



---

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ЕКСПЛОАТИРАНИЯ В ГРАД СОФИЯ ЕЛЕКТРОБУС**

**Любомир Секулов, Тодор Лалев, Георги Павлов, Явор Исаев, Мартина Томчева**  
[g\\_pavlov61@abv.bg](mailto:g_pavlov61@abv.bg), [res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg)

**ВТУ „Тодор Каблешков” – София, ул. „Гео Милев” 158, София 1574  
БЪЛГАРИЯ**

***Ключови думи:** електрически транспортни средства, електробус, градски електрически транспорт, енергийна ефективност*

***Резюме:** Развитието на електрическия транспорт през последните години е изключително динамично. В съвременните електрически транспортни средства (ЕТС) се обръща внимание, както на комфорта и надеждността, така и на енергийната ефективност. Тя се определя от различни фактори, които трябва да бъдат използвани комплексно.*

*През 2014г. фирма „Столичен електротранспорт” ЕАД въведе в експлоатация първия в Европа автономен електробус (АЕБ), захранван от суперкондензатори (СК), с променливотоково тягово електрозадвижване. Това наложи изграждането на зарядни станции (засега две на брой) в град София, захранвани от тяговата мрежа.*

*В доклада са представени основните резултати от направено изследване за енергийна ефективност на експлоатирания в град София АЕБ. Измерванията са проведени в крайните зарядни станции (ЗС) с прецизна микропроцесорна измервателна техника. Направен е сравнителен анализ на основните енергийни показатели с аналогични по тип и задвижване неавтономни ЕТС. На базата на това са формулирани конкретни изводи и препоръки.*

### **ВЪВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМА**

Основната инженерна задача в областта на енергетиката и транспорта от десетилетия е предизвикателството да се премахне зависимостта на транспортната система от конвенционалните въглеводородни горива, без да се жертва ефективността ѝ и без да се застрашава мобилността. В съзвучие с водещата инициатива „Европа за ефективно използване на ресурсите”, заложена в стратегията „Европа 2020” и новия план за енергийна ефективност от 2013 г., главната цел на европейската транспортна политика е да помогне за създаването на транспортна система, която подкрепя европейския икономически прогрес, подобрява конкурентоспособността и предлага висококачествени услуги в сферата на мобилността, като същевременно използва ресурсите по-ефективно.

Развитието на електрическия транспорт е едно решение. В съвременните ЕТС се обръща внимание, както на комфорта и надеждността, така и на енергийната ефективност. Тя се определя от различни фактори, които трябва да бъдат използвани комплексно.[1]

В момента в Столичен електротранспорт се експлоатират различни поколения неавтономни ЕТС (тролейбуси и трамвайни мотриси) с променливотоково и постояннотоково електрозадвижване, в зависимост от типа на тяговите двигатели. През 2014г. „Столичен електротранспорт” ЕАД въведе в експлоатация и първия в Европа автономен електробус (АЕБ), захранван от СК, с променливотоково тягово електрозадвижване. Това наложи изграждането на ЗС (засега две на брой) в град София, захранвани от тяговата мрежа.

Този вид транспорт се използва основно за обществени нужди, за да се осигури по-динамичен и бърз превоз на пътниците. При него не се налага изграждането на стационарно захранващо съоръжение, включващо тягова контактна мрежа и подстанции. Това по същество представлява значителна икономия на финансови средства, както и факта, че отпада поддръжката и ремонта при експлоатацията на тези съоръжения.

В доклада са представени основните резултати от направено изследване за енергийна ефективност на експлоатирания в град София АЕБ. Изследванията са направени за целият период на експлоатация (1 година), като измерванията са проведени в крайните ЗС с прецизна микропроцесорна измервателна техника. Направен е сравнителен анализ на основните енергийни показатели с аналогични по тип и задвижване неавтономни ЕТС (единични тролейбуси), експлоатирани по същите маршрути в гр. София. На базата на това изследване и направените анализи са формулирани конкретни изводи и препоръки.

## 1. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА АЕБ И ЗС

### 1.1. Особенности и технически параметри на АЕБ

Електробусът се състои от шаси, автобусно тяло, вътрешни места, тягова електрозахранваща система (токоснемател, СК, инвертори и тягови двигатели). СК е нов тип енергиен източник, позволяващ за кратко време да се акумулира голямо количество енергия. Той захранва не само тяговите консуматори, но и всички спомагателни и оперативни системи в АЕБ.[2,4]

Конкретните параметри на СК са показани в таблица 1. В таблица 2 са дадени параметрите на тяговия асинхронен двигател. АЕБ се задвижва от два тягови двигателя.

