

Kalibrace modelu trakčního vedení

Pracoviště: RICE, KEV
Číslo dokumentu: 22190 – 015 – 2024
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Jakub Ševčík, Jan Přikryl
Vedoucí projektu: Dr. Jan Přikryl
Počet stran: 26
Datum vydání: 12. 11. 2024
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering,
Information engineering - Electrical and electronic
engineering

Zadavatel / zákazník:

Ve spolupráci s:
PMDP, a.s.
ŠKODA Electric, a.s.

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Jakub Ševčík
tel. 377634180
jsevcik@rice.zcu.cz

Tato zpráva vznikla s podporou studentského projektu SGS-2024-017.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá kalibrací modelu trolejového vedení použitého pro potřeby simulace jízdy trolejbusů v simulačním nástroji Eclipse SUMO. Zpráva analyzuje vybraná měřená data získaná při rozjezdech vozů ze zastávky za účelem vyhodnotit a porovnat skutečný (tj. měřený) pokles napětí při rozjezdu se simulačními výsledky získanými z modelu využívající Eclipse SUMO a původní parametrizaci navrhnoutou pro interní potřeby.

Klíčová slova

Eclipse SUMO, kalibrace, trakční měnírna, úbytek napětí

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Calibration of traction overhead wire model

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with the calibration of the overhead wire model used for the purposes of simulating the running of trolleybuses in the Eclipse SUMO simulation tool. The report analyzes selected measured data obtained when cars start from stops in order to evaluate and reconcile the actual (i.e. measured) voltage drop at start with the simulation results obtained from the model using Eclipse SUMO and the original parameterization designed for internal needs.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Eclipse SUMO, calibration, traction substation, voltage drop

Seznam symbolů a zkratek

CF	Car Following
PMDM	Plzeňské Městské Dopravní Podniky, a.s.
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TV	Trolejové Vedení

Obsah

1	ÚVOD	5
2	ROZJEZD ZE ZASTÁVKY “U STARÉ KOVÁRNY”	5
2.1	MĚŘENÁ DATA	6
2.2	SROVNÁNÍ SE SIMULACÍ – VÝCHOZÍ STAV	7
2.3	SROVNÁNÍ SE SIMULACÍ – MODIFIKACE MODELU MĚNÍRNY	9
2.4	SROVNÁNÍ SE SIMULACÍ – MODIFIKACE MODELU MĚNÍRNY A PARAMETRIZACE CF MODELU	10
3	ROZJEZD ZE ZASTÁVKY “NÁDRAŽÍ SLOVANY”	11
3.1	SROVNÁNÍ SE SIMULACÍ – MODIFIKACE MODELU MĚNÍRNY A PARAMETRIZACE CF MODELU	11
3.2	FINÁLNÍ MODIFIKACE MODELU MĚNÍRNY	14
3.3	SROVNÁNÍ SE SIMULACÍ – FINÁLNÍ KALIBROVANÝ MODEL	14
4	PRŮMĚRNÉ NAPĚTÍ NA TROLEJI	15
5	VLIV NAPĚTÍ TRAKČNÍCH MĚNÍREN NA ZTRÁTY VE VEDENÍ – 600 VS 750 V	15
5.1	ZÍSKANÉ PRŮBĚHY ZTRÁT VEDENÍM	15
5.2	ZÍSKANÉ PRŮBĚHY ZTRÁT VEDENÍM (ZMĚNA V PARAMETRIZACI ZRYCHLENÍ A Σ)	16
5.3	ZÍSKANÉ PRŮBĚHY ZTRÁT VEDENÍM (ZMĚNA V PARAMETRIZACI TROLEJE – 100 MM ²)	19
5.3.1	<i>Ověření modelu měnirny při použití troleje o průřezu 100 mm²</i>	<i>21</i>
5.4	DÍLČÍ ZÁVĚR	22

1 Úvod

Simulátor Eclipse SUMO společně s modelem napájecí sítě byl pro vyhodnocování a posuzování jízdy trolejbusů ve městě Plzni v minulosti kalibrován na datech spotřeby [1], kdy kalibrace zohledňovala především jízdní odpory vozidla měřené výrobcem, tj. společností ŠKODA Electric, a celkovou energetickou spotřebu/bilanci na trasách linky 12 a 13 získanou z dat naměřenými tachografy, kterými jsou vozidla PMDP vybavena.

Tato výzkumná zpráva se zaměřuje na kalibraci modelu napájecí sítě, neboť se ukázalo, že získané simulační výsledky energetických ztrát na trolejovém vedení neodpovídají reálně předpokládaným ztrátám, které mohou dosahovat řádově vyšší jednotky až nižší desítky procent z odebrané energie, většinou pod hranici 10 % [2].

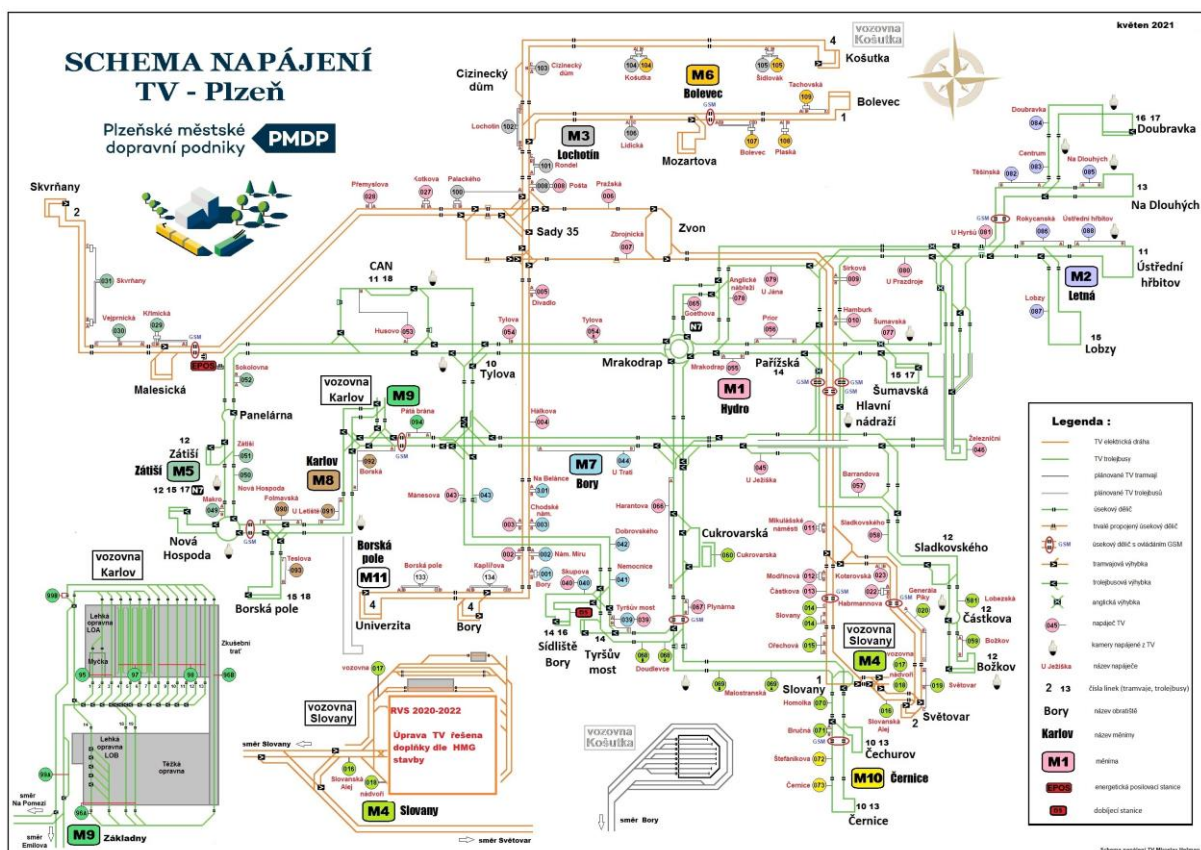
2 Rozjezd ze zastávky „U Staré Kovárny“

Simulační výsledky získané ze simulátoru Eclipse SUMO byly porovnány s měřenými daty na příkladu rozjezdu trolejbusu 26Tr na lince PMDP č. 13 ze zastávky „U Staré kovárny“ směrem do zastávky „Černice“.

Tento úsek byl mj. vybrán z následujících důvodů:

- jedná se o úsek na periferii města, kde je provoz vozidel připojených na trakční úsek nižší, a tedy je nižší pravděpodobnost, že se ve sledovaném okamžiku na úseku nachází více vozidel, které by ovlivňovaly napětí na trolej u sledovaného vozidla,
- vybraný úsek je „do kopce“ a tak se předpokládá, že výkonové požadavky trolejbusu budou vyšší a napěťové úbytky na troleji při rozjezdu tak patrnější,
- zastávka „U Staré kovárny“ je dopravně řešena jako zastávka na jízdním pruhu s fyzickým oddělením (zátka) a tak lze předpokládat, že samotný rozjezd trolejbusu ihned po vyjetí ze zastávky nebude ovlivněn okolní dopravou,
- jedná se o úsek, na který trolejbus vjíždí pravděpodobně již s nabitou baterií a výkonové požadavky tak nejsou ovlivněny nabíjením baterie.

