

MODELOVÁNÍ SYSTÉMU NAPÁJENÍ TROLEJBUSOVÉ DOPRAVY

MODELING OF TROLLEYBUS TRANSPORT SUPPLY SYSTEM

Mikołaj Bartłomiejczyk¹, Radovan Doleček²

Anotace: Článek se zabývá simulací napájecího systému pro trolejbusy s využitím statistického modelování pomocí metody Monte Carlo. Ověření modelu bylo provedeno na základě výsledků měření napětí a proudů v trolejbusovém systému v městě Gdyni. V článku je prezentován případ studie využití metody Monte Carlo pro analýzu snížení požadavku na energii v trolejbusové dopravě s využitím superkapacitorových stanic nebo změnou konfigurace napájecího systému.

Klíčová slova: Trolejbus, Napájecí systém, Metoda Monte Carlo.

Summary: The article demonstrates simulation of trolleybus transport supply system using the Monte Carlo statistical modeling. Verification of this model was implemented by comparison with the results of measure currents and voltages in Gdynia trolleybus network. In article is presented the case study of using Monte Carlo methods for analysis of increasing energy recovering in trolleybus transport by installing supercapacitors stations or reconfiguration of supply system topology in case of trolleybus network in Gdynia city.

Key words: Trolleybus, Electric Traction Power Supply, Monte Carlo methods.

ÚVOD

V průběhu posledních dvaceti let je patrný nárůst zájmu o trolejbusovou dopravu v Polsku. Je to způsobeno nestabilním trhem pohonných hmot a také změnou ekologického povědomí obyvatel. V mnohých městech vznikají nové trolejbusové provozy, jsou otevírány nové tratě, do provozu jsou uváděna nová vozidla. Nicméně spolu s růstem počtu nových trolejbusů vybavených asynchronním elektrickým pohonem, se vyskytují i problémy s efektivností již existujících systémů napájení trolejbusových tratí. Je to následek současného výskytu dvou činitelů: větší náročnosti nových trolejbusových vozidel ve vztahu ke kvalitě elektrické trakční energie a současně vyššího výkonu trakčních motorů, což způsobuje zvýšení hodnoty proudu odebíraného z trolejového vedení.

¹ Ing. Mikołaj Bartłomiejczyk Ph. D., Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu, ul. Sobieskiego 7, 80-216 Gdańsk ,
Tel.: +48563472857, Fax: +48563410880, E-mail: mbartlom@ely.pg.gda.pl

² Doc. Ing. Radovan Doleček, Ph. D., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice.,
Tel.: +420 466 036 427, Fax: +420 466 036 497, E-mail: radovan.dolecek@upce.cz

1. CHARAKTERISTIKA TROLEJBUSOVÉ DOPRAVY

Trolejbus je bezkolejové vozidlo městské hromadné dopravy, napájené z dvoupólového trakčního vedení. Trolejbusová trakční síť je rozdělena na jednotlivé napájecí úseky, které jsou napájeny kabely z trakčních měníren. Jejich výkon je na úrovni 500 kW až 2 MW a jsou umístěny ve vzdálenostech 2 až 6 km.

Z hlediska energetických výpočtů jsou pro trolejbusový systém příznačné následující ukazatele:

- podstatná nerovnoměrnost pohybu trolejbusů způsobená kongescemi silničního provozu, čili tzv. „jízda v zácpě“;
- poměrně nízká „kultura pracovní činnosti“ řidičů trolejbusů, kteří využívají nesprávnou techniku jízdy vzhledem k vyskytujícím se podmínkám provozu;
- vyšší odpor napájecí sítě proti kolejové dopravě: trakční vedení plní úkol zpětné sítě;
- malý počet trolejbusů (1 až 3), které se současně nacházejí v napájecím úseku, následkem toho vzniká nerovnoměrnost zátěže napájecích kabelů.

Na základě výše uvedených činitelů je možné konstatovat, že zátěž trolejbusových trakčních měníren má náhodný charakter (1), (2) a (3). V důsledku toho pak aplikace výpočtových metod běžně používaných v železniční dopravě, předpokládajících přesný pohyb vozidel dle jízdního řádu, způsobí kalkulační chyby. V souvislosti s tím, byl připraven model systému napájení trolejbusové dopravy na základě simulační metody Monte Carlo.