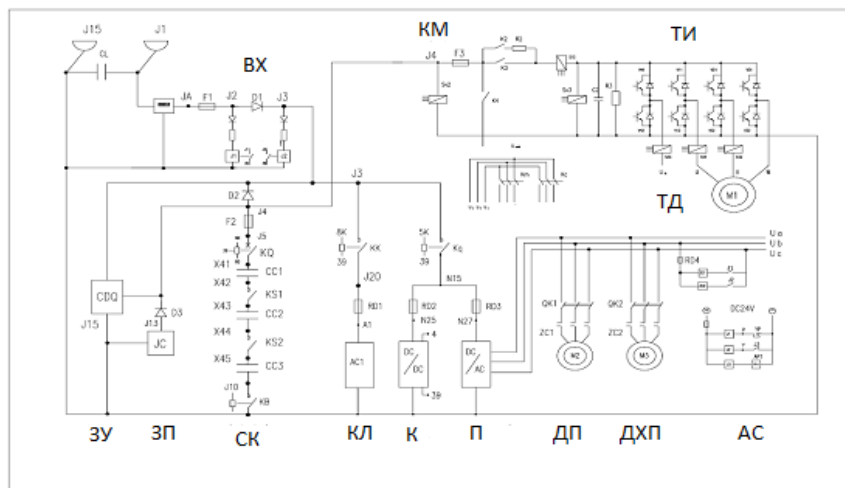
Таблица 1

Наименование на параметъра	Стойност на параметъра
Ном. капацитет, F	780
Ном. работно напрежение, V	400÷585
Макс. напрежение, V	610
Макс. капацитет, KJ	92000
Ефективна енергия в диапазона на изменение на раб. напрежение, KJ	70000 (20KWh)
Ном. заряден ток, A	250
Максимален заряден ток, A	450 (20S)
Ном. разряден ток, A	≤250
Макс. разряден ток, A	450 (20S)
Обем, m <sup>3</sup>	1.3
Маса, kg	≤1000
Размери (L × W × H), mm	1370×1000×930
Работни цикли, times	≥30 000
Диапазон на работната температура, °C	-25 ÷ +70
Температура на съхранение, °C	-10 ÷ +35

Таблица 2

Наименование на параметъра	Стойност на параметъра
Ном. напрежение, DC	650 V
Ном. мощност	67 KW
Ном. момент	160 Nm
Макс. момент	530 Nm @ 300A
Ном. ток	124 A
Максимална скорост	10,000 rpm
Тегло	90 kg
Размери (LxWxH)	425 x 245 x 245 mm
Работна температура	- 30 °C to 70 °C
Степен на защита	IP 65 / 9k

На фиг.1 е показана силовата електрическа схема на вериги 650V на електробуса.



**Фиг. 1. Принципна схема на електрически вериги 650V**

**ВХ-входно устройство, КМ-комутиращ модул, ТИ-тягов инвертор, ТД-тягов двигател, ЗУ-зарядно устройство, ЗП-заряден порт, КЛ-климатик, К-DC конвертор, П-DC/AC преобразувател, ДП-двигател помпа, ДХП-двигател хидравлична помпа**

## 1.2. Особенности и технически параметри на ЗС

Системата за бързо зареждане на електробуса се осъществява чрез специално проектирана за случая ЗС. Тя се състои от входен филтър, DC/DC регулатор, стабилизатор на ток и напрежение, система за измерване и контрол на входно-изходните параметри, както и микропроцесорни защиты по ток и напрежение. При претоварване, късо съединение, повишаване или понижаване на напрежението, както и при повишаване на температурата се задейства съответната защита и се подава алармен сигнал. По време на заряд супер-кондензаторите се зареждат със заряден ток на няколко степени в продължение на 6-10 минути. Времето на заряд се определя от степента на разряд на СК и определеният алгоритъм на заряд зависещ от вградената логика в системата за управление (СУ).[4]

Основните компоненти на ЗС могат да бъдат систематизирани по следният начин:

- зареждащо поле – фиг. 2;
- зарядна кабина – фиг.3;
- кабелна връзка.