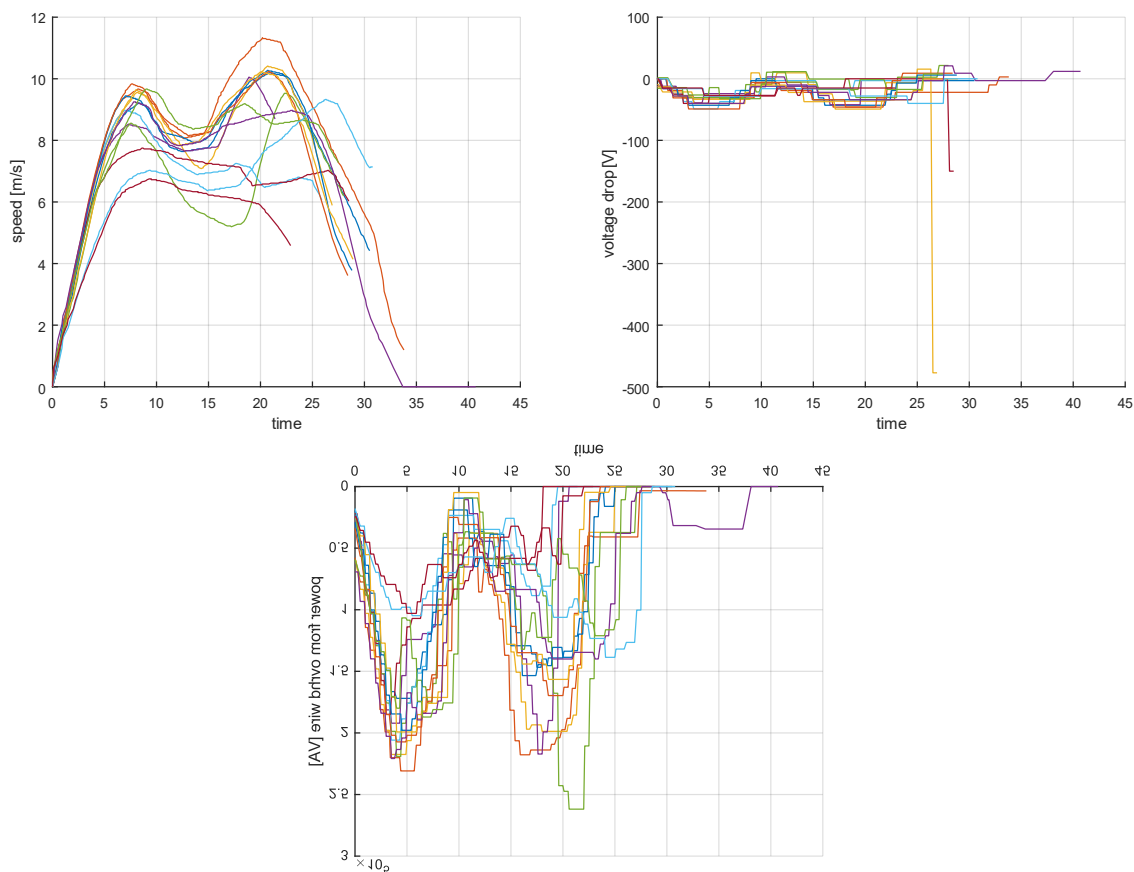
Pro analýzu byly vybrány reprezentativní průjezdy na daném úseku zaznamenány v záznamu tachografu LG2572 z 6.12.2017. Poznamenejme, že v roce 2016 byla dokončena rekonstrukce napájecí sítě a komunikace na daném úseku. Předpokládáme, že v prosinci roku 2017 již byla zprovozněná měnící Černice a stav trolejové sítě v Černicích odpovídal stavu použitým v simulacích, tj. stavu zachyceném na schématu napájení TV z května 2021 (Obrázek 1), respektive stavu r. 2023.



Obrázek 1: Schéma trolejového vedení v Plzni v května 2021 (zdroj: PMDP).

2.1 Měřená data

Ručně byly vybrány takové průjezdy, kdy odběr z troleje nebyl zatížen výkonovými požadavky jiných vozů než sledovaným. Na Obrázku 2 můžeme vidět měřenou rychlost vozů po vyjetí ze zastávky U Staré Kovárny, měřený odběr výkonu z troleje a měřený pokles napětí na troleji.

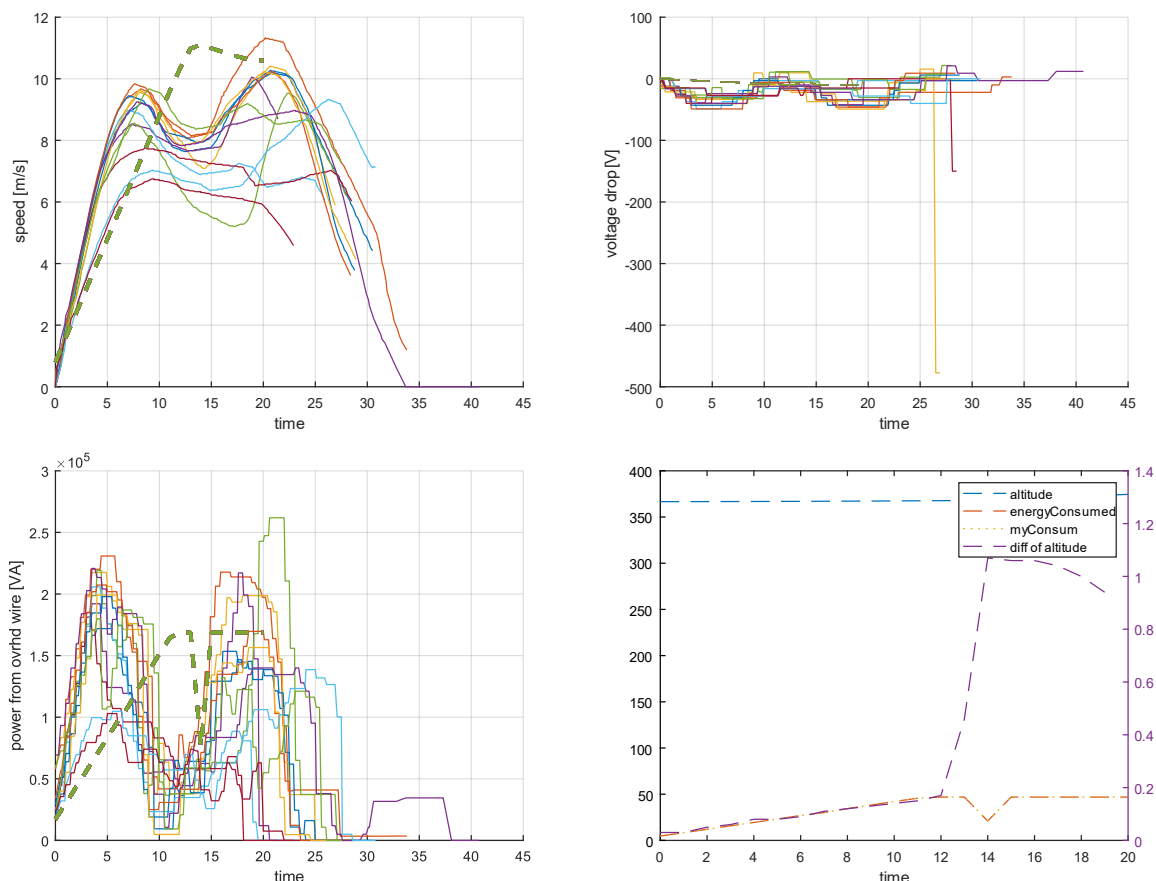


Obrázek 2: Měřená data, výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost, úbytek napětí na troleji, výkon z troleje

2.2 Srovnání se simulací – výchozí stav

S naměřenými daty srovnáme výsledek ze simulace, kdy parametrizace vozidla je obdobná jako v [1]. Důraz bude brán především na vývoj sledovaných veličin po dobu prvních cca 5-7 s po rozjezdu ze stanice, kdy je zachována zrychlující charakteristika vozidla trolejbusu.

Na Obrázku 3 můžeme vidět měřenou a simulovanou rychlost vozů po vyjetí ze zastávky U Staré Kovárny, měřený a simulovaný odběr výkonu z troleje a měřený a simulovaný pokles napětí na troleji. Simulované průběhy jsou znázorněny přerušovanou tlustou čarou. Navíc je u Obrázku 3 ještě znázorněn čtvrtý graf vykreslující modelovanou nadmořskou výšku na dané poloze vozidla v čase, z ní vypočtený sklon (respektive diferenci výšky) a simulovanou energetickou spotřebu vozidla.



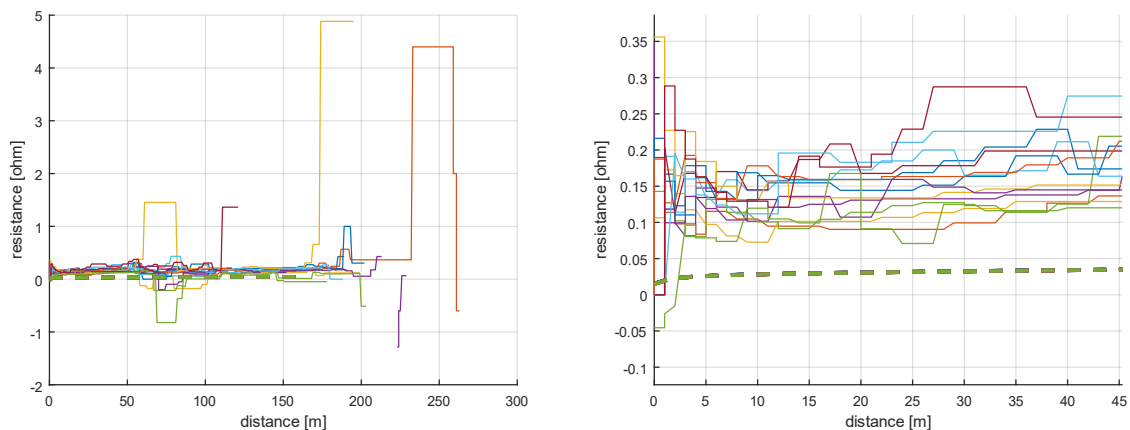
Obrázek 3: Měřená data a simulační výsledek (přerušovanou čarou), výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost, úbytek napětí na troleji, výkon z troleje. Čtvrtý graf znázorňuje modelovanou nadmořskou výšku na úseku v čase. Výchozí stav

Ze srovnání průběhů získaného simulací s reálně měřenými daty je patrné, že rychlost (zrychlení) odpovídá prvních cca 7 s nejnižším měřeným hodnotám (modrá, červená křivka v grafu na Obrázku 3), požadavek na výkon je v tomto případě jen lehce podhodnocen. Toto podhodnocení je pravděpodobně možné vysvětlit odlišným (nižším) sklonem vozovky na sledovaném úseku v simulátoru než dosahuje sklon skutečné silnice. Jedním z důvodů, proč k této odchylce v modelu dochází je nemožnost modelovat v simulátoru Eclipse SUMO křižovatku „do kopce“. Nejvýraznější rozdíl mezi simulačními výsledky a měřenými daty je však ve velikosti poklesu napětí na troleji, kdy simulované úbytky jsou výrazně nižší než měřené.

