

## ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДИКА ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕТО НА ТРОЛЕЙБУСНИЯ ТРАНСПОРТ

**Valentin Gyurov<sup>1</sup>, Nikolay Bezhanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Технически университет-Варна, кат., „Електроснабдяване и електрообзавеждане”

<sup>2</sup>Технически университет-Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, докторант

## APPLICATION OF METHODOLOGY FOR FORECASTING OF ENERGY CONSUMPTION IN TROLLEYBUS TRANSPORT

**Valentin Gyurov<sup>1</sup>, Nikolay Bezhanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment

<sup>2</sup> Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment, PhD Student

### Abstract

*The paper presents an application of a methodology for energy planning of electricity consumption in electric power supply systems of urban electric public transport. Represented is the practical application of the methodology for a trolleybus transport in Varna, Bulgaria. The study includes a comparative analysis with experimental research of the trolleybuses electricity consumption in other cities in Bulgaria and Europe.*

**Keywords:** urban electric transport, energy planning, recuperation energy in electric transport, trolleybus transport

### ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на електропотреблението в обществения сектор се оценява, анализира и регламентира чрез национална и регионални стратегии за енергийно развитие. Изследванията в сектора показват, че транспортът е значим дял от енергопотреблението на населените места, като дяловото му участие към общия енергиен микс достига до 30%. В това число влизат първичните енергоносители на база петролни продукти и електрическата енергия. По отношение на електрическия транспорт, неговото участие в сектора транспорт е относително ниско – 25%, като са налице тенденции за неговото увеличаване, с оглед намаляване на вредното екологично въздействие, повишаване на енергийната ефективност и намаляване на шумовото замърсяване. Това се подпомага от редица европейски финансови програми, като в резултат за периода 2010-2019 г. градовете София, Варна, Бургас, Плевен, Стара Загора и др. значително подобриха електрическите си транспортни средства чрез въвеждането в експлоатация на ново поколение тролейбуси, които освен

подобри енергетични параметри, позволяват и ефективно използване на генерираната рекуперативна енергия при инерционни и спиращи режими.

Настоящото изследване представя приложението на методика за прогнозиране на електропотреблението в тролейбусния транспорт в зависимост от техническите характеристики на превозните средства, географските параметри на населеното място, маршрута на движение. Предложената методика е базирана на предходни изследвания, дефиниращи връзката между електропотребление и режима на движение на транспортни средства [1], [2]. В настоящото изследване е разработена цялостна методика, която позволява изчислението на електропотреблението чрез задаване на параметрите на маршрута и характеристиките на тролейбусите. За целта е разработен алгоритъм в среда MathCAD, работещ с кадастрални данни от Google Earth. Преставено е приложение на методиката за тролейбусния транспорт на гр. Варна, включващ линии №82, №83, №86 и №88.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Чрез разработената методика е прогнозирано електропотреблението на линиите на градски транспорт в гр. Варна, но тя е приложима и за всички други видове електрически транспорт. За прогнозирането на електропотреблението се изхожда от оценка на консумираната мощност на база необходимата тягова мощност за различните режими на движение – ускорение, движение с постоянна скорост, инерционно и режим на спиране. Основните зависимости, характеризиращи движението са анализирани в изследвания [1], [2], като в настоящето изследване те се усъвършенстват чрез детайлна оценка и метод за изчисление за всеки един от режимите, базирана на географските особености на гр. Варна.

### 1. Методика за прогнозиране на електропотреблението на тролейбусния транспорт

При движението на тролейбуса могат да се дефинират три режима – ускорение, равномерно движение и спиране. Консумираната електроенергия от тролейбуса се изчислява по (1):

$$E_a = P_E \cdot t \quad (1)$$

Необходимата електрическа мощност се изчислява по (2):

$$P_E = \frac{P_M}{\eta} \quad (2)$$

Необходимата механична мощност е функция на масата на превозното средство, масата на товара, ускорението, скоростта и съпротивителната сила. Методиките за изчисление са показани в [1], [2].

$$P_M = f(m, m_t, v, a, F_R) \quad (3)$$

Съпротивителната сила  $F_R$  има три съставки, които са показани в (4):

$$F_R = F_{RR} + F_{Grad} + F_{Drag} \quad (4)$$

Съпротивителната сила при търкаляне  $F_{RR}$  се определя с (5):

$$F_{RR} = \mu \cdot W, \quad (5)$$

където:  $\mu$  – коефициент на съпротивление при търкаляне;  $W$  – натоварване на колелата [N].

