

FRI-2.204-2-SITST-13

METHODOLOGY FOR MEASURING THE ENERGY OF A TROLLEYBUS IN OPERATING CONDITIONS ¹

Prof. Velizara Pencheva, PhD

Department of Transport,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082-888 240
E-mail: vpencheva@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Asen Asenov, PhD

Department of Transport,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 086-821 605
E-mail: asasenov@uni-ruse.bg

***Abstract:** The report presents a methodology and equipment for measuring the energy consumption of a trolleybus from public transport in operating conditions. The research was performed in the city of Ruse on one of the busiest and most used routes by citizens. During the study, the energy that is returned to the grid from the recovery process is also changed. For the purpose of measurement, a measuring system has been created, which records the data in digital form and allows the next processing, visualization and analysis. The results of the study are suitable for determining the necessary technical data for the selection of alternative sources for propulsion of trolleybuses, such as batteries, hydrogen fuel cells and hydrogen tank..*

***Keywords:** city mobility, logistics, transportation model, vehicle*

JEL Codes:

ВЪВЕДЕНИЕ

Използването на тролейбуси и автобуси, задвижвани с електричество и алтернативни горива като водород, вместо автобуси с двигатели с вътрешно горене, ползващи течни горива, като дизелово гориво и смеси е новата тенденция за превозване на пътници с масовия градски пътнически транспорт. Изследванията при обществения транспорт са от съществено значение за подобряване на качеството на услугата и удовлетворяване на изискванията на гражданите. Затова по важните въпроси, като скоростта на движение на превозните средства са известни изследвания в (Madjarski, E. M., Saliev, D. N., Damianov, I., Mladenov, G. & Pashkulski, G., 2009), за разходът на енергия от обществения транспорт в Люблин в (Dziubiński M., E. Siemionek, A. Drozd, W. Jarzyna & Jarzyna W., 2016), а за автобусите само с дизелови двигатели в (Taubert S. & Majerczyk A., 2013). По въпросите за работата на тролейбусите в Р. България в (Madjarski, E. M., Saliev, D. N. & Vasilev D., 2008) и Чешката Република в (Kohout J., 2020).

В Националната научна програма за Нисковъглеродна енергия за транспорта и бита на Министерството на образованието и науката от 2018 г. е предвидено в Р. България да се развие и въвеждат нови технологии, свързани с възобновяемата енергия и декарбонизиране на икономиката, (Bulgarian Academy of Sciences, 2020). Една от задачите по програмата е да се създаде пътно превозно средство задвижвано хибридно с електричество и водород. Преглед на стратегиите за енергиен мениджмънт на такова превозно средство е направен в (Tazelaar E, Veenhuizen B, Jagerman J. & Faassen T., 2013), където са представени характерните особености. В градовете освен автобуси с дизелови двигатели се използват и електрически превозни средства, като мотриси в метрото, под земята и наземно трамвай по обособени

¹ Докладът е представен на научната сесия на 12 ноември 2020 с оригинално заглавие на български език: МЕТОДИКА ЗА ИЗМЕРВАНЕ ЕНЕРГИЯТА НА ТРОЛЕЙБУС В ЕКСПЛОАТАЦИОННИ УСЛОВИЯ

трасета и тролейбуси, които се движат заедно с останалите превозни средства по едни и същи пътища. В случая интерес представляват тролейбусите, които са ограничени, спрямо автобусите от контактната си мрежа. Изследвания за определяне на разходът на енергия на тролейбусите са правени в (Dziubiński M., Siemionek E., Siemionek E., Adamiec M. & Kołodziej S., 2017), за техните условия на експлоатация.

В България по националната програма е избран тролейбус от масовия градски транспорт, който да се оборудва с удължител на пробега осигурен от енергията получена от водород. По този начин ще се осигури независимо от електрическата мрежа придвижване на тролейбуса до спирки по продължение на маршрута, които са обслужвани в момента само от автобуси. За правилното определяне на необходимата енергия, която следва да се осигури от водорода е необходимо да се направят предварителни изследвания за разхода на енергия от тролейбуса в експлоатационни условия и след това като се използват резултатите от (Punov P., V. Draganov & Gechev T., 2020) да се премине към дооборудване на тролейбуса за работа с водород.