Pro získání detailnějšího vhledu do této problematiky byl vykreslen odpor troleje na daném úseku vyčíslený jako

$$R(t) = \frac{U_{nom} - U(t)}{I(t)},$$

kde U_{nom} je aproximované nominální napětí měřírny získané z naměřených dat jako průměr měřených napětí troleje při stání trolejbusu v zastávce, kdy proudový odběr trolejbusu z troleje je ve srovnání s rozjezdem téměř zanedbatelný. $U(t)$ a $I(t)$ jsou pak měřená napětí a proudy při rozjezdu závislá na časovém okamžiku měření. Takto získaný odpor troleje jak z měřených dat, tak ze simulačních výsledků, je vykreslen na Obrázku 4, kde je znatelné podhodnocení odporu troleje v simulačních výsledcích.

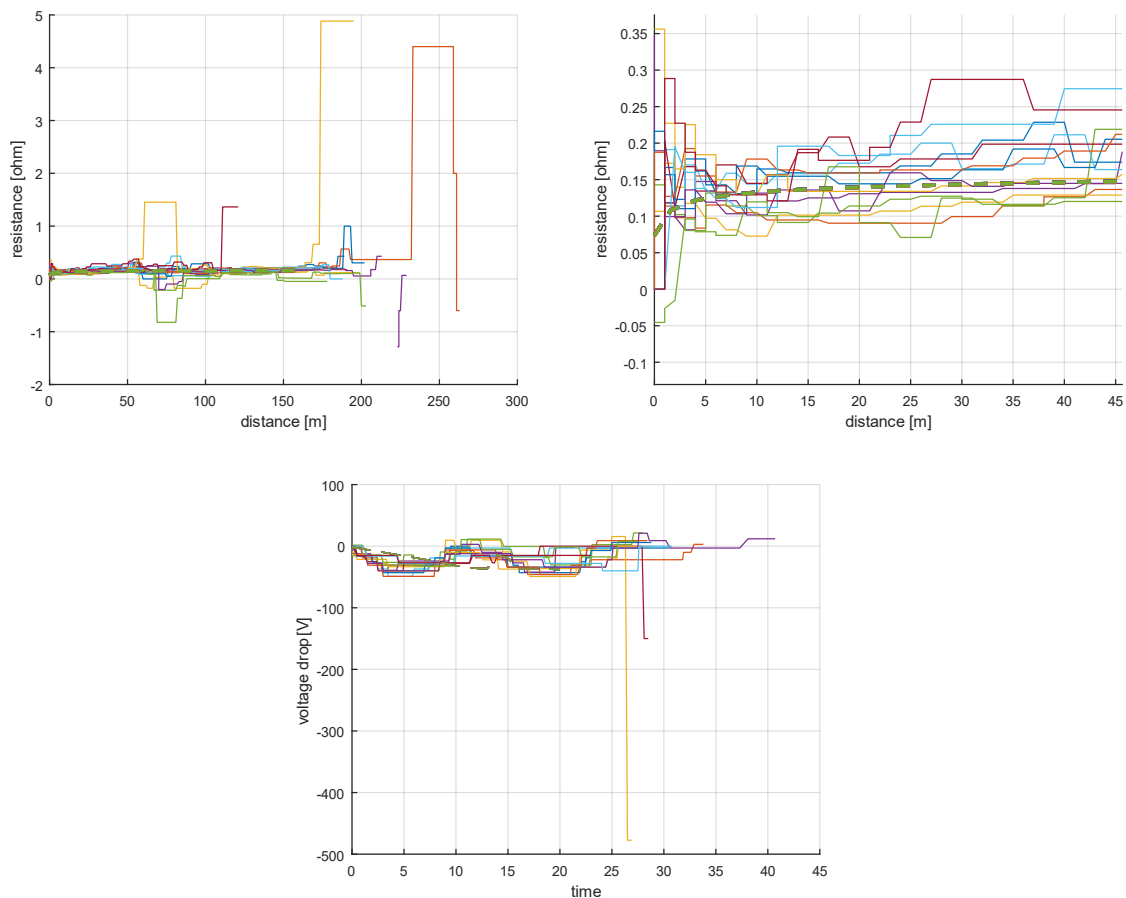


Obrázek 4: Odpor troleje z měřených dat (plné čáry) simulačních výsledků (přerušovanou čarou), výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost. Druhý graf znázorňuje detailní pohled na prvních 45 m úseku. Výchozí stav.

2.3 Srovnání se simulací – modifikace modelu měřírny

Tento rozdíl je možné v simulačním modelu vykompenzovat přidáním sériového odporu (o hodnotě 0.12Ω) ke zdroji napětí reprezentující měřírnu. Takto upravený model lépe reprezentuje reálný napěťový zdroj.

Hodnoty odporu a úbytku napětí na troleji jsou pro takto upravený model trolejové sítě znázorněny na Obrázku 5.



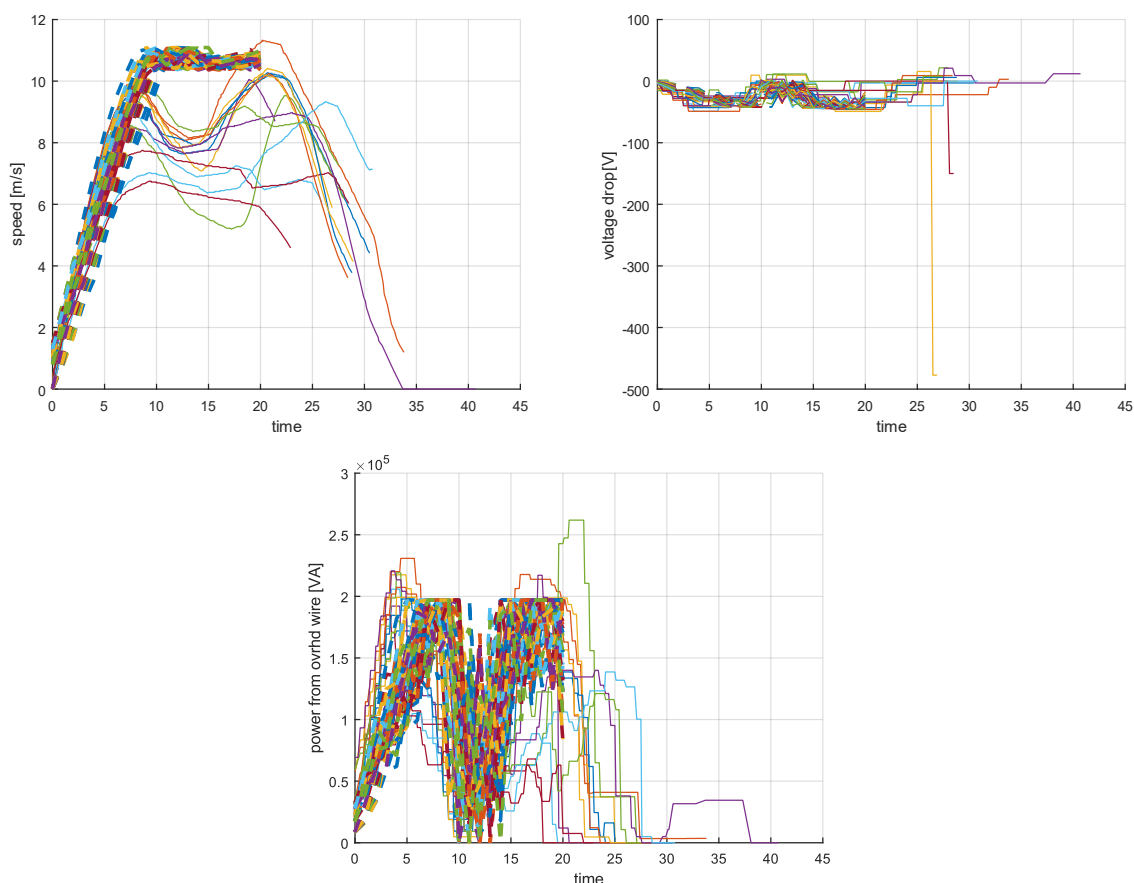
Obrázek 5: Odpor troleje z měřených dat (plné čáry) a simulačních výsledků (přerušované čáry), úbytky napětí na troleji, výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost. S využitím modifikace modelu měřírny.

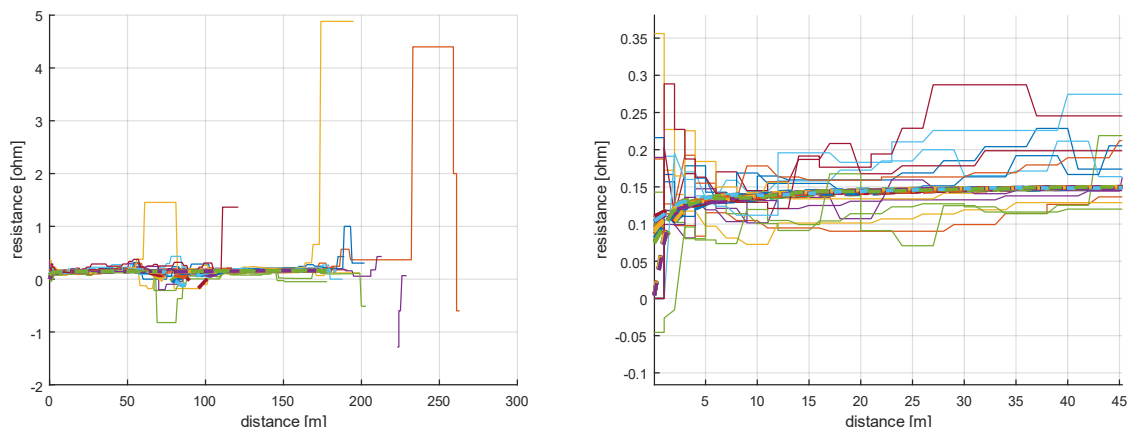
2.4 Srovnání se simulací – modifikace modelu měřírny a parametrizace CF modelu

Závěrem ještě provedeme změnu parametrizace car following modelu trolejbusu, aby simulační výsledky lépe odpovídaly měřeným datům z hlediska průběhu rychlosti a výkonových požadavků. Maximální zrychlení trolejbusu bude zvýšeno z 0.8 na 1.4 m/s², variance tohoto zrychlení, respektive parametr σ vstupující do CF modelu, nastaven z hodnoty 0 na hodnotu 0.5.

Navíc byla opravena chybná implementace výpočtu požadovaného výkonu, kdy v implementaci řešiče Eclipse SUMO byl maximálním výkonem motoru limitován maximální příkon (z tohoto důvodu je patrná na Obrázku 2 chybná limitní hodnota kolem 170 kW). Operace násobení/dělení výkonu účinností byla v implementaci Eclipse SUMO nově upravena (tj. vynechána) neboť maximální výkon je výkon motoru (nikoliv příkon), který je přímo přenášén na kola (pouze se ztrátami na hřídeli – uvažována účinnost zde pro jednoduchost 1.0).