Гравитационната сила  $F_{Grad}$  в общия случай, когато наклонът на пътя  $\theta \neq 0$ , се определя чрез (6):

$$F_{Grad} = \pm m \cdot g \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

където:  $m$  – маса на тролейбуса [kg];  $g=9.807$  [m/s<sup>2</sup>] – земното ускорение;  $\theta$  – ъгъл на наклона на пътя [deg].

Съпротивителната сила на аеродинамичното съпротивление  $F_{Drag}$  се определя по (7). Съпротивителната сила на аеродинамичното съпротивление се определя от действието на турбулентни въздушни потоци и включва плътността на флуида, площта на напречното сечение на тролейбуса и неговата скорост.

$$F_{Drag} = 0.5 \cdot \rho_{air} \cdot c_d \cdot A_f \cdot v_{air}^2, \quad (7)$$

където:  $\rho_{air} = 1.29$  [kg/m<sup>3</sup>] – плътност на въздуха;  $c_d = 0.76$  безразмерен коефициент на аеродинамично съпротивление;  $A_f$  – площ на напречното сечение на тролейбуса [m<sup>2</sup>];  $v_{air}$  – скорост на движение на флуида спрямо тролейбуса [m/s].

### 2. Приложение на методика за прогнозиране на електропотреблението на тролейбусния транспорт

Изследваният обект са тролейбусните линии на Градски транспорт гр. Варна, състоящ се от четири линии: №82, №83, №86 и №88.

За всяка една линия е направено разбиране по участъци, като са изчислени показателите за трите различни режима. За оценка на възможната рекуперативна енергия се отчита тази, която е с отрицателен знак при движение по инерция.

За осъществяването на планирането освен дължината на трасето и денивелацията на маршрута е необходимо основните технически данни на електрическото превозно средство, в нашия случай тролейбус Skoda 26 Тг. Основните технически данни на тро-

лейбус Skoda 26 Tr Solaris са показани в Таблица 1.

Табл. 1

Параметър	Описание
вид електродвигател	асинхронен, 4 полюса
количество [бр.]	1
номинална мощност [kW]	160
номинална мощност на инвертора [kVA]	205
маса на тролейбуса [kg]	10900
обща маса с товар [kg]	18000
брой пътници	86

### Линия №82

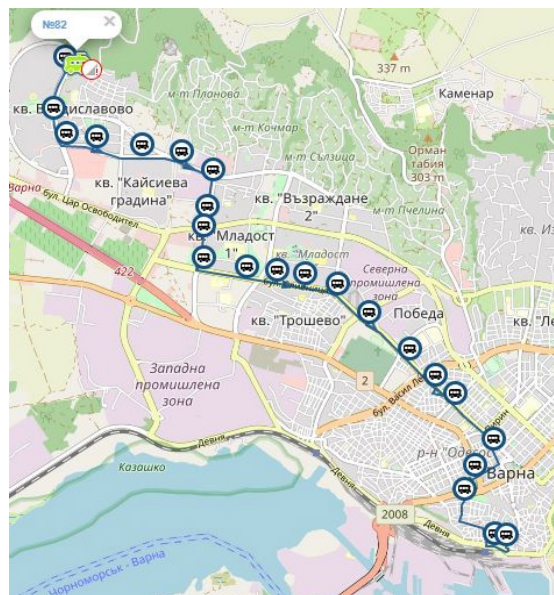
Изследваният маршрут свързва Централна ж.п. гара и кв. Владиславово. Общата дължина на трасето е  $L=10.783$  [km], като се характеризира с изкачване от 2 m до 169 m надморска височина. По протежението на трасето са разположени 23 автобусни спирки. Визуализация на маршрута е показана на Фигура 1. Графикът им на движение е през интервал 20 мин. от 5:30 AM до 22:5 PM.

