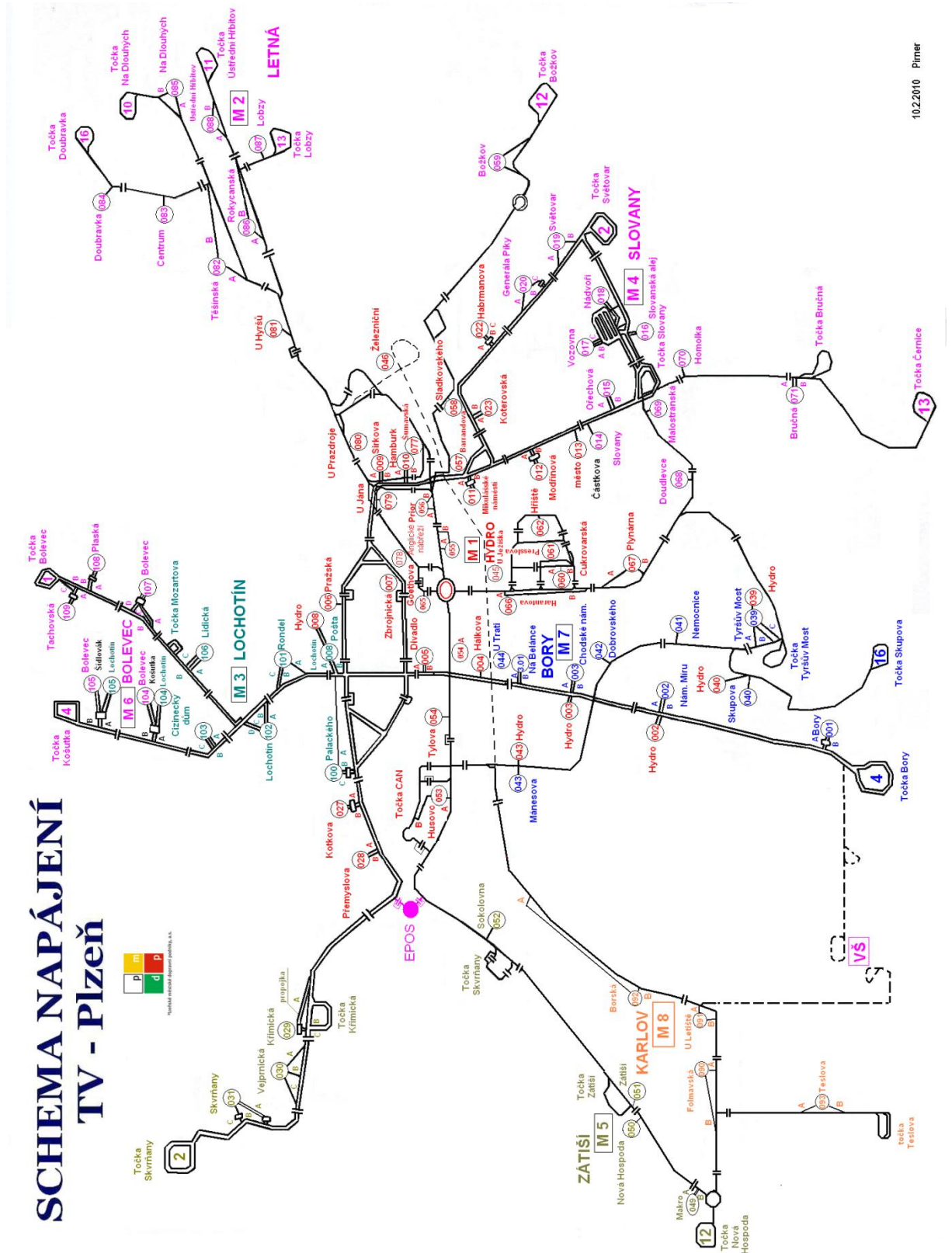


Příloha L – Porovnání energií v jednotlivých fázích jízdy