Simulační výsledky získané s upravenou parametrizací modelu a upravenou implementací výpočtu požadovaného výkonu z troleje v Eclipse SUMO jsou znázorněny na Obrázku 6.





Obrázek 6: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost, úbytek napětí na troleji, výkon z troleje, odpor troleje a detail průběhu na začátku sledovaného úseku. S využitím modifikace modelu měřírny a změnou parametrizace CF modelu.

3 Rozjezd ze zastávky “Nádraží Slovany”

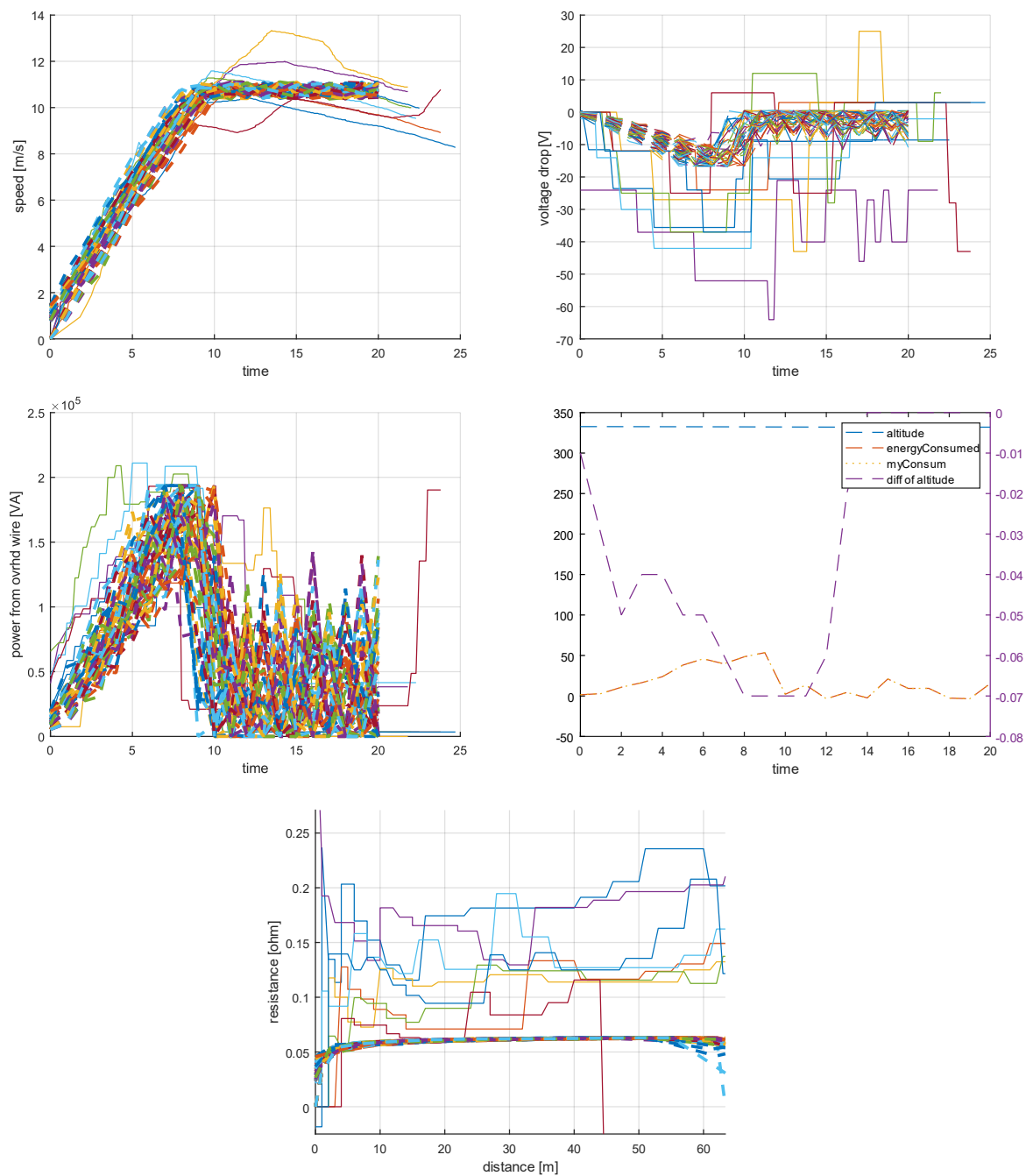
Dále provedeme validaci upraveného modelu dle kapitoly 2.4 na datech rozjezdu trolejbusů z zastávky Nádraží Slovany (dříve Částkova) směrem konečná zastávka Božkov na lince č. 12 PMDP. Využity budou stále jen vybrané záznamy tachografu LG2572 ze 6.12.2017.

3.1 Srovnání se simulací – modifikace modelu měřírny a parametrizace CF modelu

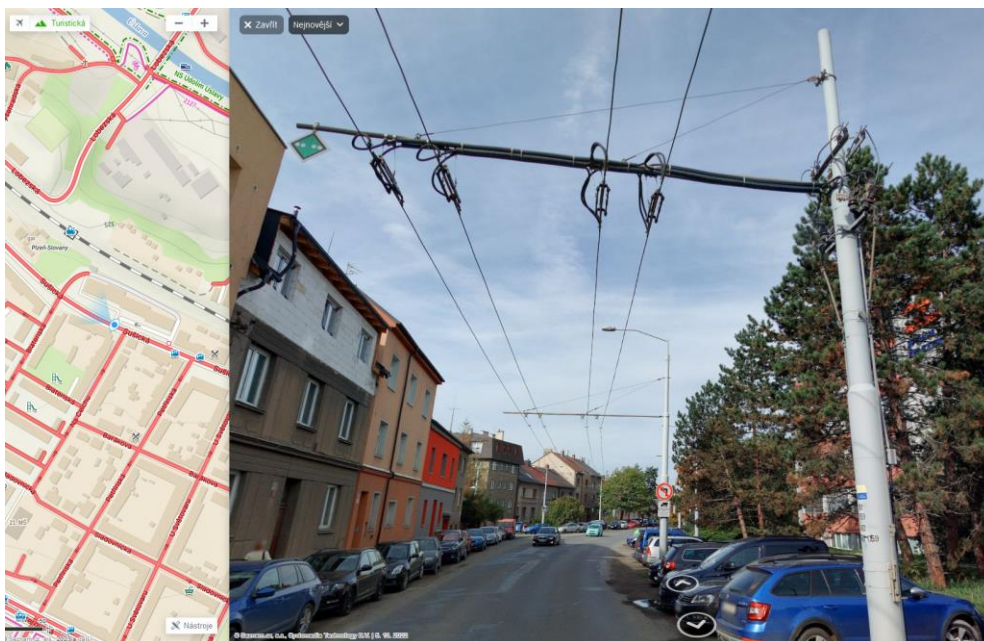
Na Obrázku 7 jsou znázorněny měřené průběhy a simulační výsledky opět zohledňující rychlost vozidla, výkonové požadavky na trolejové vedení, úbytek napětí na troleji a odpor vedení.

Zrychlení (resp. rychlost) i výkony z troleje vypadají se relativně shodují s měřenými daty, ale modelovaný pokles napětí na troleji je nízký. To je patrné i z odporu, kdy modelovaný odpor vedení se pohybuje kolem hodnoty 0.05Ω a nikdy nedosáhne hodnoty 0.12Ω , což je hodnota sériového odporu u napěťového zdroje modelující trakční měřírnu. Důvodem tohoto jevu je, že historicky je v Eclipse SUMO napěťovým zdrojem modelováno samotné připojení měřírny k trakčnímu vedení, tj. napájecí bod, a nikoliv měřírna samotná.

Vzhledem k tomu, že na sledovaném trakčním úseku Lobežská jsou zahrnuty v modelu celkově 3 napájecí body, zjednodušeně je možné přijmout úvahu, že jsou na napěťovém zdroji 3 paralelně připojené odpory 0.12Ω , tedy výsledný odpor je $0.12/3 \Omega$. Tedy takto simulovaná měřírna neodpovídá skutečnosti.



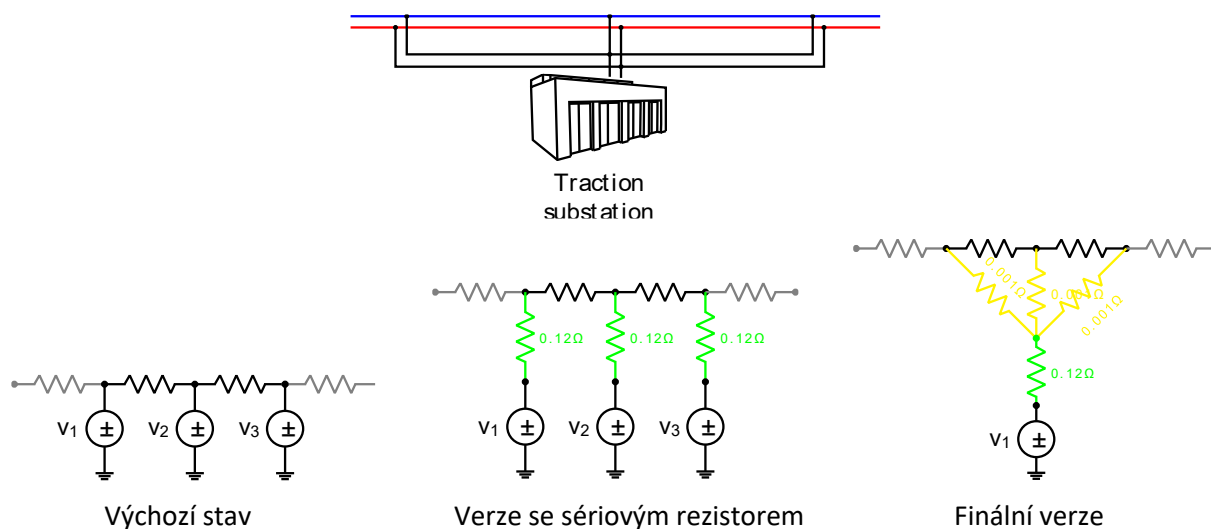
Obrázek 7: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze zastávky Nádraží Slovany: rychlost, úbytek napětí na troleji, výkon z troleje, sklon vozovky (model), odpor troleje na začátku sledovaného úseku. S využitím zjednodušené modifikace modelu měnícího a změnou parametrizace CF modelu.