**Фиг.2. Процес на заряд на електробуса в зареждащото поле**



**Фиг.3. Външен вид на кабината на зарядната станция**

Изискванията по отношение на изграждането на подобен тип съоръжения са изключително завишени поради факта, че те се запазват с опасни напрежения и се изграждат в градската зона на открито, където съществува възможност при определени условия за директно съприкосновение с хората.[4]

Основни технически параметри на ЗС:

**Работна среда**

- Работна температура: от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $45^{\circ}\text{C}$ ;
- Относителна влажност:  $5\% \div 95\%$ ;
- Надморска височина:  $\leq 2000\text{m}$

**Захранване на зарядната кабина**

- Диапазон на изменение на входното напрежение:  $660\text{V}$ ,  $+10\%$ ,  $-15\%$ ;
- Диапазон на изменение на входния ток –  $0,8\text{A}$  до  $250\text{A}$ ;

**Изходни параметри на зарядната кабина**

- Изходна мощност:  $150\text{kW}$ ;
- Стабилизация на изходния постоянен ток:  $\leq \pm 1\%$ ;
- Стабилизация на изходното напрежение:  $\pm 0,5\%$ ;
- Вълнов (импулсен) фактор:  $\leq 0,2\%$ ;
- Пълна ефективност при натоварване:  $\geq 90\%$ ;
- Регулиране на изходното напрежение:  $\text{DC } 350 \div 600\text{V}$ ;
- Регулиране на тока:  $8 \div 240\text{A}$  (цифрово регулиране степенно).

## **2. ИЗСЛЕДВАНЕ ЗА ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА АЕБ. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ**

Експлоатираният от „Електротранспорт“ ЕАД електробус не е оборудван от производителя с измерватели за електрическата енергия. За целите на експерименталното изследване в определени точки от захранващите системи бяха монтирани специализирани измервателни средства производство на фирма LEM.

### **2.1. Параметри на техническите средства за измерване разхода на електроенергия**

Инсталираният на ЗС електромер тип EM4T е конструиран да измерва енергията, както в променливотокови, така и в постояннотокови електрически вериги. Методът, използван за измерване на електрическата енергия е индиректен, като електромерът е присъединен към ЗС с помощта на първични преобразуватели за ток и напрежение. В конкретния случай са използвани токов сензор тип LTC 500-SF и напреженов – LV 100, като и двата са производство на фирма LEM с клас на точност 0,2.

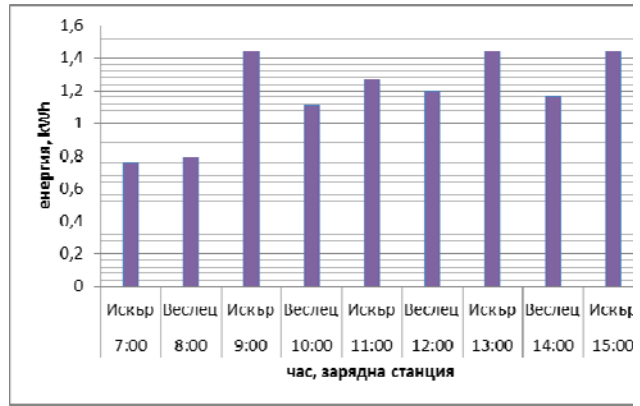
Експерименталните измервания са проведени за целия период на експлоатация на АЕБ, който включва зимен и летен сезон, както и делнични и празнични графици на движение.[3]

### **2.2. Резултати от експерименталните измервания**

В доклада са показани част от получените резултати в табличен и графичен вид. В таблица 3 и на графика 1 е показано количеството енергия при заряд на АЕБ от двете ЗС в рамките на произволно избран зимен делничен ден. За всеки заряд е изчислен специфичния разход на енергия на ЕТС, показана е температурата на околната среда и пробегът. От диаграмата се вижда, че най-голям специфичен разход на енергия ( $1,44 \text{ kWh/km}$ ) АЕБ реализира при движение в посока ЖК «Дружба», отчетен при заряд в ЗС «Искър». Максималният разход на енергия е  $17 \text{ kWh}$  отчетен при заряд в 09.00, 13.00 и 15.00 часа, което се определя от пътничко-потока и разликата в надморската височина на двете ЗС (533 н.м. Веслец и 555 н.м. Искър). Средната стойност на относителния разход за реализираните 9 броя зареждания за изследваното денонощие е  $1,18 \text{ kWh/km}$ .