2. SIMULAČNÍ METODY VÝPOČTŮ NAPÁJECÍCH SÍTÍ

Simulační metody pro systém napájení elektrické trakce můžeme rozdělit na dvě skupiny:

- metody časové simulace, kde je napájecí systém považován za dynamickou soustavu a realizována je simulace změn stavu zkoumaného systému v závislosti na čase. Časové průběhy proudů a napětí jsou výsledkem této metody,
- metody statistické simulace, např. metoda Monte Carlo. V této metodě jsou výpočty realizované na principu počítačových statistických metod. Výsledkem je rozložení hustoty pravděpodobností proudů a napětí.

Metody první skupiny jsou nejpobulárnější a jsou využívány pro výpočty především v železniční dopravě, kde se předpokládá provoz vozidel dle jízdních řádů, což je však v případě městské dopravy sporné (4) a (5). V souvislosti s tím pro účely analýzy trolejbusové trakce jsou vhodnější metody Monte Carlo, které umožňují zohlednění vlivu mnoha náhodných činitelů (6) a (7).

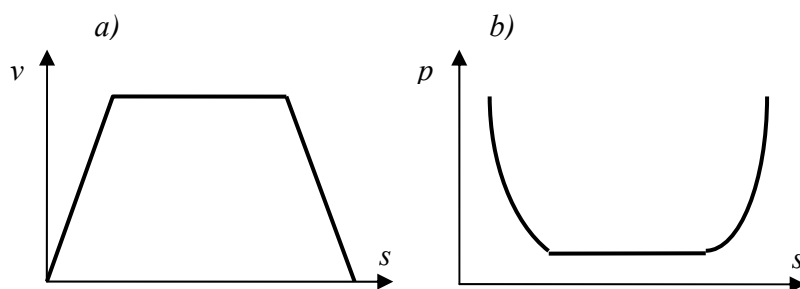
2.1 Simulační metoda Monte Carlo

Simulační model trolejbusového napájecího systému je zpracován na principu metody Monte Carlo (8) a (9). Pro simulační účely bylo využito prostředí software Scilab/Scicos.

Model vychází z následujících vstupních údajů:

- jízdní řády trolejbusů,
- odchylky od jízdních řadů - údaje sledování přesnosti pohybu vozů provedené dopravním podnikem v Gdyni,
- rychlostní profil jízdy trolejbusů - závislost očekávané rychlosti na poloze vozu po zohlednění vlivu externích činitelů, např. uliční signalizace, omezení rychlosti atd.,
- trakční charakteristiky trolejbusů,
- profil tratě.

Na základě jízdních řadů a jejich odchylek je vytvořeno rozložení hustoty pravděpodobností počtu trolejbusů nacházejících se v daném napájecím úseku (obr. 1). Toto rozložení je východiskem pro náhodné stanovení momentálního počtu vozidel.



Zdroj: Autoři

Obr. 1 - Příklad a) rychlostního profilu a b) rozložení pravděpodobností polohy jednotlivých trolejbusů

Rychlostní profil je předpokladem pro určení rozložení pravděpodobnosti polohy jednotlivých trolejbusů, kde pravděpodobnost p je nepřímo úměrná k očekávané rychlosti v daném místě s .

$$p(s) = k \cdot \frac{1}{v(s)} \quad (1)$$

Základní simulační cyklus (obr. 2) zahrnuje následující postupy:

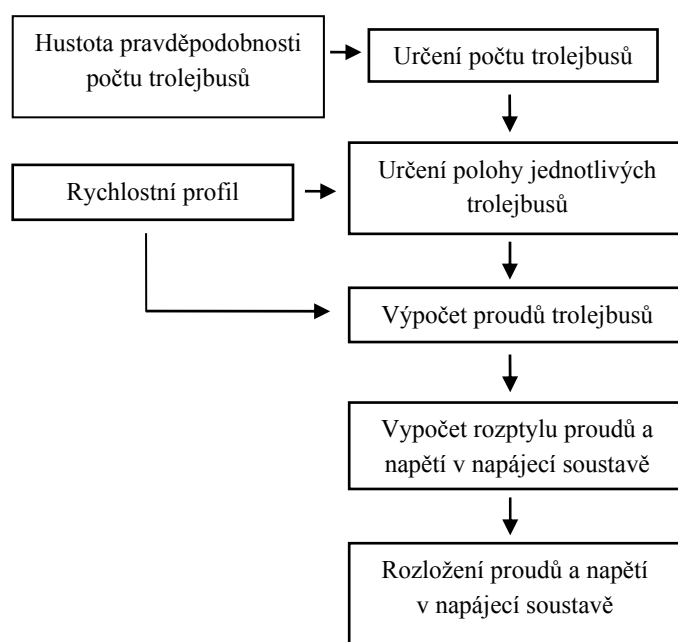
- určení počtu trolejbusů nacházejících se na napájecím úseku. Tento počet je stanoven jízdním řádem po zohlednění časových odchylek,
- určení polohy jednotlivých trolejbusů na základě hustoty pravděpodobnosti polohy trolejbusů. Jak je uvedeno výše vztahem (1), předpokládá se, že pravděpodobnost polohy trolejbusu je nepřímo úměrná rychlosti v daném místě,
- určení proudů jednotlivých trolejbusů,
- výpočty rozptylu proudů a napětí v napájecí soustavě.

Tento postup byl mnohonásobně opakován. Výsledkem je pak rozložení proudů a napětí.

Proudy jednotlivých trolejbusů jsou stanoveny na základě rychlosti v a její derivaci dv/dt v určeném místě:

- je-li časová změna $dv/dt > 0$, znamená to, že se trolejbus rozjíždí. V tomto případě je jeho trakční proud stanoven jeho trakční charakteristikou,
- jestli je $dv/dt < 0$ znamená to, že trolejbus jede v brzděném režimu. V tom případě je jeho odebíraný trakční proud nulový,
- jestli je $dv/dt = 0$ a $v > 0$, znamená to, že trolejbus jede ustálenou rychlostí. Nicméně v reálných podmínkách řidiči stejnou rychlost zachovávají opakovaným nášlapem pedálu jízdy, proto je možné mluvit o quasi ustálené rychlosti. V tom případě je trakční proud náhodně rozložen během jízdy s quasi ustálenou rychlostí. Toto rozložení bylo dříve připravené tzv. teoretickými průjezdy.
- jestli je $dv/dt = 0$ a $v = 0$, znamená to, že trolejbus stojí na zastávce. V tom případě je jeho trakční proud nulový.

K výše uvedeným proudům je nutné připočítat i proud pomocných netrakčních pohonů (např. kompresory).



Zdroj: Autoři

Obr. 2 - Schéma simulačního modelu

2.2 Experimentální měření

V rámci verifikace simulačního modelu bylo provedeno měření proudů zatížení a napětí v trolejbusové trakční síti. Měření bylo provedeno v městě Gdyni, na napájecích úsecích *Kołątąja*, *Pustki* a *Chwaszczyńska* (Tab. 1).

Tab. 1 - Údaje analyzovaných napájecích úseků

	<i>Kollątaja</i>	<i>Pustki</i>	<i>Chwaszczyńska</i>
Délka úseku	1450 m	2400 m	1350 m
Délka kabelu	1000 m	1300 m	1300 m
Interval provozu	3 min 45 s	15 min	6 min
Poloha úseku	centrum města	okraj města	okraj města

Zdroj: (10)

Měření proudů napájecích kabelů bylo provedeno na trakčních měnících přístrojem HIOKI, připojeným k napájecím kabelům. Sledování napětí trakčního vedení bylo realizováno měřícím zařízením vyrobeným Elektrotechnickým institutem ve Varšavě, umístěným na trakčním stožáru.