Obrázek 8: Připojné body na úseku Lobežská. K pořízení těchto snímků byla využita webová stránka www.mapy.cz.

3.2 Finální modifikace modelu měřírny

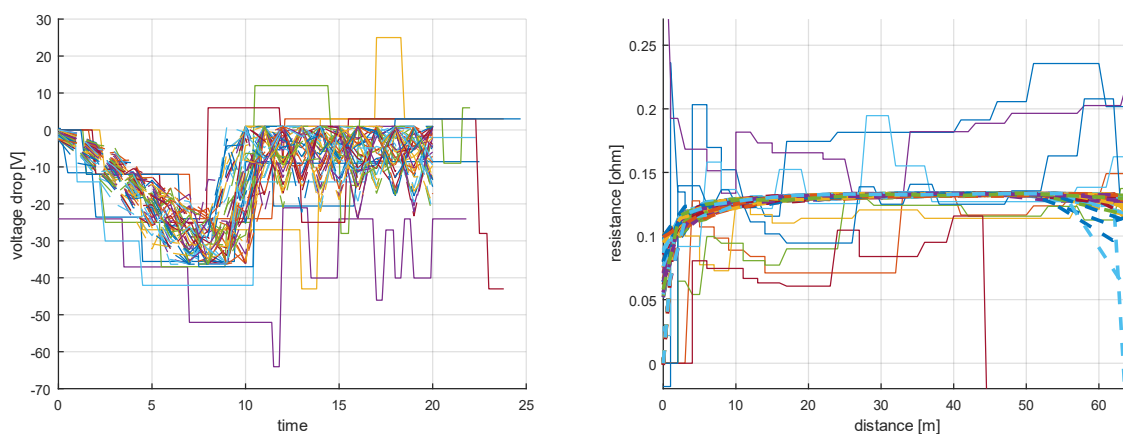
Kvůli nedostatečné schopnosti upraveného modelu trolejového vedení správně reprezentovat napájecí body byl přijat finální model trolejového vedení s jedním napětovým zdrojem a sériovým odporem a dále rozvětvením s odpory o zanedbatelné hodnotě $0.001\ \Omega$, jak je znázorněno na Obrázku 9.



Obrázek 9: Vývoj modelu trakční měřírny v této zprávě.

3.3 Srovnání se simulací – finální kalibrovaný model

Opět byly porovnány simulační výsledky získané s využitím finálního modelu měřírny v simulátoru s měřeními daty. Na Obrázku 10 jsou znázorněny průběhy poklesu napětí a odporu vedení. Ostatní průběhy zůstaly totožné s těmi uvedenými na Obrázku 7.



Obrázek 10: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze zastávky Nádraží Slovany: úbytek napětí na troleji, odpor troleje na začátku sledovaného úseku s využitím finálního navrženého modelu trakční měřírny.

4 Průměrné napětí na troleji

Všechny výsledky simulací komentované v kapitole 2 a 3 využívaly model s nastavením parametru nominálního napětí měřírny na hodnotu 750 V. To by mohlo být viděno, jako problém, za předpokladu, že výsledky simulací porovnáváme s reálnými daty, kdy v Plzni předpokládáme napěťovou hladinu 600 V. Nicméně se ukázalo během analýzy dat, že „nominální“ napětí na troleji při odjezdech ze zastávky Nádraží Slovany (dříve Částkova) je průměrně **679,69 V (std = 3,03, min 673 V, max 686,43 V)**, a na odjezdech ze zastávky U Staré kovářny je průměrná hodnota dokonce **708,04 V (std = 2,93, min 702 V, max 713 V)**. Jedná se o průměry dat z jednoho tachografu.

Vedlejší závěr: Analyzovat současný stav napětí na troleji v Plzni, případně ověřit u PMDP na jaké hladině je dnes (resp. Bylo v roce 2017 – tj. datum pořízení záznamů) provozováno trolejové vedení a jaké je nastavení trakčních měření.

5 Vliv napětí trakčních měření na ztráty ve vedení – 600 vs 750 V

S upraveným finálním modelem trakčního vedení provedeme přepočty scénářů 600 V vs 750 V. Pro lepší představu provedeme porovnání pro obě diskutované parametrizace CF modelu, tj.

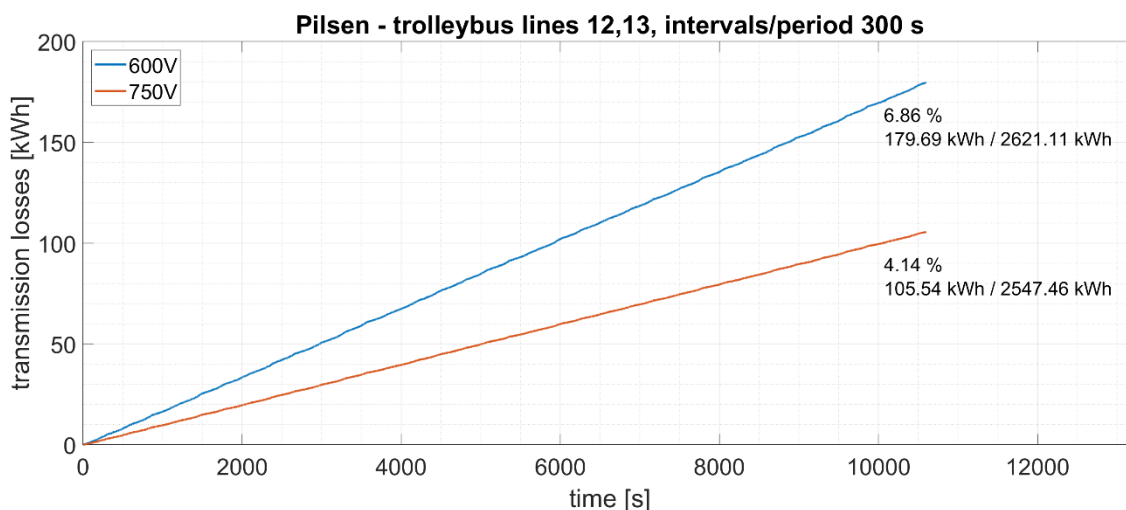
1. Původní: hodnota maximálního zrychlení 0.8 m/s^2 a $\sigma = 0$,
2. Nové: hodnota maximálního zrychlení $1,5 \text{ m/s}^2$ a $\sigma = 0.5$.

Výsledky jsou taktéž obsaženy v prezentaci pro PMDP.

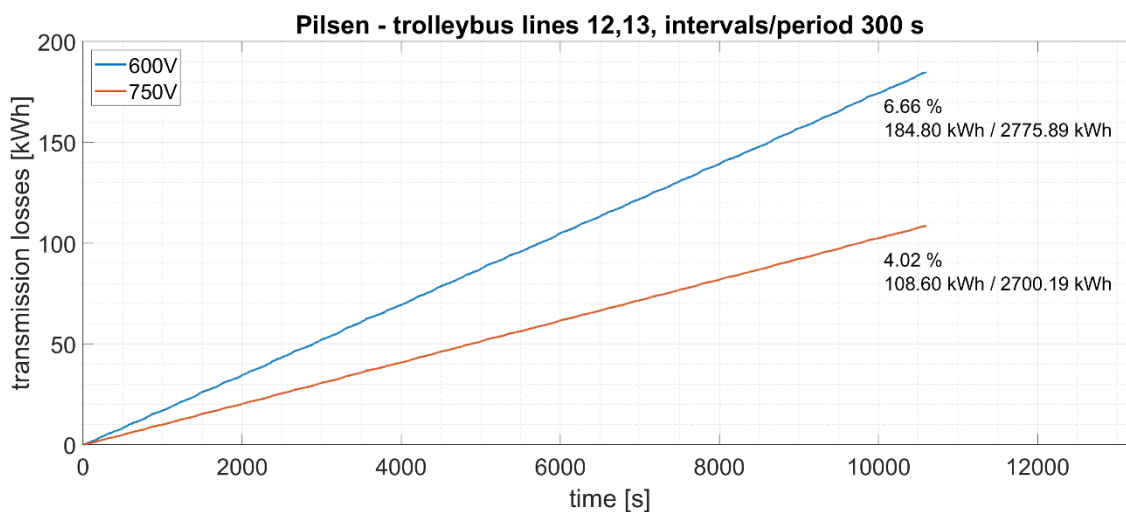
5.1 Získané průběhy ztrát vedením

- Porovnání přenosových ztrát na troleji v závislosti na nominálním napětí měřírny a možnosti vzájemné rekuperace mezi vozidly v rámci napájecí sekce
- Měřírna je simulována jako ideální napěťový zdroj se sériovým odporem 0.12Ω (hodnota získaná z vybraných reálných průjezdů – tachografů)
- V simulaci je uvažován fixní interval mezi oběhy vozidel 300s

S rekuperací:



Bez rekuperace:

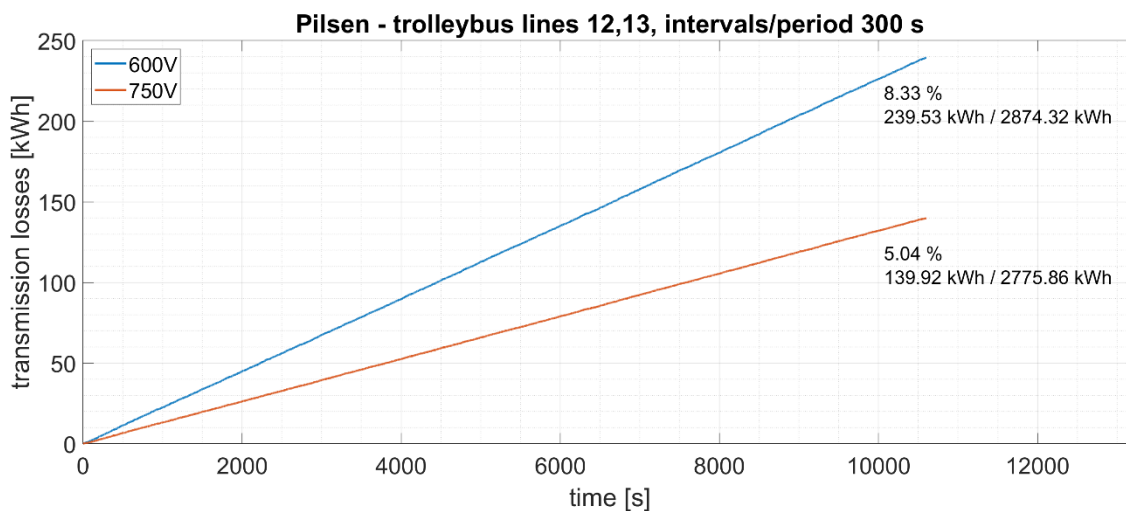


Napětí na měnič [V]	Rekuperace mezi vozidly	Celková spotřebovaná energie [kWh]	Celkové ztráty vedením [kWh]	Poměr ztrát vedením [%]	Ztráty vedením [Wh/ vozkm]
750	Ano	2547,46	105,54	4,14	54,44
750	Ne	2700,19	108,60	4,02	56,01
600	Ano	2621,11	179,69	6,86	92,68
600	Ne	2775,89	184,80	6,66	95,32