**Таблица 3**

Данни за зимен делничен ден					
Избрана дата 02/10/2015г.					
Дата/Час	ЗС	E,kWh	kW/km	t, °C	пробег, km
7:00	Искър	9	0,76	-7,4	11,8
8:00	Веслец	8,5	0,79	-6,3	10,8
9:00	Искър	17	1,44	-5,2	11,8
10:00	Веслец	12	1,11	-3,7	10,8
11:00	Искър	15	1,27	-2,95	11,8
12:00	Веслец	13	1,2	-2,2	10,8
13:00	Искър	17	1,44	-2,3	11,8
14:00	Веслец	12,5	1,16	-2,35	10,8
15:00	Искър	17	1,44	-2,4	11,8

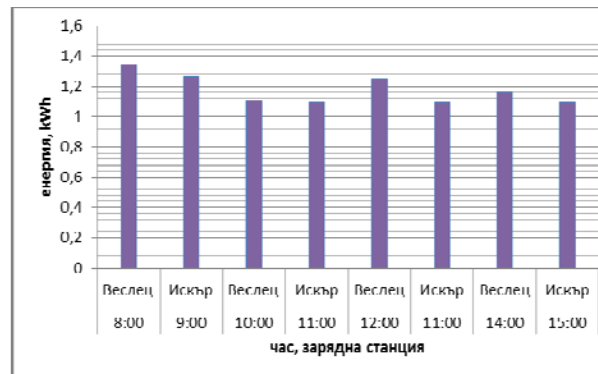


**Графика 1** Консумирана електроенергия при заряд на АЕБ през зимен делничен график на движение

В таблица 4 и на графика 2 по аналогичен начин са показани сметените данни за произволно избран зимен празничен ден. От таблицата и диаграмата се вижда, че максималният относителен разход на енергия е (1,34 kW/km) при първи заряд на ЗС Веслец. Максималният разход на енергия е 14.5 kWh. Средната стойност на относителния разход за реализираните 8 броя зареждания за изследваното денонощие е 1,17 kWh/km.

**Таблица 4**

Данни за зимен празничен ден					
Избрана дата 01/23/2015г.					
Дата/Час	ЗС	E,kWh	kW/km	t, °C	пробег, km
8:00	Веслец	14,5	1,342593	7,7	10,8
9:00	Искър	15	1,27	7,9	11,8
10:00	Веслец	12	1,11	8,1	10,8
11:00	Искър	13	1,1	9,55	11,8
12:00	Веслец	13,5	1,25	11	10,8
11:00	Искър	13	1,1	10,2	11,8
14:00	Веслец	12,5	1,16	11	10,8
15:00	Искър	14	1,10	11,8	11,8

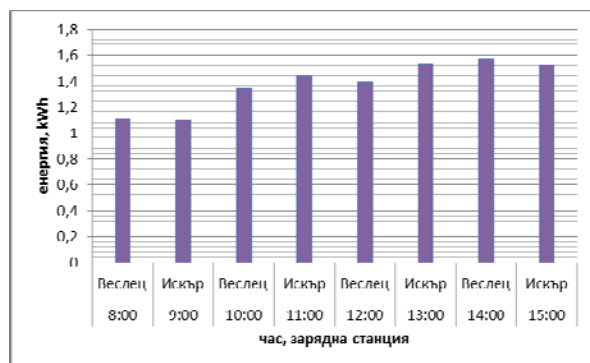


**Графика 2** Консумирана електроенергия при заряд на АЕБ през зимен празничен график на движение

В таблица 5 и на графика 3 са показани сметените данни за произволно избран летен делничен ден. Изчисленият максимален относителен разход на енергия е 1,57 kW/km, при най-високата отчетена околна температура. Максималният разход на енергия е 18 kWh.

**Таблица 5**

Данни за летен делничен ден					
Избрана дата 06/04/2015г.					
Дата/Час	ЗС	E,kWh	kW/km	t, °C	пробег, km
8:00	Веслец	12	1,11	18,6	10,8
9:00	Искър	13	1,1	24,4	11,8
10:00	Веслец	14,5	1,34	24,6	10,8
11:00	Искър	17	1,44	24,8	11,8
12:00	Веслец	15	1,39	25,8	10,8
13:00	Искър	18	1,53	26	11,8
14:00	Веслец	17	1,57	25,9	10,8
15:00	Искър	18	1,53	25,8	11,8



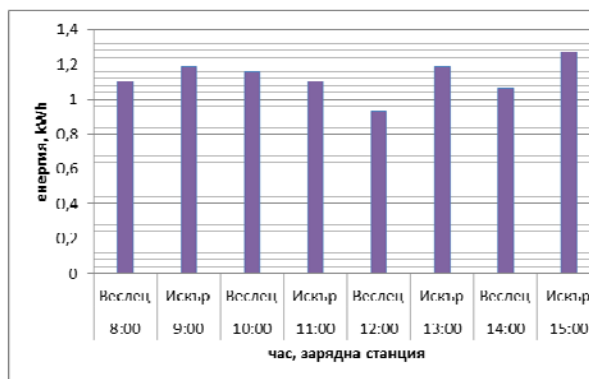
**Графика 3** Консумирана електроенергия при заряд на АЕБ през летен делничен график на движение

Средната стойност на относителния разход за реализираните 8 броя зареждания за изследваното денонощие е 1,37 kWh/km. Увеличеният разход на енергия на АЕБ се дължи на необходимостта от охлаждане на салона за комфорт на пътуващите, съобразно директивите на Европейския съюз.