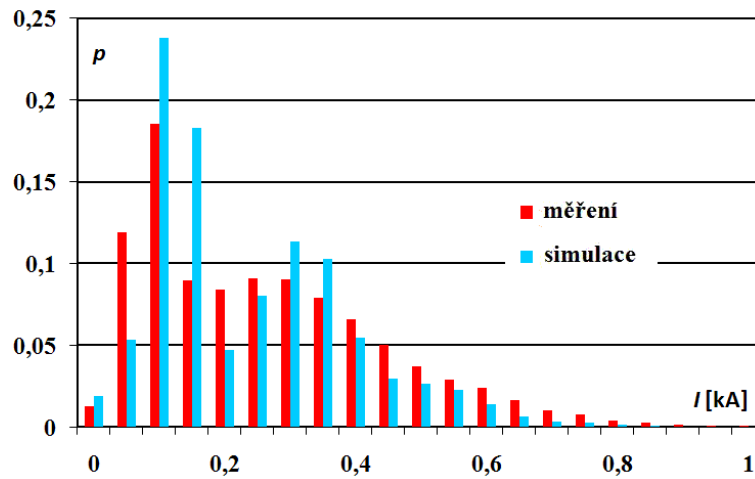
Maximální proud je stanoven jako kvantil 0,9999 rozložení pravděpodobností zatěžovacího proudu. V tab. 2 je uvedeno srovnání proudů jednotlivých úseků. Simulace proudů v úseku *Kollątaja* byla provedena pro dvě dopravní situace: provoz s dodržovaným jízdním řádem a provoz se zohledněním zpoždění. Na obr. 3 a obr. 4 vidíme histogram napětí úseku *Kollątaja*.

Tab. 2 - Srovnání proudů napájecích kabelů, (1) provoz podle jízdního řádu, (2) provoz se zohledněním zpoždění

Hodnota proudu	<i>Kollątaja</i> (1)	<i>Kollątaja</i> (2)	<i>Pustki</i>
naměřená střední	236 A		74 A
simulovaná střední	209 A	208 A	89 A
rozdíl	11 %	11 %	18 %
naměřená max.	1075 A		428 A
simulovaná max.	911 A	1090 A	557 A
rozdíl	15 %	1 %	30 %

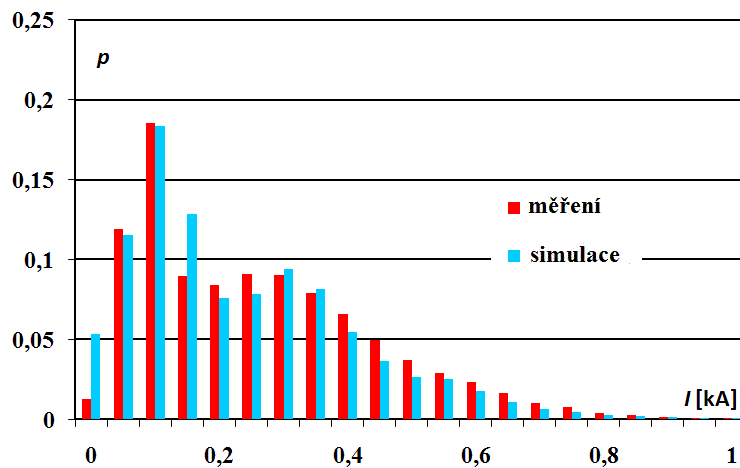
Zdroj: (10)

Na základě simulace proudu napájecího kabelu *Kollątaja* je možné konstatovat, že nerovnoměrnost provozu trolejbusů má podstatný vliv na maximální hodnotu zátěže. Je to výsledek výskytu skupin trolejbusů jedoucích hromadně a rozjíždějících ve stejném čase, což působí znásobení rozjezdového proudu. V simulaci je proto nutno tento fakt rovněž zohlednit. Analogicky rozdíl mezi naměřeným a simulovaným maximálním proudem v úseku *Pustki* je možné vysvětlit situací, při níž bylo sledování proudu úseku prováděno – měření se konalo v sobotu, čili v relativně dobrých provozních podmínkách, následkem čehož byla zjištěna i menší maximální hodnota proudu než byla očekávána.