ИЗЛОЖЕНИЕ

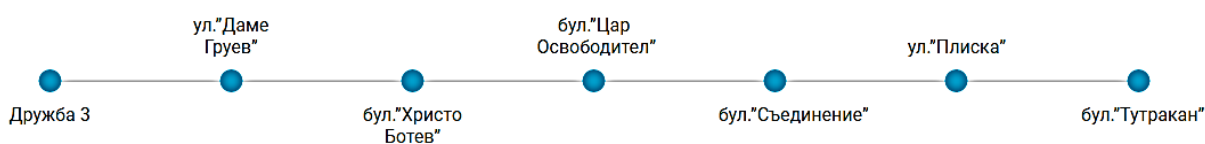
1. Процедура за изпитване на електрически превозни средства от масовия градски транспорт.

За определяне на разхода на енергия на електрически автобуси в експлоатационни условия е известна методиката приложена от холандската организация за Приложни научни изследвания (TNO). През 2013г. тя провежда изследване, на електрически автобус произведен от Ebusco като прилага процедурата SORT (Standardised On-Road Cycles). Характерно за тази процедура, е че има три цикъла на тест: SORT 1: натоварен градски маршрут; SORT 2: слабо натоварен градски маршрут с умерен транспортен поток; SORT 3: лесен околградски маршрут, (International Association of Public Transport, 2014). При направеното изследване пълната маса на автобуса с товар е била 14 410 kg. Резултатите от тестовете показват че при SORT 1: натоварен градски маршрут: разходът на енергия е 115 kWh/100km; при SORT 2: слабо натоварен градски маршрут с умерен транспортен поток при пробег разходът на енергия е 114 kWh/100km и при SORT 3: лесен околградски маршрут количеството на необходимата енергия е 115 kWh/100km. Изследвания на ключови фактори, които влияят върху разходът на енергия на електрическите превозни средства са отчетени в (Lu R, Yang A, Xue Y, Xu L. & Zhu C., 2011), а в (Jivkov V, Draganov V. & Stoyanova Y., 2015) е изследван коефициентът на възстановяване на енергията, който влияе на пробега на електрическото превозно средство.

В този доклад е предвидено да се направи подходяща методика за измерване разходът на енергия на тролейбус в условията на град Русе. В град Русе тролейбусият транспорт извършва превози на пътници само в градската част и затова предвидената методика за измерване разхода на енергия следва да включва само този цикъл. Градът условно е разделен на две зони. Едната е сравнително равна, а другата включва наклон, по който има продължително изкачване в едната посока и спускане в обратна. Това е маршрутът към квартал Дружба 3.

2. Методика за измерване на енергията на тролейбус в град Русе.

- *Избор на маршрут и период на изследване.* За да може да се обхванат двете особени зони в град Русе е избран маршрут на тролейбус 27, който се движи от Захарен завод (бул. Тутракан) до Дружба 3, фиг.1.



Фиг. 1. Схема на маршрута на тролейбус 27

Характерно за маршрута е, че от крайната спирка с обръщало на квартал “Дружба 3” до бул. “Цар Освободител” движението е при спускане по наклон, а от бул. “Цар Освободител” до последната спирка с обръщало на бул. “Тутракан” движението се извършва по сравнително равен път. Аналогично е в обратна посока, когато има изкачване в участъка от бул. “Цар Освободител” до крайната спирка с обръщало на квартал “Дружба 3”. Периодът на изследване е съобразен с натоварените и ненатоварените часови интервали на денонощието. Според разписа на тролейбусите по този маршрут движението им започва сутрин в 5:30ч. и приключва вечер в 20:00ч. (Municipal Transport Ruse, SJSC, 2020). Затова е планирано да се измери разходът на енергия по целия маршрут в пиковите периоди от 7:00ч. до 8:30 ч. и 16:30ч. до 18:00 ч. , които са периоди с натоварено улично движение и с най-голям брой пътници и през непиковите през останалото време, когато съответно броят на пътниците и броят на автомобилите по улиците е най-малък.