- jedná se o počítaný stoupající úsek, který má délku 850 m

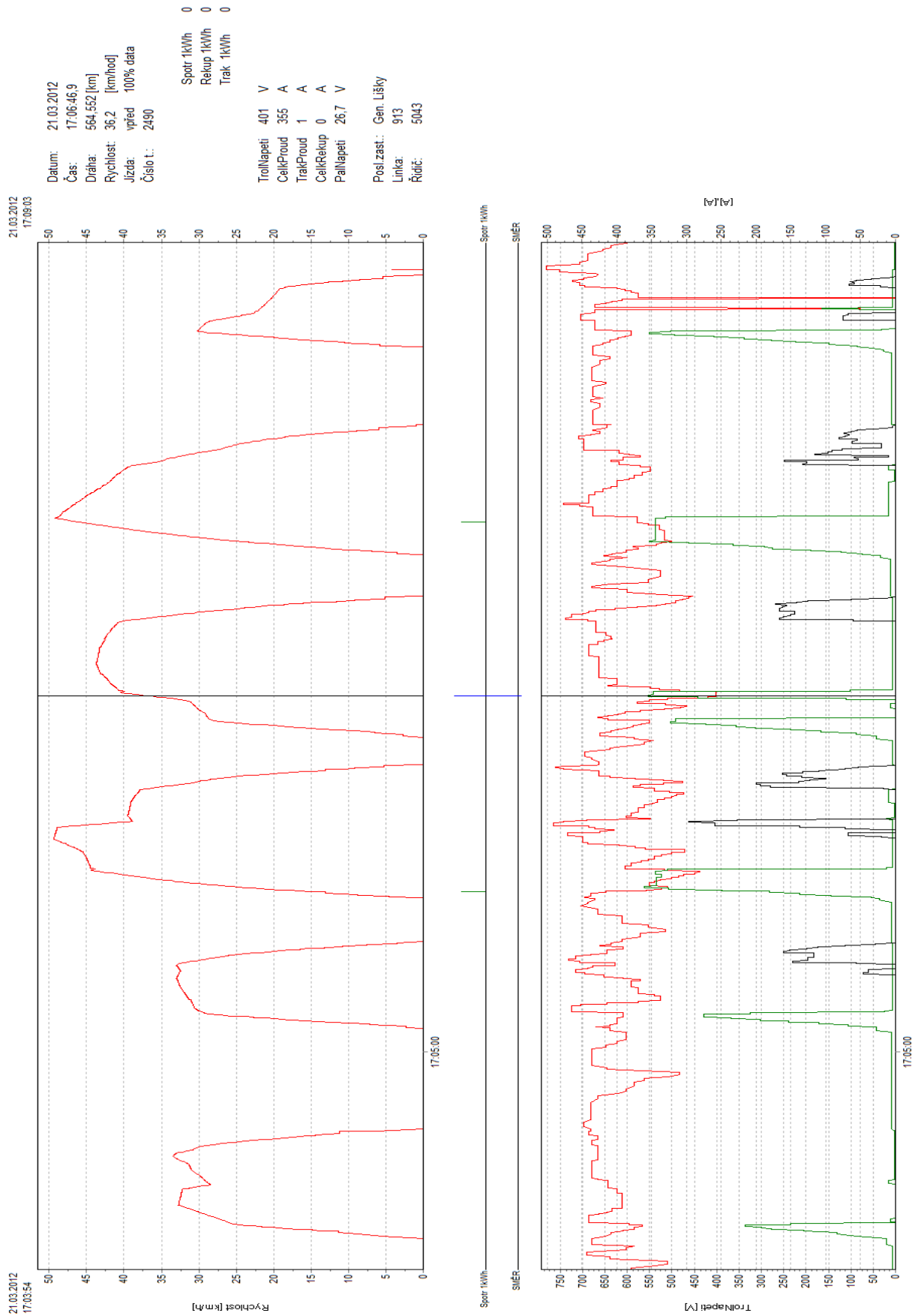


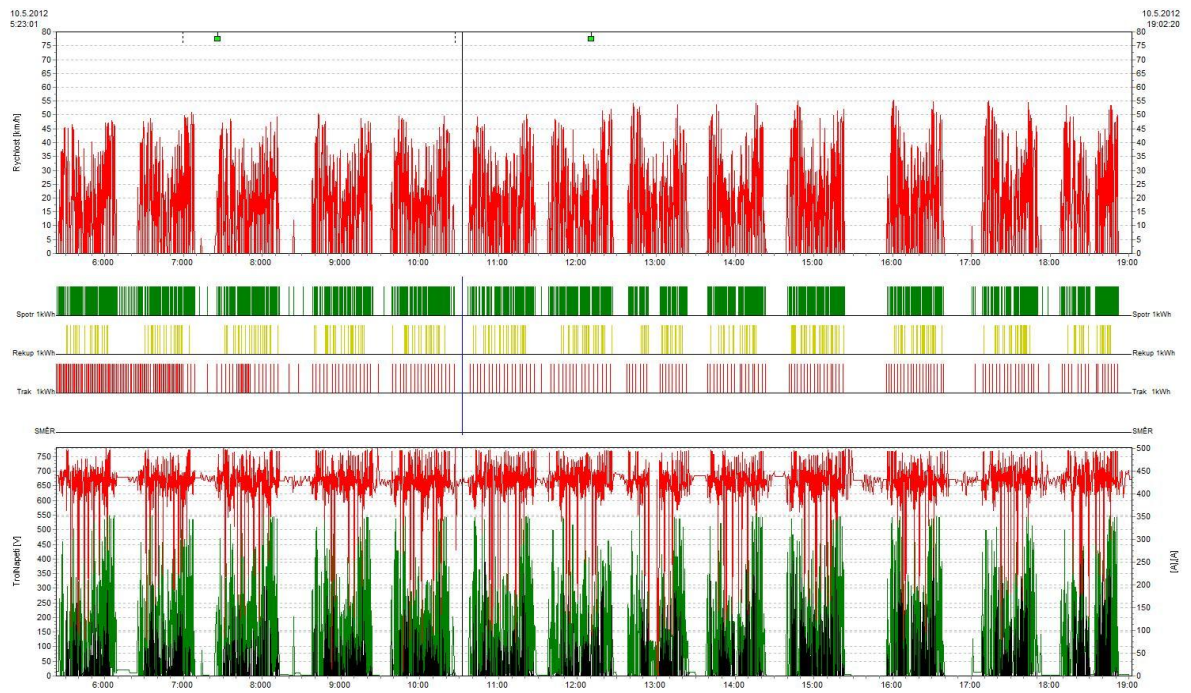