### Линия №83

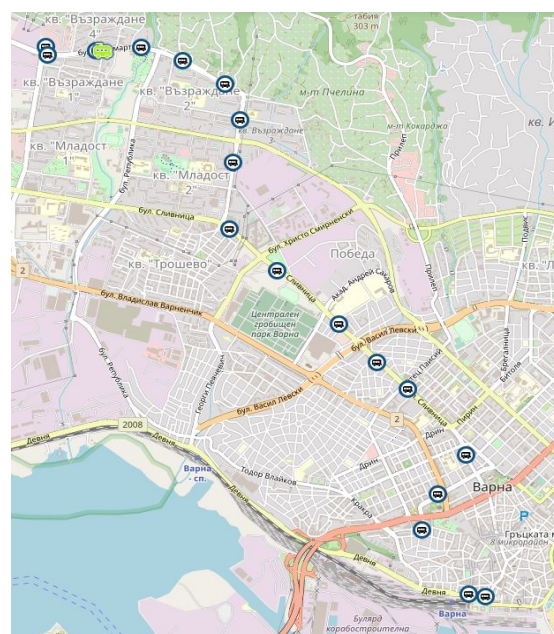
Линията свързва кв. Възраждане с ж.п. гара и е с обща дължина на трасето  $L=8.4$  km, като се характеризира със спускане от 114 m до 2 m надморска височина. Маршрутът е визуализиран на Фигура 2. По протежение на маршрута са разположени 16 автобусни спирки.

### Линия № 86

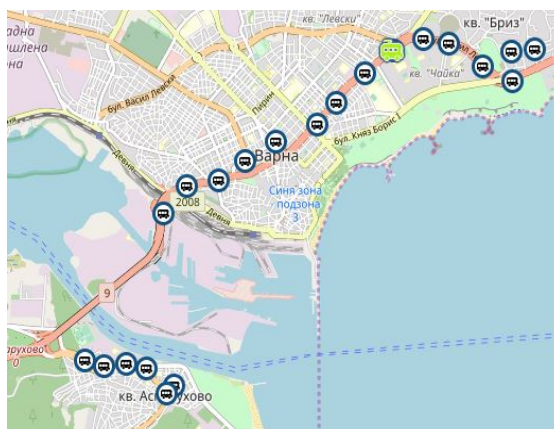
Линията е с дължина  $L=8.4$  km и свързва кв. Почивка с кв. Аспарухово. Характеризира се със силно изразен денивационен момент в различните участъци. По протежението на трасето са разположени 19 спирки, като се характеризира със спускане от 62 m до 8 m надморска височина. Визуализация на маршрута е показан на Фигура 3.



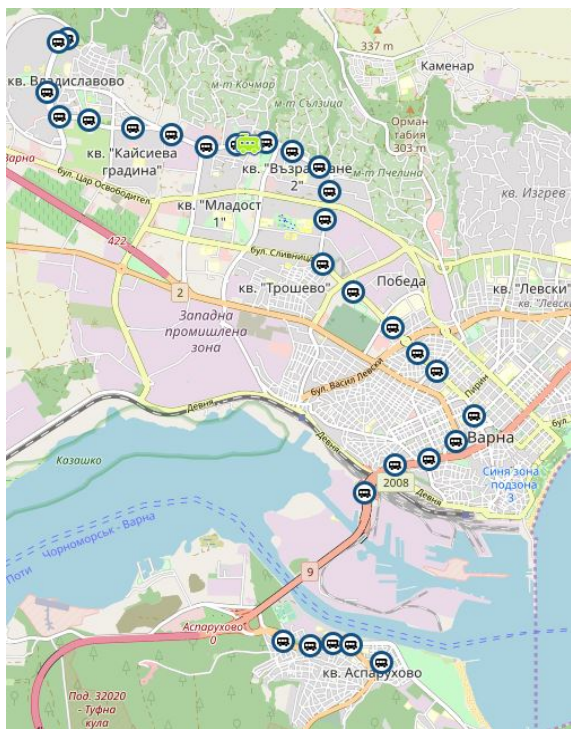
Фиг. 1. Маршрут на тролейбусна линия №82



Фиг. 2. Маршрут на тролейбусна линия №83



Фиг. 3. Маршрут на тролейбусна линия №86



Фиг. 4 . Маршрут на тролейбусна линия №88

### Линия №88

Като най-дълга тролейбусна линия, показаната на Фигура 4 линия №88 свързва крайните квартали кв. Владислав Варненчик с кв. Аспарухово. Дължината на линията е  $L=15.5$  km. По протежението си обслужва 28 спирки с денивелация от 169 m до 8 m надморска височина.