• *Избор на превозно средство.* При избора на тролейбус беше избран несъчленен тролейбус марка Рено с мощност на електродвигателя 125 kW, вместимост 90 пътника, от които 64 правостоящи и пълна маса 18 тона, фиг.2. Характерно за тролейбуса, е че има възможност за рекуперация на енергията, която се връща обратно в електрическата мрежа. При избора на апаратура е предвидено да може да се записва и енергията, която се връща в електрическата мрежа понеже тя би могла да се използва допълнително.



Фиг.2. Общ вид на избрания за изследването тролейбус в град Русе

• *Избор на измервателна апаратура.* При избора на измервателна апаратура е предвидено тя да бъде с достатъчна точност и памет за да запише цялата информация от изследването през работния ден във функция на времето и същевременно да не е скъпа. Затова е създадена система за измерване, която включва Data Logger TRC DL8 за събиране на данни, фиг.3 със следните технически характеристики: 4 аналогови измервателни входа за напрежения от 0 до 5,12V; разрешаваща способност 5mV; грешка $\pm 15\text{mV}$; входно съпротивление не по-малко от 1 M Ω ; 4 цифрови входа – тип TTL - за напрежения от 0 ÷ 5 V; защита на измервателните входове от претоварване: от – 5 V до 10V; темп на измерване - избираем: 20Hz с време за запис 9,44 h; 10Hz с време за запис 18.9h; 1Hz с време на запис 188.9h и 0.1Hz с време на запис 1889h.

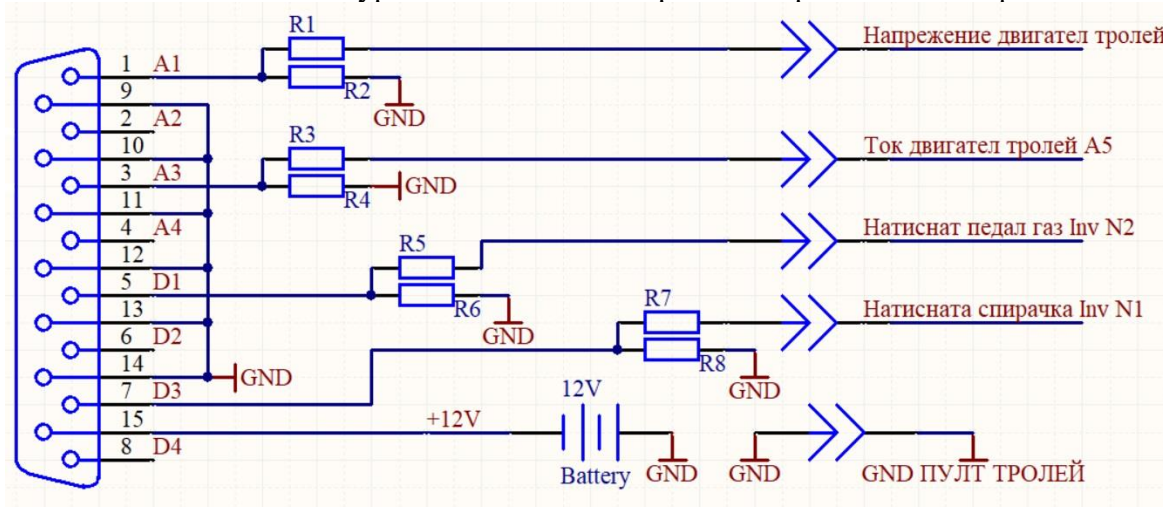


Фиг.3. Общ вид на устройството за събиране на данни Data Logger TRC DL8

Стартирането и спирането на измерването е избираемо: при подадено захранване, при натискане на бутон или при появяване на логическа единица на вход 8. Максималния брой на съхраняваните резултати е 680 000; резултатите от измерванията се съхраняват в оперативната памет на устройството с обем 4МВ; има LCD двуредова индикация по 16 символа; часовник за реално време (RTC), записващ година, месец, ден, минута с грешка 1мин/месец. Захранващото напрежение е 12V, което може да се подава през сигналния съединител или през захранващата бука. Консумиран ток максимално /с включена флеш-памет/ 200 mA; работен температурен обхват: $-10^{\circ}\text{C} \div 40^{\circ}\text{C}$.