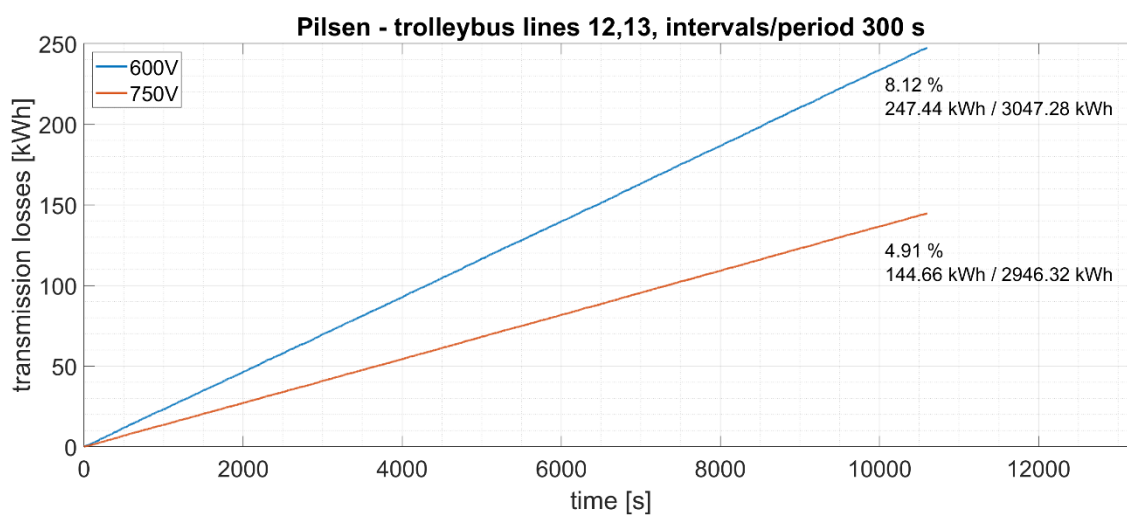
5.2 Získané průběhy ztrát vedením (změna v parametrizaci zrychlení a a σ)

- Porovnání přenosových ztrát na troleji v závislosti na nominálním napětí měničky a možnosti vzájemné rekuperace mezi vozidly v rámci napájecí sekce
- Měnička je simulována jako ideální napěťový zdroj se sériovým odporem 0.12Ω (hodnota získaná z vybraných reálných průjezdů – tachografů), zrychlení trolejbusů je nově nastaveno na 1.5 m/s^2 a parametr sigma (ovlivňující přesnost respektování zvolené parametrizace CFM) na hodnotu 0.5
- V simulaci je uvažován fixní interval mezi oběhy vozidel 300s

S rekuperací:

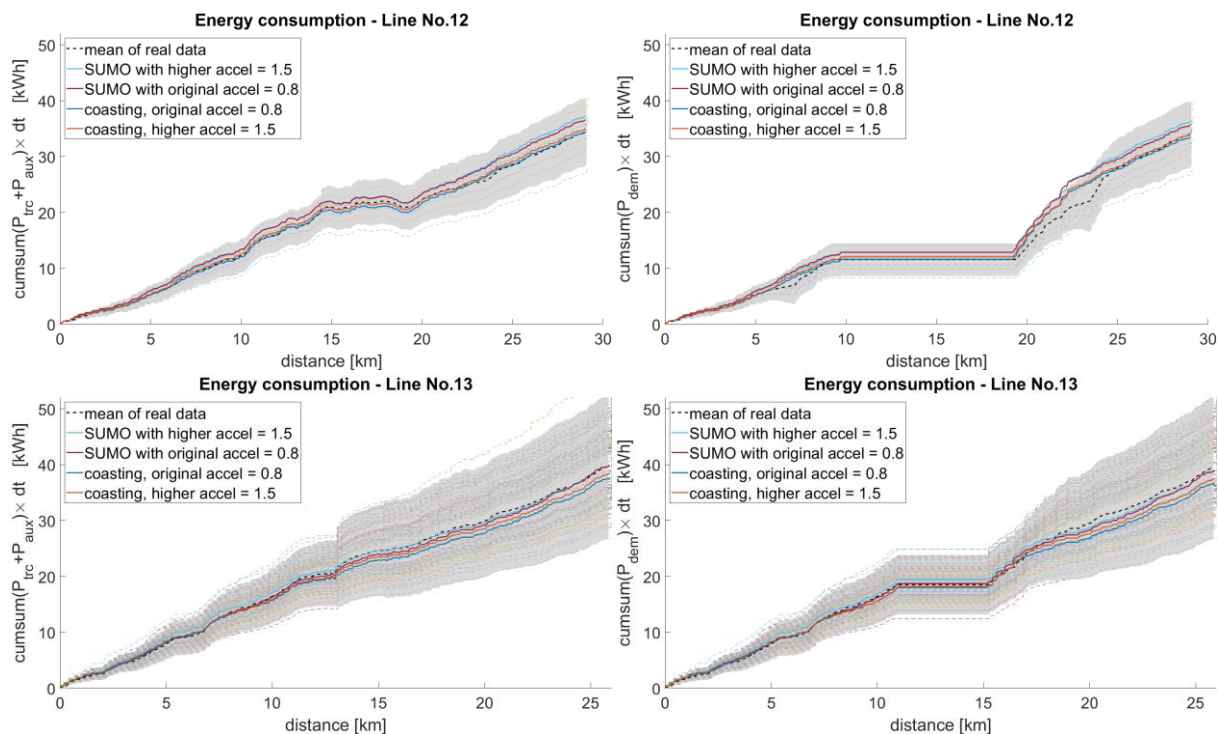


Bez rekuperace:



Napětí na měnič [V]	Rekuperace mezi vozidly	Celková spotřebovaná energie [kWh]	Celkové ztráty vedením [kWh]	Poměr ztrát vedením [%]	Ztráty vedením [Wh/vozkm]
750	Ano	2775,86	139,92	5,04	72.17
750	Ne	2946,32	144,66	4,91	74.61
600	Ano	2874,32	239,53	8,33	123,54
600	Ne	3047,28	247,44	8,12	127.62

Bohužel se ukazuje, že s nastaveným zrychlením 1.5 m/s^2 roste průměrná spotřeba trolejbusů a simulované výsledky tak neodpovídají průměrné hodnotě z reálných průjezdů. Nicméně spotřebu je možné snížit přeparametrizováním, případně s využitím režimu výběhu v simulaci