Поради големия обем на данните в настоящия доклад ще бъде представена извадка за една от линиите – линия №88. Изчисленията за другите линии са аналогични. В Таблица 2 са показани входните данни, необходими за изчисляване на маршрута линия №88 с отчитане стойностите на надморската височина и изминатото разстояние на тролейбуса от светофар до светофар, от светофар до спирка и от спирка до светофар.

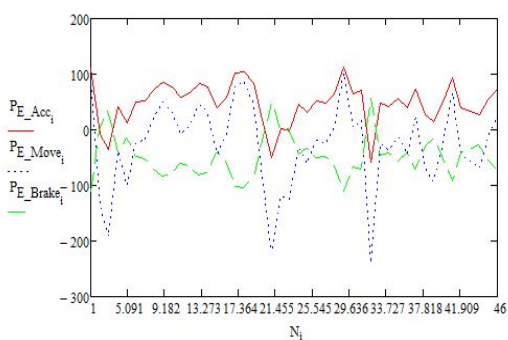
По показаната в т. 1 методика и с помощта на софтуерното приложение в MathCAD се извършва изчисление на движението на тролейбус в двете посоки на маршрута. Трасето се характеризира с голяма денивелация между началната и крайната точка, което предопределя наличието на значими разлики в електропотреблението.

Табл. 2

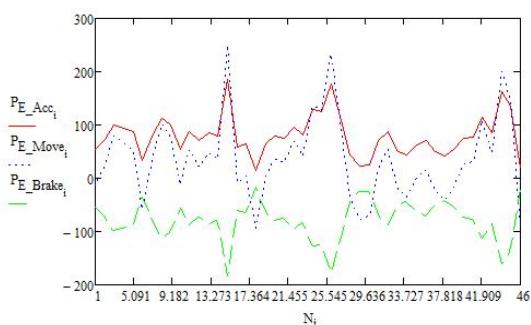
№	начало [m]	край [m]	Дължина [m]	Скорост [km/h]
1	166	169	80	40
2	169	162	120	40
3	162	122	500	40
4	122	119	170	40
5	119	108	260	40
6	108	107	90	40
7	107	102	530	40
8	102	103	120	40
9	103	108	270	40
10	108	113	460	40
11	113	111	400	40
12	111	112	600	40
13	112	113	60	40
14	113	117	380	40
15	117	114	150	40
16	114	113	200	40
17	113	117	130	40
18	117	122	150	40
19	122	130	480	40
20	130	116	390	40
21	116	103	140	40
22	103	100	60	40
23	100	68	600	40
24	68	65	200	40
25	65	57	300	40
26	57	55	200	40
27	55	50	400	40
28	50	50	200	40
29	50	58	200	40
30	58	58	300	40
31	58	59	200	40
32	59	49	100	40
33	49	44	400	40
34	44	37	400	40
35	37	34	450	40
36	34	31	150	40
37	31	33	280	40
38	33	30	100	40
39	30	18	300	40
40	18	12	500	40
41	12	50	1500	40
42	50	19	1600	40
43	19	14	200	40
44	14	8	200	40
45	8	4	500	40
46	4	8	500	40

Изменението на електрическата мощност за осъществяване на тяговото движение за

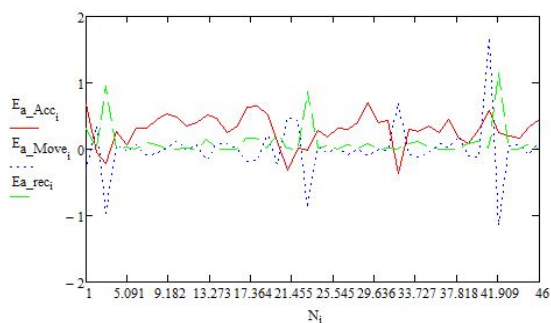
съответните две посоки на маршрута са показани на Фигура 5 и Фигура 6.