- *схема на свързване.* Уредът се свързва към изнесен пулт на система за контрол на работата на тролейбуса, като захранването е с допълнителен акумулатор. За свързването е използван куплунг DB15 на уреда.

Отчитайки аналоговите сигнали от изнесен пулт на системата за контрол на работата на тролейбуса $0 \div 10\text{V}$, на входовете на уреда се поставят делители на напрежение с коефициент на делене 0,5. По този начин измерваните стойности се ограничават в диапазона на аналоговите входове $0 \div 5\text{V}$ на уреда. Схемата на свързване е представена на фиг.4.



Фиг.4. Схема на свързване на уреда към изнесен пулт на система за контрол на работата на тролейбуса

Номерата на пиновете на куплунга, имената на входовете, цветовете на свързващите проводници, измерваните параметри, коефициентите на измерване и точките на включване към пулта на системата за контрол на работата на тролейбуса са представени в табл.1.

Таблица 1. Описание на връзките между уреда за измерване и пулта на тролейбуса

| № | № Пин DB15 | Канал | Цвят кабел | Измерван параметър | Коефициент на измерване напрежение уред /напрежение пулт | Точка на включване |
|----|----------------------|-------------|----------------------------------|-------------------------------|---|--------------------|
| 1 | 1 | A1-аналогов | Зелен /бял | Напрежение двигател "U" | 0,5V=100V | C5 |
| 2 | 2 | A2-аналогов | - | - | - | - |
| 3 | 3 | A3-аналогов | Червен /бял | Ток двигател "I" | 0,5A=60A | A5 |
| 4 | 4 | A4-аналогов | - | - | - | - |
| 5 | 5 | D1-цифров | Син/бял | Педал ГАЗ (0 V-натиснат) | Натиснат-0V ненатиснат-10V | N2 |
| 6 | 6 | D2-цифров | - | - | - | - |
| 7 | 7 | D3-цифров | Оранжев /бял | Педал Спирачка (0 V-натиснат) | Натиснат-0V ненатиснат-10V | N1 |
| 8 | 8 | D4-цифров | - | - | - | - |
| 9 | 9,10,11, 12,13,14 | Маса (GND) | Зелен, син, черен, оранжев | Захранване Акумулатор -12V | - | - |
| 10 | 15 | +12V | Червен | Захранване Акумулатор +12V | - | - |

• *Провеждане на изследванията.*

При измерването системата работи в следната последователност:

- При натиснат педал „ГАЗ“ се консумира енергия, която се записва;
- При натиснатата „Спирачка“ се отчита енергията за рекуперация на спирачната система;
- Разликата между двете енергии показва консумираната енергия, която следва да се отчита от тролейбуса за свършената работа по превоза на пътници.

Консумираната или рекуперирана енергия се изчисляват с израз

$$E = U \cdot I \cdot \Delta\tau, \text{ kWh}, \quad (1)$$

където U е напрежението на двигателя, V ;

I - токът на двигателя, A ;

$\Delta\tau$ - времето на измерване, h .

След приключване на измерванията, записаната информация от уреда се прехвърля на флашка. Прехвърлената информация се записва на персонален компютър и се преобразува във формат на Excel на Microsoft чрез програма DataLoggerFileConverter. След това информацията може да се обработи и представи и в графичен вид.

3. Резултати от изследването.