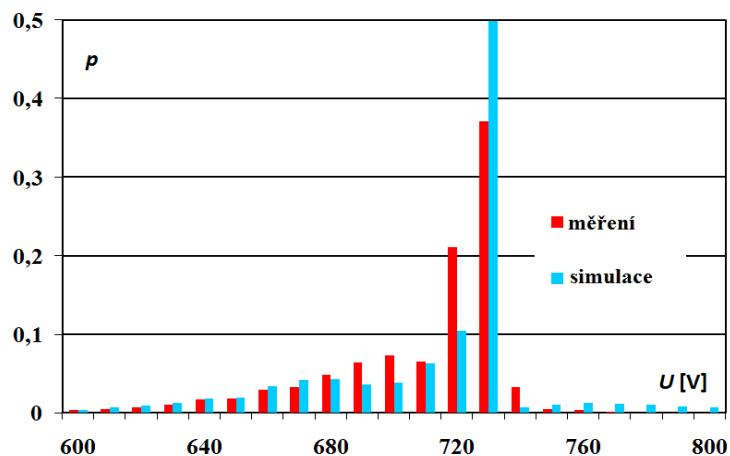
Zdroj: (10)

Obr. 3 - Srovnávací histogram napětí na konci úseku *Kollątaja* - provoz podle jízdního řádu



Zdroj: (10)

Obr. 4 - Srovnávací histogram napětí na konci úseku *Kollątaja* - provoz se zohledněním zpoždění



Zdroj: (10)

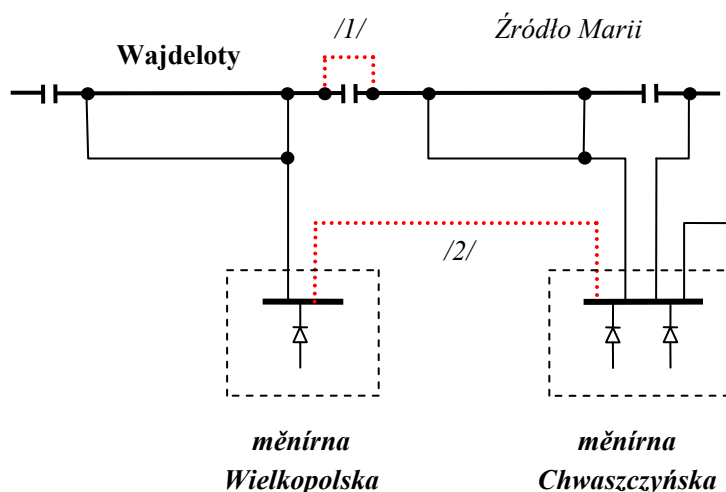
Obr. 5 - Srovnání histogramů napětí na konci úseku *Chwaszczyńska* získaných měřením a simulační metodou Monte Carlo

Na obr. 5 vidíme histogram napětí úseku *Chwaszczyńska*. Jmenovité výstupní napětí trakčních měníren v Gdyni je 660 V, nicméně kvůli příliš velkým ztrátám napětí vyskytujícím se v úseku *Chwaszczyńska* bylo zvýšeno až na 730 V. Na uvedeném histogramu také je viditelný nárůst napětí nad 730 V způsobený proudem z rekuperačního brzdění.

2.3 Analýza zlepšení energetické efektivity napájecí soustavy

Předmětem této analýzy je napájecí oblast měníren *Chwaszczyńska* a *Wielkopolska* (obr. 6). Měniřna *Chwaszczyńska* napájí pět úseků a je vybavena dvěma usměrňovacími jednotkami. *Wielkopolska* je jednotkovou měniřnou jež napájí jen jeden napájecí úsek. Vzhledem ke kopcovitému charakteru oblasti zásobovaných z těchto dvou měníren se vytvoří příznivé podmínky i pro rekuperaci. Zde se nabízí analýza zvýšení efektivity rekuperačního brzdění. Tohoto cíle je možné dosáhnout třemi způsoby:

- využitím zásobníků na měniřnách nebo rekuperačních měničů, umožňujících vracení elektrické energie do veřejné sítě vysokého napětí;
- zavedením dvoustranného napájení trakčního vedení propojením úseků *Wajdeloty* a *Źródło Marii* (obr. 6, propojka je označena číslem /1/), což umožní přeliv rekuperované energie mezi napájenými úseky;
- propojením hlavních sběrnic stejnosměrného napětí měníren *Chwaszczyńska* a *Wielkopolska* stávajícími kabely (obr. 6, kabely jsou označeny číslem /2/). Tyto kabely jsou pozůstatkem po předchozí napájecí soustavě, jež existovala před výstavbou měniřny *Wielkopolska* a v dnešní době je mimo provoz.