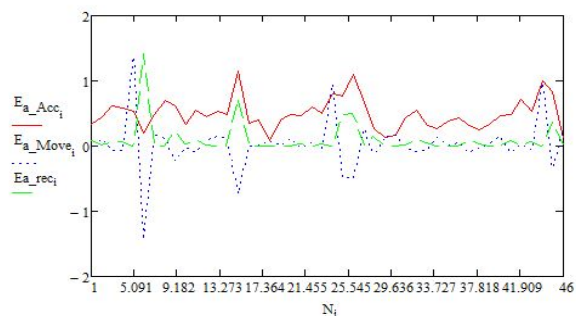
Фиг. 5. Изменение на  $P_{E\_Acc}$ ,  $P_{E\_move}$  и  $P_{E\_brake}$  в посока кв. Владиславово – кв. Аспарухово (спускане).



Фиг. 6. Изменение на  $P_{E\_Acc}$ ,  $P_{E\_move}$  и  $P_{E\_brake}$  в посока кв. Аспарухово – кв. Владиславово (изкачване).



Фиг. 7. Изменение на  $E_{a\_Acc}$ ,  $E_{a\_Move}$  и  $P_{a\_rec}$  в посока кв. Владиславово – кв. Аспарухово (спускане)



Фиг. 8. Изменение на  $E_{a\_Acc}$ ,  $E_{a\_Move}$  и  $P_{a\_rec}$  в посока кв. Аспарухово – кв. Владиславово (изкачване)

При движението на тролейбусите могат да се дефинират следните три режима – ускорение при потегляне, равномерно движение (или инерционно движение с поддържане на постоянна скорост) и спиране. При дефинирането на всяка величина за всеки един от режимите се въвеждат следните индекси – „Acc”- при ускорение, „Move”- при равномерно движение, „Brake” - при спиране.

Изменението на консумираната електроенергия при ускорение, равномерно движение и генерирана рекуперативна при инерционно движение за съответните две посоки на маршрута са показани на Фигура 7 и Фигура 8.

Индивидуалните и обобщени данни за консумацията на електроенергия, специфичния разход на електроенергия и теоретично възможната генерация на рекуперативна електроенергия са показани в Таблица 3.

Табл. 3

Линия	$E_a$ [kWh]	$E_{a\_rec}$ [kWh]	$e$ [kWh/km]	$e_{rec}$ %
ж.п. гара – кв. Владиславово	24.33	3.17	2.20	13.01
кв. Владиславово – ж.п. гара	15.46	4.30	1.40	27.78
<b>Общо за линия №82</b>	<b>39.79</b>	<b>7.46</b>	<b>1.80</b>	<b>18.75</b>
ТИС Север – ж.п. гара	11.31	2.80	1.30	24.80
ж.п. гара - ТИС Север	17.50	2.50	2.10	14.30
<b>Общо за линия №83</b>	<b>28.81</b>	<b>5.30</b>	<b>1.71</b>	<b>18.40</b>
кв. Почивка – кв. Аспарухово	14.18	3.70	1.70	26.20
кв. Аспарухово – кв. Почивка	18.20	2.50	2.20	13.00
<b>Общо за линия №86</b>	<b>32.38</b>	<b>6.20</b>	<b>1.93</b>	<b>19.15</b>
кв. Владиславово – кв. Аспарухово	19.40	5.30	1.20	27.40
кв. Аспарухово – кв. Владиславово	28.00	4.80	1.80	17.00
<b>Общо за линия №88</b>	<b>47.40</b>	<b>10.10</b>	<b>1.53</b>	<b>21.31</b>
<b>Общо за всички линии</b>	<b>148.38</b>	<b>29.06</b>	<b>1.71</b>	<b>19.59</b>

Относителната стойност на теоретично възможната за генерация рекуперативна енергия  $E_{a\_rec}\%$  се определя като отношение към консумираната активна енергия. В настоящото изследване  $E_{a\_rec}\%=19.59$  [%].