От направеното изследване по определения маршрут са получени резултати, част от които са представени в табл.1 и табл.2. Данните показват, че най-голямата мощност необходима за преодоляване на съпротивленията, действащи върху тролейбуса е 166,4 kW в посока на маршрута със спускане от Дружба 3 към Захарна фабрика, табл.1 и 233,02 kW при движение в обратна посока на изкачване, табл.2. За изминаване на разстоянието по маршрута от Дружба 3 до Захарна фабрика с дължина 6,486 km е изразходвана 7,735 kWh енергия и е рекуперирана 0,0498 kWh. Това показва, че общата енергия, която е получена от електрическата мрежа е 7,023 kWh. При по-тежките условия на експлоатация от Захарна фабрика до Дружба 3 с дължина 7,078 km е изразходвана 14,481 kWh енергия и е рекуперирана само 0,0198 kWh. Това показва, че общата енергия, която е получена от електрическата мрежа е 14,461 kWh.

Табл.1. Резултати от изследването на необходимата мощност на тролейбус Рено по маршрута Дружба 3 - Захарна фабрика

| Време | Напрежение | Ток | Работа | Спиране | Мощност |
|-------|------------|---------|--------|---------|-----------------|
| sec. | V | A | има | няма | kW |
| 280,8 | 93,750 | 257,814 | 0 | 1 | 24,1700 |
| 280,9 | 527,342 | 257,228 | 0 | 1 | 135,6471 |
| 281 | 606,444 | 261,329 | 0 | 1 | 158,4815 |
| 281,1 | 648,436 | 256,642 | 0 | 1 | 166,4157 |
| 281,2 | 647,459 | 254,884 | 0 | 1 | 165,0269 |
| 281,3 | 600,584 | 247,853 | 0 | 1 | 148,8564 |
| 281,4 | 558,592 | 249,025 | 0 | 1 | 139,1032 |

Табл.2. Резултати от изследването на необходимата мощност на тролейбус Рено по маршрута Захарна фабрика - Дружба 3

| Време | Напрежение | Ток | Работа | Спиране | Мощност |
|--------|------------|---------|--------|---------|-----------------|
| sec. | V | A | има | няма | kW |
| 1151,2 | 585,936 | 351,564 | 0 | 1 | 205,9940 |
| 1151,3 | 585,936 | 349,806 | 0 | 1 | 204,9640 |
| 1151,4 | 584,959 | 351,564 | 0 | 1 | 205,6507 |
| 1151,5 | 665,037 | 350,392 | 0 | 1 | 233,0239 |
| 1151,6 | 585,936 | 351,564 | 0 | 1 | 205,9940 |
| 1151,7 | 585,936 | 350,978 | 0 | 1 | 205,6507 |
| 1151,8 | 585,936 | 348,634 | 0 | 1 | 204,2774 |

Получените данни дават възможност да се определи в условията на експлоатация като тези в град Русе какви акумулаторни батерии и какви горивни клетки на водород трябва да се изберат, за да се осигури движението на тролейбус, задвижван по алтернативен начин, през времето му в наряд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представена е методика и е създадена система за измерване на консумираната и рекуперираната енергия от електрическо превозно средство.

Създадената система позволява да се получат реални данни за мощността и консумираната енергия на тролейбус, използван в масовия градски пътнически транспорт в град Русе в експлоатационни условия. От получените резултати е определено, че

максималната необходима мощност при по-трудния терен е 233, 02 kW, а необходимата енергия за извършване на превоз по маршрута от Дружба 3 до Захарна фабрика е 7,023 kWh от в обратна посока 14,461 kWh.

БЛАГОДАРНОСТИ

This work was supported by the Bulgarian Ministry of Education and Science under the National Research Programme E+: Low Carbon Energy for the Transport and Households, grant agreement D01-214/2018 and the National Roadmap for Research Infrastructure (2017-2023)

REFERENCES

Bulgarian Academy of Sciences (2020). *National Research Program " Low Carbon Energy for the Transport and Households "* 2018-2021. EPLUS, Ministry of Education and Science (**Оригинално заглавие:** Българската академия на науките. *Национална научна програма "Нисковъглеродна енергия за транспорта и бита"* 2018-2021. ЕПЛЮС, Министерство на образованието и науката. Available at: <https://eplus.bas.bg/bg> .