Zdroj: Autoři

Obr. 6 - Schéma analyzovaných řešení propojení měníren *Chwaszczyńska* a *Wielkopolska*: /1/ propojení mezi úseky *Wajdeloty* a *Źródło Marii*, /2/ propojení sběrnic měníren *Chwaszczyńska* a *Wielkopolska* stávajícím kabelem.

Tab. 3 nabízí srovnání energetické efektivity všech variant a tab. 4 pak nabízí srovnání vlivu napájecího systému na velikost proudů napájecích kabelů. Úspory spotřeby

energie vzniknou z příčiny zvětšení stupně využití rekuperované energie a snížením ztrát v trakčním vedení.

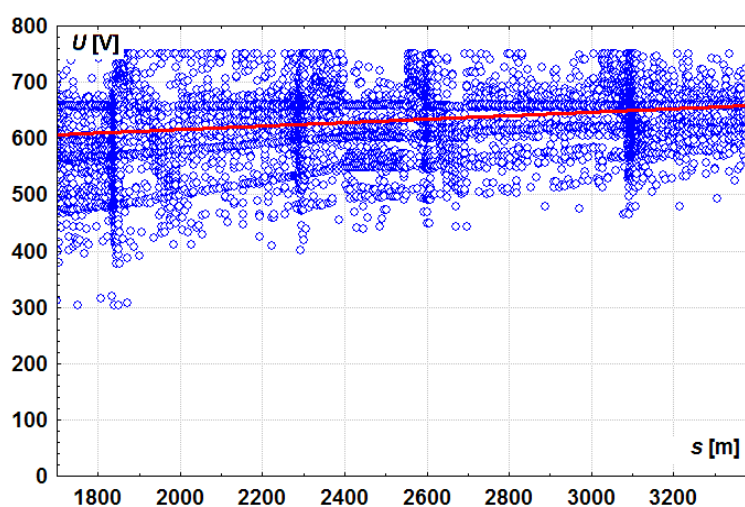
Tab. 3 - Srovnání efektivností jednotlivých variant optimalizace systému napájení – celkový výkon obou měníren

Varianta	celkový výkon	<i>Chwaszczyńska</i>
Stav bez optimalizace	465 kW	100 %
Propojení úseků	415 kW	91 %
Propojení sběrnic měníren	415 kW	91 %
Využití zásobníků	333 kW	73 %

Zdroj: Autoři

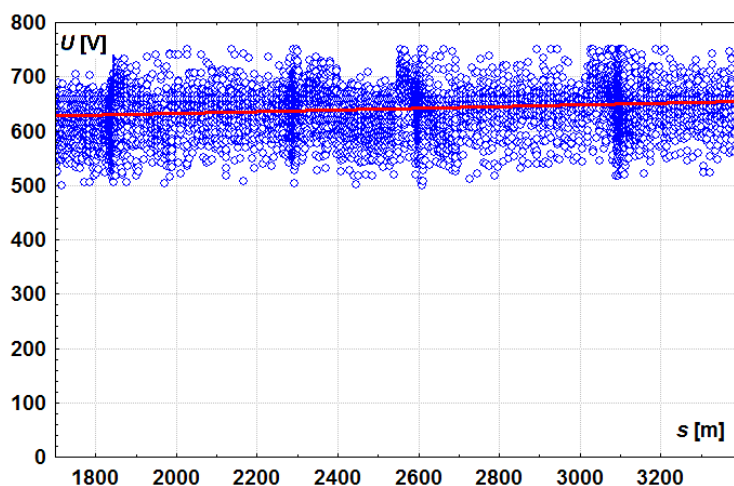
V případě napájecí soustavy bez provedené optimalizace je celková roční spotřeba elektrické energie obou měníren na úrovni 2,4 GWh, což odpovídá poplatku za energii ve výšce 450 tis. zř, čili cca. 2,9 mil. Kč. Realizace spojky mezi měnírnami nebo úseky dává roční úsporu až 32 tis. zř, čili 200 tis. Kč. Pokud však budou instalovány zásobníky energie, celková spotřeba energie klesne až o 27 % a výsledkem bude úspora 117 tis. zř, čili cca 750 tis. Kč. Při předpokladu životnosti zásobníků 10 let, je možné konstatovat, že instalace takového zařízení na obou měnírnách se vyplatí, pokud cena jednotlivého zásobníku nepřesáhne 3,75 mil. Kč. Použitá simulační metoda neumožňuje zhodnocení nutné kapacity zásobníků, není tak možné cenu určit přesně.