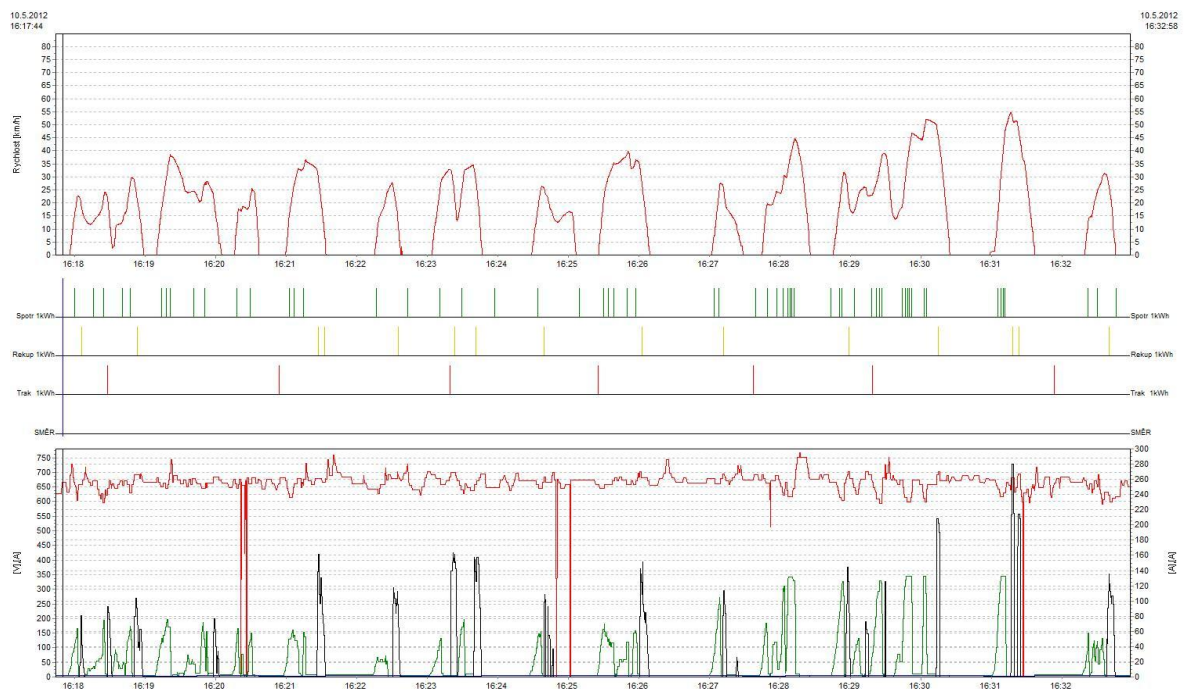
Příloha M – Schéma napájení trakčního vedení veřejné dopravy v Plzni