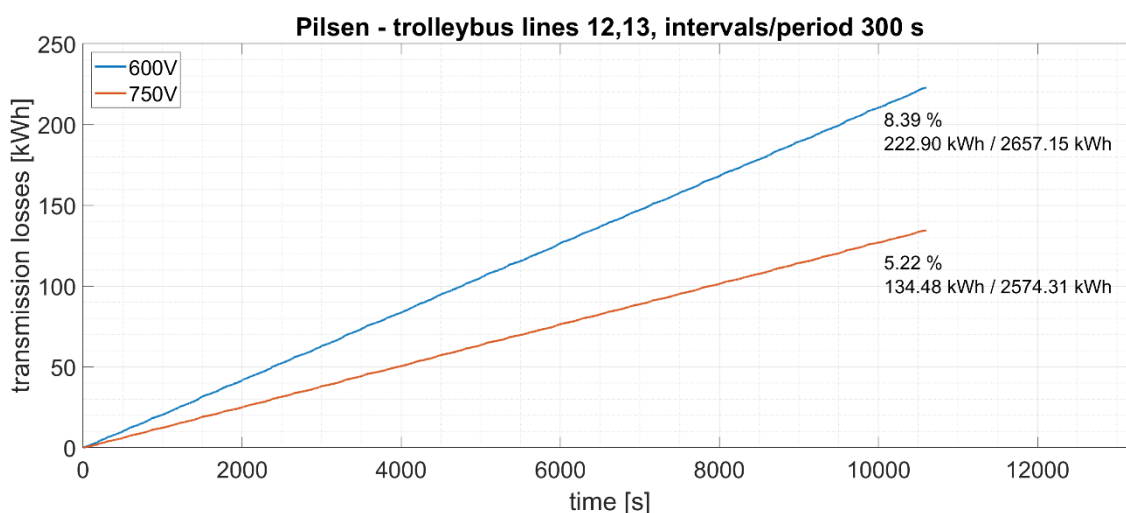


5.3 Získané průběhy ztrát vedením (změna v parametrizaci troleje – 100 mm²)

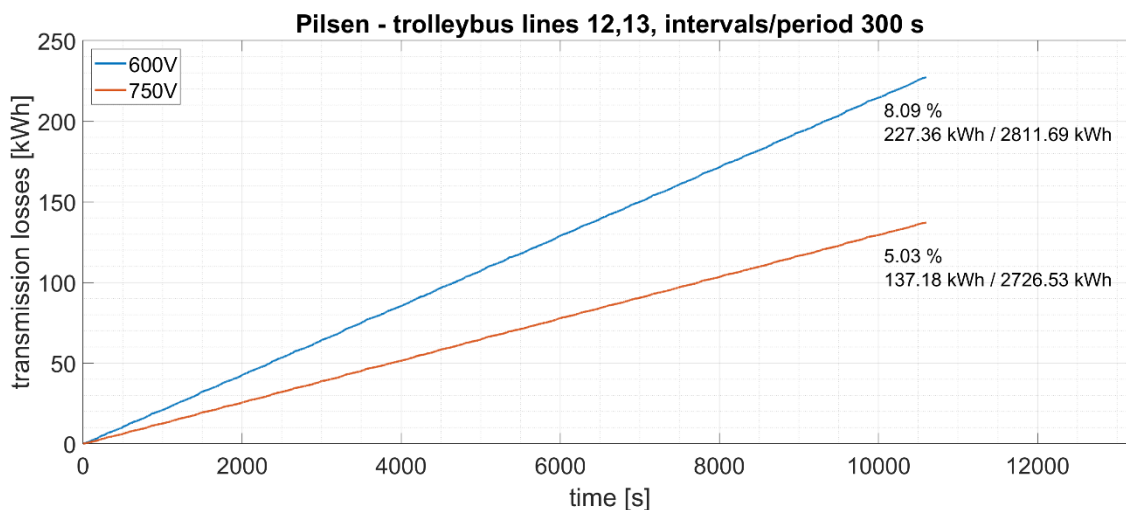
- Při diskuzi výsledků s PMDP bylo upozorněno na realitě neodpovídající hodnotu uvažovaného průřezu troleje 150 mm². Trolejové vedení je však v Plzni řešeno ve většině případů drátem o průřezu 100 mm², v některých spíše výjimečných situacích 120 mm² (stoupání ul. Rokycanskou k Ústřednímu Hřbitovu?).
- Z tohoto důvodu byla změněna parametrizace modelu v SUMO tak, aby odpovídala těmto hodnotám a také byla v souladu s ČSN EN 50149 ed. 2 (34 1558). Byl tedy nově uvažován měděný drát s $\rho_{Cu}=1,83 \times 10^{-8} \Omega m$ a průřezem $S=100 \text{ mm}^2$, tedy s výsledným odporem $r=1,83 \times 10^{-4} \Omega/m$.
(Namísto dosavadního měrného odporu $\rho_{Cu} = 1,69 \cdot 10^{-8} \Omega m$ a průřezu $S = 150 \text{ mm}^2$, tedy s výsledného odporu $r = 1,13 \cdot 10^{-4} \Omega/m$.)
- Bylo provedeno porovnání přenosových ztrát na troleji v závislosti na nominálním napětí měřírny (600 vs 750 V) a možnosti vzájemné rekuperace mezi vozidly v rámci napájecí sekce
- Měřírna je simulována jako ideální napěťový zdroj se sériovým odporem 0.12 Ω (hodnota získaná z vybraných reálných průjezdů – tachografů), zrychlení trolejbusů bylo ponecháno postupně na obou výše testovaných hodnotách, tedy 0,8 m/s² v prvním případě a na 1.5 m/s² v druhém, obdobně parametr sigma (ovlivňující přesnost respektování zvolené parametrizace CFM) na hodnotě 0 v prvním případě a hodnotě 0.5 ve druhém případě.
- V simulaci je uvažován fixní interval mezi oběhy vozidel 300s

Zrychlení 0,8 m/s², sigma 0

S rekuperací:



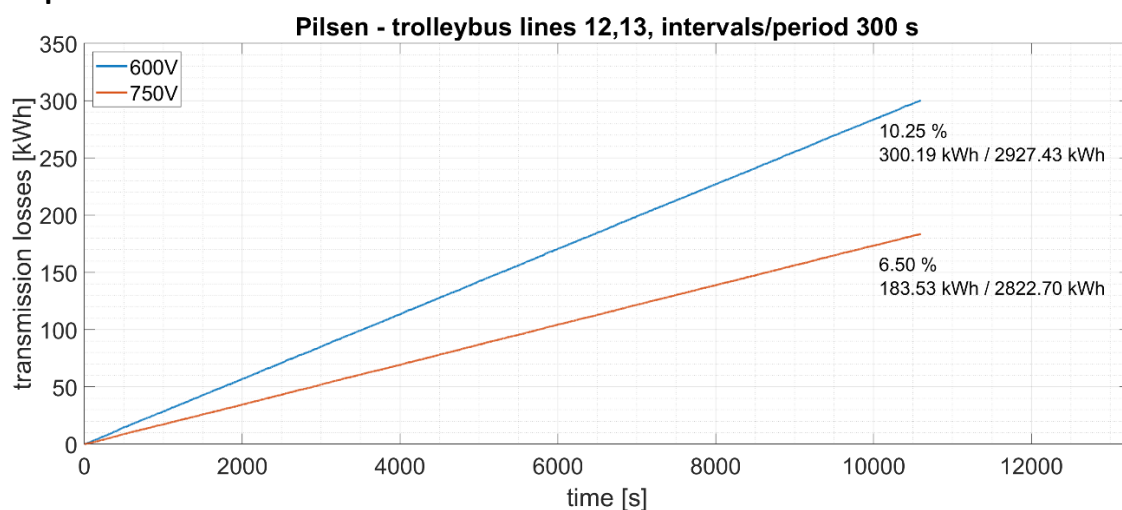
Bez rekuperace:



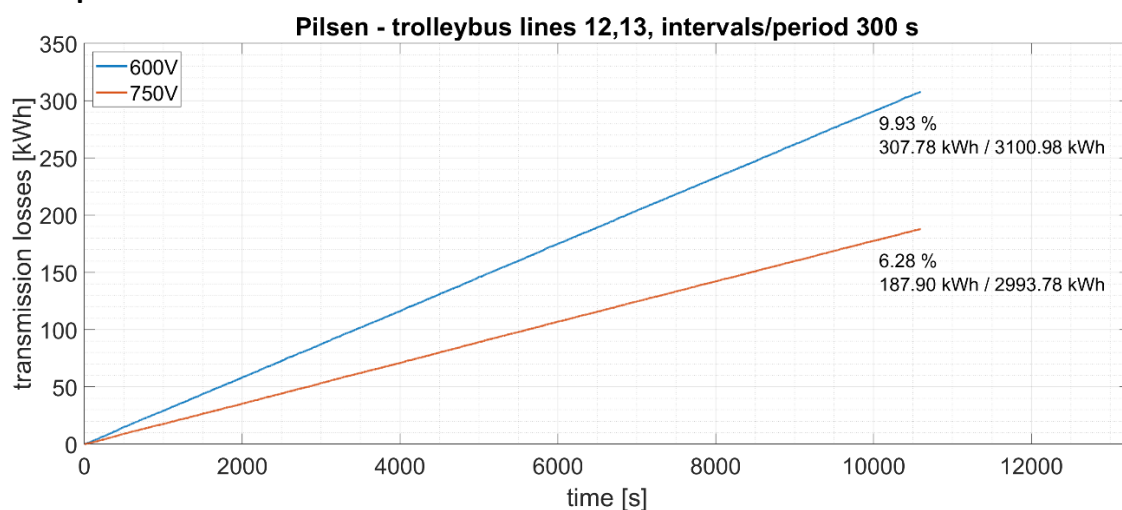
Napětí na měnící [V]	Rekuperace mezi vozidly	Celková spotřebovaná energie [kWh]	Celkové ztráty vedením [kWh]	Poměr ztrát vedením [%]	Ztráty vedením [Wh/vozk]
750	ano	2574,31	134,48	5,22	69,33
750	ne	2726,53	137,18	5,03	70,72
600	ano	2657,15	222,90	8,39	114,92
600	ne	2811,69	227,36	8,09	117,22

Zrychlení 1,5 m/s², sigma 0,5

S rekuperací:



Bez rekuperace:

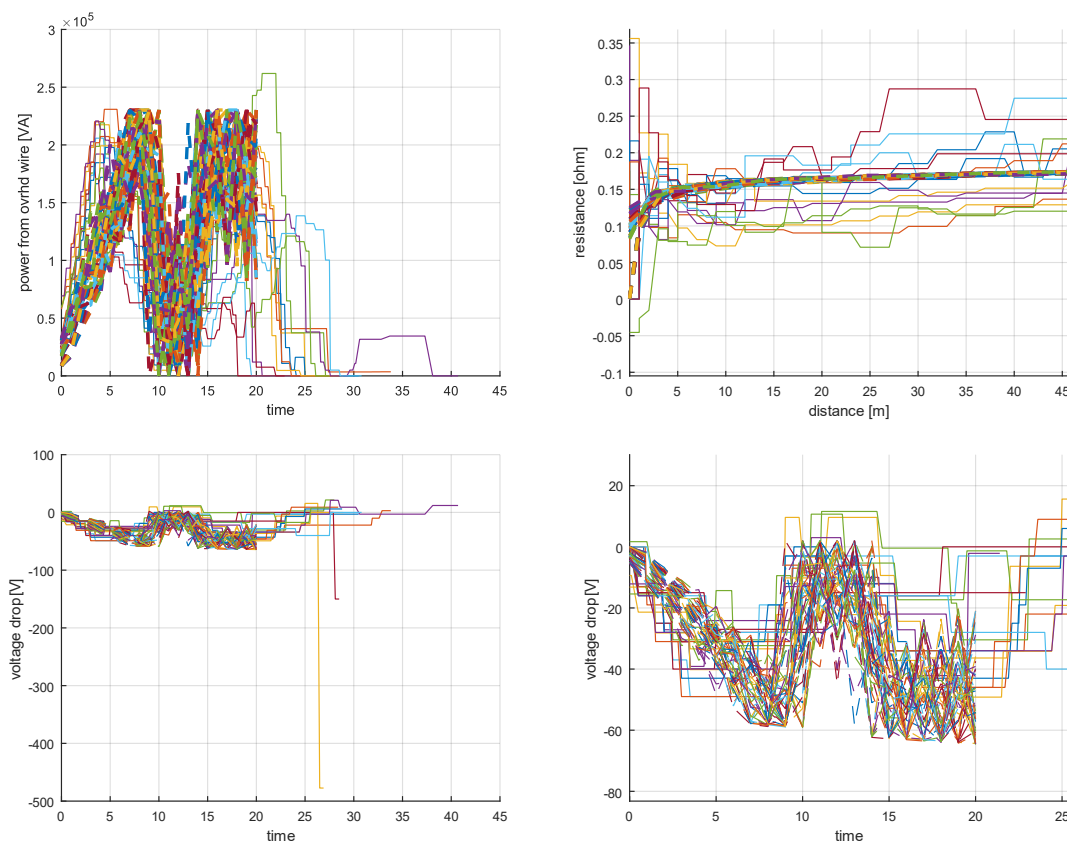


Napětí na měnící [V]	Rekuperace mezi vozidly	Celková spotřebovaná energie [kWh]	Celkové ztráty vedením [kWh]	Poměr ztrát vedením [%]	Ztráty vedením [Wh/vozk]
750	ano	2822,70	183,53	6,50	94,62
750	ne	2993,75	187,90	6,28	96,88
600	ano	2927,43	300,19	10,25	157,77
600	ne	3100,98	307,78	9,93	158,68

5.3.1 Ověření modelu měřirny při použití troleje o průřezu 100 mm²

Výsledky ztrát vedením v závislosti na nominálním napětí měřirny představené výše v sekci 5.3 jsou získané při uvažování průřezu troleje 100 mm² a vyšší měrné rezistivity. Oba tyto parametry obvivňují charakteristiky při rozjezdu jako je pokles napětí a odpor troleje, které byly zkoumány v sekcích 1-3 za účelem kalibrace modelu měřirny. Z tohoto důvodu je ještě nutné ověřit, že reparametrizací měrné rezistivity a průřezu troleje nedojde u finálního modifikovaného modelu měřirny k výrazným změnám optori měřeným datům.