Nutno však konstatovat, že zavedení dvoustranného napájení kromě úspory energie přináší také zmenšení poklesů napětí ve trakčním vedení (obr. 7 a obr. 8) a zmenšení maximálních proudů napájecích kabelů (tab. 4).



Zdroj: Autoři

Obr. 7 - Rozptyl napětí na sběračích trolejbusů v závislosti na poloze, současný stav



Zdroj: Autoři

Obr. 8 - Rozptyl napětí na sběračích trolejbusů v závislosti na poloze, při dvoustranném napájení

Narůst středního proudu úseku *Wajdeloty* nad hodnotu proudu úseku *Žródło Marii*, jenž se vyskytl po propojení těchto úseků, je způsoben asymetrií napájecí soustavy – rozdílem mezi délkami napájecích kabelů.

Tab. 4 - Srovnání proudů napájecích úseků, var. 1 – stávající situace, var. 2 – dvoustranné napájení

Úsek		varianta 1	varianta 2
Wajdeloty	střední proud	134 A	160 A
	max. proud	1410 A	1211 A
Žródło Marii	střední proud	157 A	120 A
	max. proud	1750 A	1039 A

Zdroj: Autoři

ZÁVĚR

Na základě výsledků měření a simulace modelu Monte Carlo je možné konstatovat, že zpracovaný simulační model dává důvěryhodné výsledky. Přesnost modelu je dostatečná pro analýzu trolejbusových systémů. S použitím této metody jsme ověřili, že využití tohoto modelu pro energetickou analýzu trakčního systému je možné.

Případným problémem zlepšování spolehlivosti této metody je podstatný rozptyl technických údajů a parametrů trolejbusů, např. převodové poměry zadních náprav nebo trakční charakteristiky motorů.

Je třeba také zmínit, že námi zpracovaný model může být využit i pro analýzu jiných elektrických systémů městské dopravy, které jsou ovlivněny nerovnoměrností silničního provozu, např. tramvajové dopravy.

POUŽITÁ LITERATURA

- (1) GOŁASZEWSKI, T. *Obliczenia obciążeń układu zasilania sieci tramwajowej przy wykorzystaniu metody Monte Carlo, diplomová práce*. Warszawa: 2000, Politechnika Warszawska.
- (2) *Komplexní výpočet napájecí sítě městské hromadné dopravy. Závěrečná zpráva V-18 – 70*. Praha: 1970, Ústav silniční a městské dopravy.
- (3) PODIVIN, L. *Metodika energetických výpočtů*, Pardubice: 2008 – nepublikované vydání.
- (4) HO, T. K. *Probabilistic load flow in AC electrified railways*, IEEE Proceeding – Electr. Power Appl., vol 152, No 4, July 2005.
- (5) KROCZAK M. *Symulacja zelektryfikowanej linii kolejowej o złożonej strukturze zasilającej, doktorská dizertace*. Warszawa: 2008, Politechnika Warszawska.
- (6) JUDEK, S., SKIBICKI, J. *Evaluation of electrical parameters of traction supply system for complex railway traffic conditions, using simulation methods*. Gdańsk: 2009, 9th International Conference Modern Electric Traction MET'2009, conference proceedings.
- (7) SOLAREK, T. *Parameters of capacitor devices used for storing energy from recuperative braking and the probability of their application in tram traction*, Gdańsk: 2009, 9th International Conference Modern Electric Traction MET'2009, conference proceedings.
- (8) NIEDERREITER. H., SHIUE P. *Monte Carlo and Quasi Monte Carlo Methods in Scientific Computing*. Nowy Jork: 1995, Springer.
- (9) ALLENBACH, P., TUXUAN, M., WETTER, R., SIMOND, J., MAYAMA, H., OCHSNER J. *TLSim: A Software for Electrical Public Transportation Systems*, Lausanne: 2001, EPFL.
- (10) BARTŁOMIEJCZYK, M.: *Analiza systemu zasilania trolejbusów z wykorzystaniem metody Monte Carlo, doktorská dizertace*, Gdańsku: 2011, Politechnika Gdańska.