В таблица 6 и на графика 4 са показани сметените данни за произволно избран летен празничен ден. Получените резултати са аналогични на горните. Изчисленият максимален относителен разход на енергия е 1,27 kWh/km. Максималният разход на енергия е 15 kWh. Средната стойност на относителния разход за изследваното денонощие е 1,12 kWh/km.

Таблица 6

Данни за летен празничен ден					
Избрана дата 06/06/2015г.					
Дата/Час	Станция	E,kWh	kWh/km	t, °C	пробег, km
8:00	Веслец	12	1,1	18,6	10,8
9:00	Искър	14	1,19	19,2	11,8
10:00	Веслец	12,5	1,16	22,3	10,8
11:00	Искър	13	1,1	24,1	11,8
12:00	Веслец	10	0,93	25,8	10,8
13:00	Искър	14	1,19	25,9	11,8
14:00	Веслец	11,5	1,06	25,8	10,8
15:00	Искър	15	1,27	25,8	11,8



Графика 4 Консумирана електроенергия при заряд на АЕБ през летен празничен график на движение

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експерименталното изследване на този съвременен тип возила, дава възможност да се направи реална оценка за тяхната енергийна ефективност и перспектива за увеличаване на техния брой в град София.

Резултатите от сравнителния анализ показват, че електробусът притежава по-добри енергийни показатели в сравнение с едносекционен тролейбус SKODA 26 TR SOLARIS. Средният специфичен разход на АЕБ изчислен за една година е 1,21 kWh/km, като тук е отчетена и изразходената енергия от климатика. Загубите в ЗС по спецификация са 10% и те също се сумират в направените измервания. Средният специфичен разход на SKODA 26 TR SOLARIS при същите условия на измерване е от порядъка на 1,7 kWh/km.

Предвид гореизложеното и факта, че за внедряването на транспортна система с АЕБ не са необходими класическата контактна мрежа и скъпоструващите ТИС-ове, което води до значителни икономии на средства за изграждането им, експлоатацията и поддръжката, перспективите за масово внедряване в градската среда на АЕБ са значителни.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Българанов А. Електрически транспорт. София, 2009 г.
- [2] Българанов Л., Павлов Г., И. Миленов, Ч. Джамбазки. Електрозадвигване, София, 2009 г.
- [3] Георги Димитров, Тодор Лалев. Експериментално изследване на разхода на електроенергия от метроваковете на Столичния метрополитен в реални експлоатационни условия, Научно списание "Механика, транспорт, комуникации", бр. 3/2009 г., ВТУ "Тодор Каблешков", София, 2009 г
- [4] Техническа документация на електробус Chariot motors.

# EXPERIMENTAL STUDY ON THE ENERGY PERFORMANCE OF THE ELECTRICAL BUS WHICH IS OPERATED IN SOFIA

Lubomir Sekoulov, Todor Lalev, Georgi Pavlov, Yavor Isaev, Martina Tomcheva  
[g\\_pavlov61@abv.bg](mailto:g_pavlov61@abv.bg), [res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg)

*Todor Kableshkov University of Transport – Sofia, 158 Geo Milev Str., Sofia 1574,  
BULGARIA*

**Key words:** *electric vehicles, elektrobus, urban electric transport, energy efficiency*

**Abstrac:** *Electrical transport is developed very dynamic for last several years. The comfort and reliability are important as much as energy efficiency in the modern transport vehicles. Energy efficiency is determined by various factors which have to be used complex.*

*The first electric bus in the Europe was put into service by "Electrical transport Sofia" JSC. Electrical ac motors which are installed on the electrical bus are power supplied by supercapacitors. This requires the construction of charging stations (currently two) in Sofia, which are powered supply by traction network.*

*The main results of the study of energy efficiency of the electric bus operated in Sofia are present in the current paper. Measurements were conducted in the final charging stations with precise measuring equipment. A comparative analysis of main energy indicators with similar types electric vehicles. On this basis, formulated concrete conclusions and recommendations.*