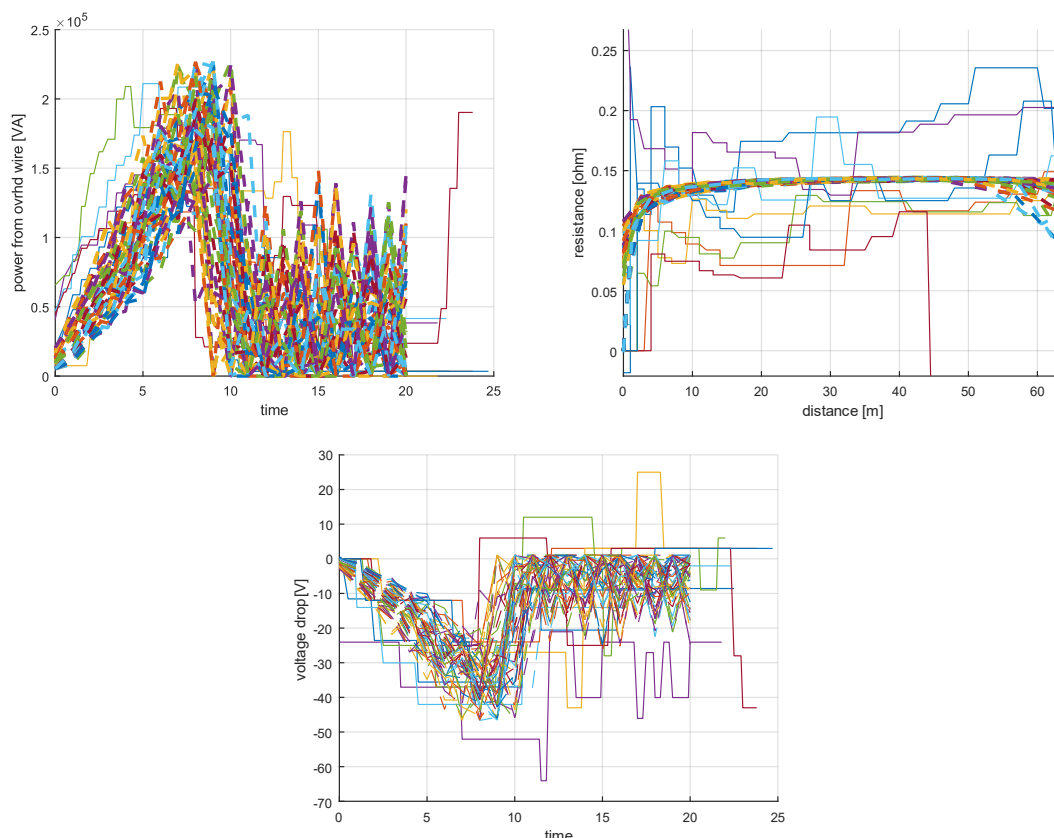
Rozjezd „U Staré kovárny“



Obrázek 11: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze zastávky U Staré kovárny: výkon z troleje, odpor z troleje, úbytek napětí na troleji a jeho detail na začátku sledovaného úseku. S využitím finálního navrženého modelu měřirny, změnou parametrizace CF modelu a uvažováním průřezu trolejového drátu 100 mm² s vyšší rezistivitou.

Zatímco odpor simulovaný 45 m od stanice „U Staré kovárny“ se zvýšil cca z hodnoty 0.15 Ohm na hodnotu 0.17 Ohm, úbytek napětí klesl v čase cca 10 s od výjezdu ze stanice „U Staré kovárny“ překvapivě z hodnoty cca -43V až k hodnotě -60V. Ve výsledcích je zřetelné i relativně výrazné navýšení odebíraného výkonu z troleje z hodnoty cca 2×10^5 VA na hodnotu 2.3×10^5 VA (Proč?), ačkoliv průběh rychlosti vozidla je zachován.

Rozjezd „Nádraží Slovany“



Obrázek 12: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze Nádraží Slovany: výkon z troleje, odpor z troleje a detail úbytku napětí na troleji na začátku sledovaného úseku. S využitím finálního navrženého modelu měnící, změnou parametrizace CF modelu a uvažováním průřezu trolejového drátu 100 mm² s vyšší rezistivitou.

Podobně jako u rozjezdu ze stanice „U Staré kovárny“, také při evaluaci simulace rozjezdu trolejbusu ze stanice „Nádraží Slovany“ došlo jen k nepatrnému navýšení odporu (ve vzdálenosti 30 m od stanice) cca z hodnoty 0.13 Ohm na hodnotu 0.14 Ohm. Došlo však k výraznému poklesu napětí – namísto poklesu cca 16V až k hodnotě poklesu napětí o 46 V. A taktéž byl zaznamenáno navýšení odběru výkonu z troleje z původních cca 1.9×10^5 VA na hodnotu 2.3×10^5 VA.

Tento jev může souviset se změnou simulačního prostředí, kdy došlo k přechodu na verzi simulátoru Eclipse SUMO 1.21, pravděpodobnější je však rozdíl v parametrizaci simulace, která musí být předmětem dalšího zkoumání. Důležité pro využití v praxi je však fakt, že i výše uvedené výsledky simulované při uvažování trolejového drátu s průřezem 100 mm² a s vyšším měrným odporem jsou ve shodě s reálnými daty a rozdíly optori modelu uvažujícímu průřez trolejového drátu 150 mm² jsou nižší než rozptyl v reálných datech.

5.4 Dílčí závěr

- Pro trolejovou síť s nominálním napětím měřen 600 V byly spočteny hodnoty ztrát vedením v troleji od 8,09 % do 10,25 % z celkově spotřebované energie (na výstupu z měření)

- Pro trolejovou síť s nominálním napětí měníren 750 V byly spočteny hodnoty ztrát vedením v troleji od 5,03 % do 6,50 % z celkově spotřebované energie (na výstupu z měníren)
- Pro úvahy o změně nominálního napětí měníren a výpočet souvisejících provozních úspor je důležité také upozornit, že z dostupných dat je patrná vyšší stávající hladina napětí než 600 V.
 1. Při podrobném studiu rozjezdů vozů ze zastávky Nádraží Sovany (dříve Částkova) byla sledována průměrná hodnota napětí v troleji 679,66 V (std = 3,03, min 673 V, max 686,43 V)
 2. U rozjezdů ze zastávky U Staré kovárny je průměr 708,04 V (std = 2,93, min 702 V, max 713 V)

Literatura

- [1] ŠEVČÍK, Jakub; PŘIKRYL, Jan; PEROUTKA, Zdeněk. In-motion charged vehicle simulation considering traffic and power grid interactions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 109: 103322.
- [2] BARTŁOMIEJCZYK, Mikołaj; HOŁYSZKO, Piotr; FILIPEK, Piotr. Measurement and analysis of transmission losses in the supply system of electrified transport. *Journal of Ecological Engineering*, 2016, 17.5.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma trolejového vedení v Plzni z května 2021 (zdroj: PMDP).	6
Obrázek 2: Měřená data, výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost, úbytek napětí na troleji, výkon z troleje	7
Obrázek 3: Měřená data a simulační výsledek (přerušovanou čarou), výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost, úbytek napětí na troleji, výkon z troleje. Čtvrtý graf znázorňuje modelovanou nadmořskou výšku na úseku v čase. Výchozí stav.....	8
Obrázek 4: Odpor troleje z měřených dat (plné čáry) simulačních výsledků (přerušovanou čarou), výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost. Druhý graf znázorňuje detailní pohled na prvních 45 m úseku. Výchozí stav.	9
Obrázek 5: Odpor troleje z měřených dat (plné čáry) a simulačních výsledků (přerušované čáry), úbytky napětí na troleji, výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost. S využitím modifikace modelu měnírný.	9
Obrázek 6: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze zastávky U Staré Kovárny: rychlost, úbytek napětí na troleji, výkon z troleje, odpor troleje a detail průběhu na začátku sledovaného úseku. S využitím modifikace modelu měnírný a změnou parametrizace CF modelu.	11
Obrázek 7: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze zastávky Nádraží Slovany: rychlost, úbytek napětí na troleji, výkon z troleje, sklon vozovky (model), odpor troleje na začátku sledovaného úseku. S využitím zjednodušené modifikace modelu měnírný a změnou parametrizace CF modelu. ..	12
Obrázek 8: Přípojné body na úseku Lobežská. K pořízení těchto snímků byla využita webová stránka www.mapy.cz	13
Obrázek 9: Vývoj modelu trakční měnírný v této zprávě.....	14
Obrázek 10: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze zastávky Nádraží Slovany: úbytek napětí na troleji, odpor troleje na začátku sledovaného úseku s využitím finálního navrženého modelu trakční měnírný.	14
Obrázek 11: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze zastávky U Staré kovárny: výkon z troleje, odpor z troleje, úbytek napětí na troleji a jeho detail na začátku sledovaného úseku. S využitím finálního navrženého modelu měnírný, změnou parametrizace CF modelu a uvažováním průřezu trolejového drátu 100 mm ² s vyšší rezistivitou.	21
Obrázek 12: Měřená data (plná čára) a simulační výsledek (přerušovaná čára), výjezd ze Nádraží Slovany: výkon z troleje, odpor z troleje a detail úbytku napětí na troleji na začátku sledovaného úseku. S využitím finálního navrženého modelu měnírný, změnou parametrizace CF modelu a uvažováním průřezu trolejového drátu 100 mm ² s vyšší rezistivitou.....	22

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Vytvoření dokumentu – verze 0 (nerevidovaná)	12.12.2023	J.Ševčík
1	Všechny	Revize zprávy, přidělení č. dokumentu, doplnění výsledků pro průřez 100 mm ²	12.11.2024	J. Ševčík