Резултатите показват количествена оценка за консумацията на активна енергия, теоретичната възможност за генерация на рекуперативна енергия и специфичния разход на електроенергия, които са сравними с други изследвания, базирани на експериментални данни от измервания. Изследвания в „Столична община” – гр. София, Република България за същия тип тролейбуси Skoda 26 Tr Solaris показват отчетени данни за  $e = 1.626$  [kWh/km] и  $E_{a\_rec} = 11.35\%$  и коригирани чрез аналитичен модел  $e = 1.124$  [kWh/km] и  $E_{a\_rec} = 21.75\%$  [3]. Изследвания в гр. Люблин, Република Полша за същия тип тролейбуси показват отчетени данни за  $e = 1.1$  [kWh/km] и  $E_{a\_rec} = 19.5\%$  [4]. Сравнителният анализ на резултатите показва, че с предложения подход, базиран на теоретично изследване, се постигат много близки резултати по отношение специфичния разход на електроенергия със Столична община – гр. София и гр. Люблин. По отношение на теоретично възможната генерирана рекуперативна енергия разликата също е в допустим порядък, като по-големите стойности за гр. Варна се дължат на големите разлики в денивелациите на трасетата, които не са характерни за географското разположение на гр. София. В сравнение с данните за гр. Люблин е налице разлика от 3.6%, но следва да се има предвид, че разработената методика обхваща само процеса на рекуперация при инерционно движение и не отчита тази в режим спиране до нулева скорост – установяване на спирка.

С помощта на предложения подход е възможно относително лесно и бързо да бъдат анализирани енергийните разходи в градския електрически транспорт за различни маршрути, различен график на движение и различно натоварване. Употребата ѝ със съответното софтуерно приложение позволява анализ на електропотреблението и генерираната рекуперативна електроенергия при промяна на някои от изброените параметри.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследването представя приложението на методика и софтуерно приложение в среда MathCAD за планиране на енергопотреблението на градския електрически транспорт с използването на топологията на мар-

шрута на движение, графика на движение и техническите характеристиките на транспортните средства. Показано е приложението на методиката за тролейбусен транспорт в гр. Варна.

Предимство на представената методика е възможността за предварителна оценка на очакваното енергийно потребление, специфичния разход на електрическа енергия и теоретично възможната генерирана рекуперативна енергия без употребата на експериментални данни от измервания. Сравнителният анализ с други изследвания в други градове при същия тип тролейбуси, базирани на експериментални изследвания, доказва достоверността и адекватността на предложената методика. Методиката е възможно да бъде усъвършенствана чрез прецизиране на някои параметри от вероятностно-статистически характер и отчитане на допълнителни влияещи на трафика и движението фактори.

*Представеното изследване е част от работата по проект в помощ на докторанти ПД2/2019 „Анализ на електропотреблението в електроснабдителни системи на градския електрически транспорт” по Фонд научни изследвания – Технически университет-Варна.*

## REFERENCE

- [1] N. Apostolidou, N. Papanikolaou, “Energy saving estimation of Athens trolleybuses considering regenerative braking and improved control scheme”, MDPI Resources, pp. 1-18, July 2018.
- [2] D. Baumeister, M. Salin, M. Wazifehdust, P. Steinbusch, M. Zdrallek, S. Mour, L. Lenuweit, P. Deskovic and H. Ben Zid, “Modelling and simulation of a public transport system with battery-trolleybuses for efficient e-mobility integration”, E-mobility Power System Integration Symposium, Proceedings, October 2017.
- [3] G. Dimitrov, G. Pavlov, “Analysis of the efficiency of regenerative braking systems of trolleybuses Skoda Solaris under real operation condition”, Journal of Mechanic, Transport, Communication, Vol 14, No 3/2, pp. 24-31, 2016.
- [4] E. Simonec, “Analysis of trolleybus energy consumption”, Advance in Science and Tehcnology Research Journal, Vol.7, Issue 18, pp.81-84, June 2013.