International Association of Public Transport (2014) *UITP project 'SORT' Standardised on-road test cycles*. New edition UITP, Legal Deposit: D/2014/0105/1. 2014. P. 43

Municipal transport Ruse. SJSC (2020). (**Оригинално заглавие:** Общински транспорт Русе ЕАД. (2020). Available at: <http://www.transport-ruse.com/trolley/27>

Lu R, Yang A, Xue Y, Xu L, Zhu C. (2011). *Analysis of the key factors affecting the energy efficiency of batteries in electric vehicle*. World Electr Veh J. <https://doi.org/10.3390/wvej4010009>.

Jivkov V, Draganov V, Stoyanova Y. (2015). *Energy Recovery Coefficient and Its Impact on Achievable Mileage of an Electric Vehicle with Hybrid Propulsion System with Kinetic Energy Storage*. Int J Mech Eng Autom.

Punov P., V. Draganov, T. Gechev (2020). *Parametric Optimisation Of Fuel Cell/Battery Range Extender Integrated In A Trolleybus Powertrain*. 6th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2020, Kraków, Poland

Tazelaar E, Veenhuizen B, Jagerman J, Faassen T. (2013). *Energy Management Strategies for fuel cell hybrid vehicles; an overview*. World Electr. Veh. Symp. Exhib., 2013, p. 1–12. <https://doi.org/10.1109/EVS.2013.6915039>.

Taubert S., A. Majerczyk (2013). *Some Aspects Of Validation Of The Fuel Consumption Measurement Method*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 4, pp.457-466, DOI: 10.5604/12314005.1137860

Dziubiński M., E. Siemionek, E. Siemionek, M. Adamiec & S. Kołodziej (2017). *Energy Consumption of the Trolleybuses*. International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (ELMECO & AoS), Lublin, Poland. DOI: 10.1109/ELMECO.2017.8267723

Dziubiński M., E. Siemionek, A. Drozd, W. Jarzyna & W. Jarzyna (2016). *Analysis of energy consumption of public transport in Lublin*. Environmental engineering V: proceedings of the fifth National Congress of Environmental Engineering, Lublin, Poland, DOI: 10.1201/9781315281971-41

Kohout J. (2020). *EfficienCE – TEASER Pilsen to widen trolleybus network*. Pilsen, Czech Republic. Low-Carb and EfficienCE Transnational Webinar. <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/LOW-CARB-EfficienCE-Transnational-Webinar-13052020-Topic-2-S.pdf>

Madjarski, E. M., Saliev, D. N., Vasilev D. (2008). *Improvement Of Traffic Conditions Of Traffic Flows Replacing Tram With Trolleybus Transportation At A Road In City Of Sofia*. XV International Scientific and Technical Conference Trans & Motauto '08, vol. 2, pp. 56-58, Bulgaria, Sozopol, ISBN ISSN 1313-503 (**Оригинално заглавие:** Маджарски, Е. М., Салиев, Д. Н., Василев Д. *Подобряване на условията на движение на автомобилните потоци чрез замяна*

на трамваите с тролейбуси по маршрут в град София. XV Международна научно-техническа конференция trans&MOTAUTO '08, том 2, стр. стр. 56-58, 2008, България, Созопол, ISBN ISSN 1313-5031)

Madjarski, E. M., Saliev, D. N., Damianov, I., Mladenov, G., Pashkulski, G. (2009). *Investigation Of Speeds Of The Automobile Traffic In Sofia City*. Scientific international conference in aviation, automotive and railway equipment and technologies "BulTrans-2009", pp. 212-214, Bulgaria, Sozopol (**Оригинално заглавие:** Маджарски, Е. М., Салиев, Д. Н., Дамянов, И., Младенов, Г., Пашкулски, Г. *Изследване на скоростите на автомобилното движение в град София*. Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии, "БулТранс-2009", стр. стр. 212-214, България, Созопол.