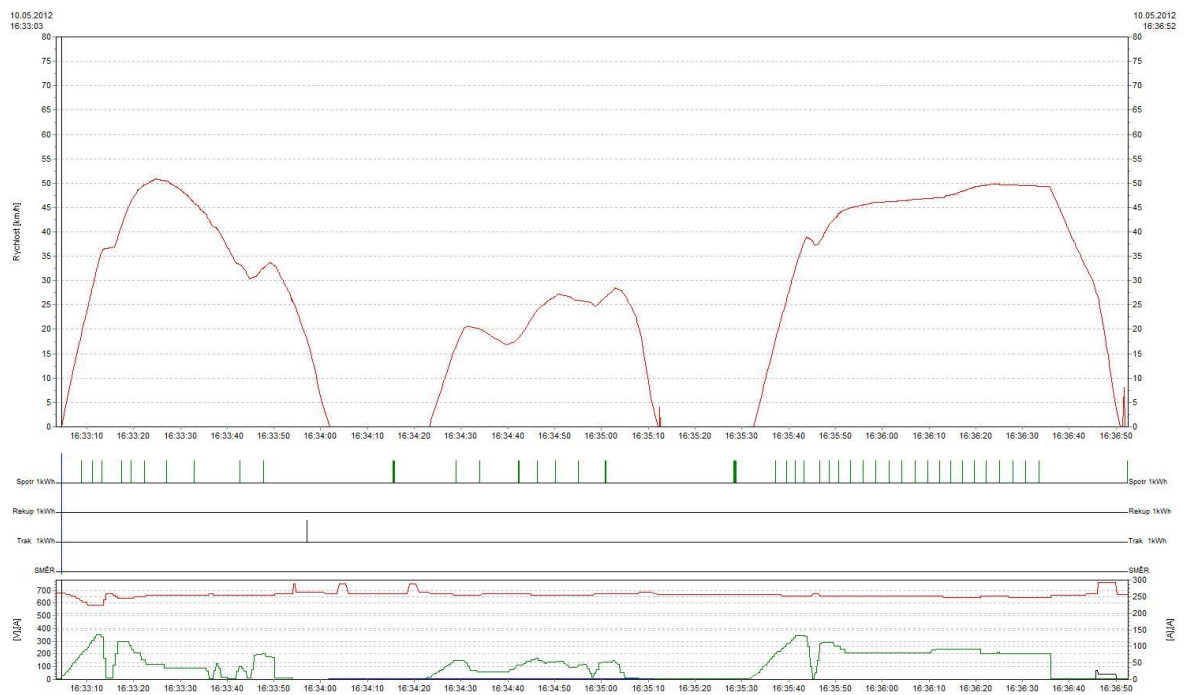
10.2.2010 Pimer

Příloha N – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 13, nap. úsek č. 071

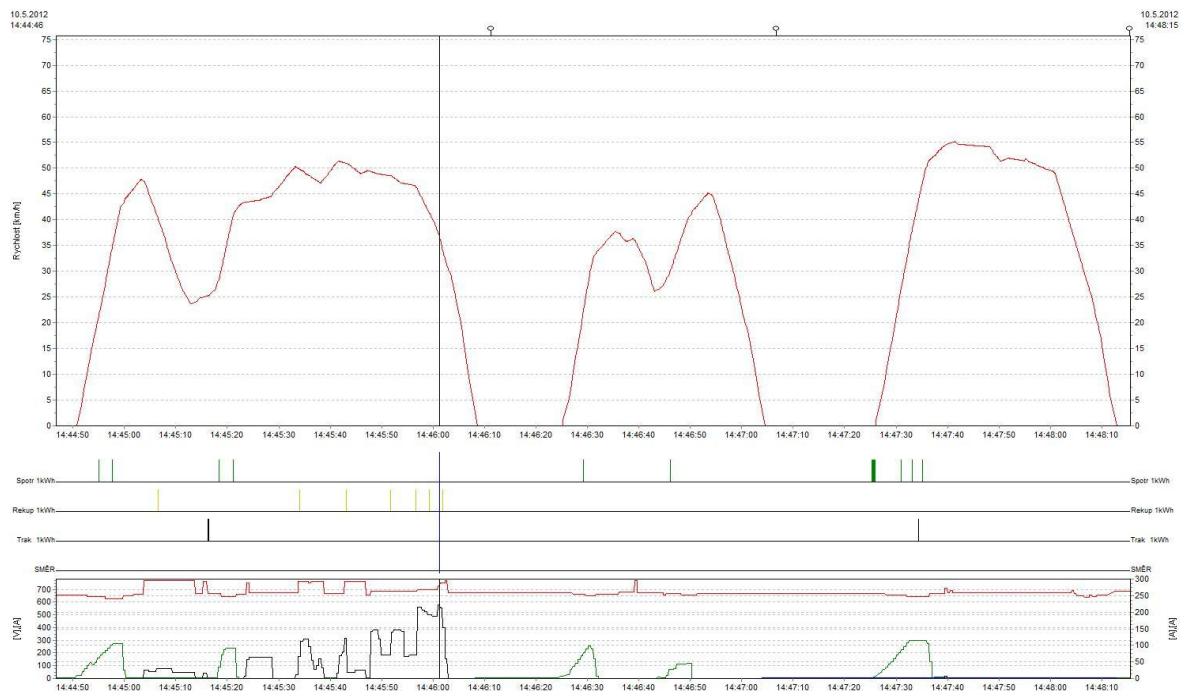


Příloha O – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 - cykly**Příloha P – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 - rovina**

Příloha Q – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 – stoupání



Příloha R – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 – klesání



Příloha S – Záznam jízdy trolejbusu 21 Tr ev. č. 490 na lince č. 11 – počítaný úsek

