

---

## **АНАЛИЗ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА РЕКУПЕРАТИВНИТЕ СПИРАЧНИ СИСТЕМИ НА ТРОЛЕЙБУСИ ŠKODA SOLARIS В РЕАЛНИ ЕКСПЛОАТАЦИОННИ УСЛОВИЯ**

**Георги Димитров, Георги Павлов**  
[dimitrov\\_gd@mail.bg](mailto:dimitrov_gd@mail.bg), [pavlov61@abv.bg](mailto:pavlov61@abv.bg)

**Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”, 1574 София, ул. Гео Милев № 158  
БЪЛГАРИЯ**

***Ключови думи:** Градски електрически транспорт, тролейбуси, ефективност на рекуперативните спирачни системи.*

***Резюме:** В доклада са представени резултати от проведено изследване върху ефективното използване на рекуперативните спирачни системи при тролейбусите ŠKODA SOLARIS, експлоатирани в гр. София. Анализът е проведен на база реални измервания за тяговата и рекуперативната спирачна енергии при тролейбуси Skoda 26Tr Solaris, както и чрез използване на числени методи. Получените изследователски данни са представени в таблична и графична форма и са формулирани съответни изводи.*

### **ВЪВЕДЕНИЕ**

Общественият градски транспорт и в частност електрическият такъв, играе съществена роля за градската мобилност на населението в големите градове. Човек трудно може да си представи днес един град с многохилядно население без развита мрежа от маршрутни линии на градския пътнически транспорт. В тази връзка особено ефективен и екологичен се явява тролейбусният транспорт.

В доклада са представени резултати от проведено изследване върху ефективното използване на рекуперативните спирачни системи при трамваите и тролейбусите, експлоатирани в гр. София. Анализът е проведен на база реални измервания за тяговата и рекуперативната спирачна енергии при тролейбуси Škoda 26Tr Solaris, както и чрез използване на аналитични методи за определяне на енергийните показатели на тролейбуси Škoda 27Tr Solaris. Получените изследователски данни са аналитично обработени и са формулирани съответни изводи.

### **АНАЛИЗ НА ПОБЛЕМА**

През периода 2010÷2014 г. в Столичния градски електрически транспорт са въведени в експлоатация 80 броя нови тролейбуси Škoda Solaris, модели 26Tr и 27Tr.

Тези тролейбуси са с асинхронно тягово електрозадвижване осигуряващо и режим на реостатно-рекуперативно електродинамично спиране.

Реализирането на режим на рекуперативно спиране при тролейбусите зависи от редица фактори, всеки от които оказва различно по тежест влияние:

Състояние на пътна инфраструктура – Влошеното състояние на градската пътна инфраструктура води до по-ниски на максимални скорости на движение на тролейбусите и по-продължителна работа в режим на тяга. Крайният ефект е повишаване на общия относителен разход на енергия  $e_c$ , както и недостатъчен запас от кинетична енергия за реализиране на ефективен рекуперативен спиращ процес.

Трафик, организация и регулиране на движението – В големите градове и особено в столицата основен проблем на градската мобилност е автомобилния трафик. Движението на тролейбусите в интензивен трафик е съпроводено с чести спирания и потегляния, които от своя страна водят както до повишаване на общото потребление на електрическа енергия  $E_c$ , kWh на транспортните средства, така и на общия относителен разход  $e_c$ , kWh/km. От друга страна наличието на множество светофарни уредби за регулиране на движението също води до накъсване непрекъснатия ход на возилата.

График за движение (разписания) – Много от тролейбусните маршрути в централната част на гр. София имат общи участъци. При действащия в момента график на движение, често на дадена спирка едновременно пристигат по два тролейбуса, което налага втория да извърши допълнително потегляне за установяване на спирката.

Квалификация на водачите – Техниката на управление на тролейбусите от страна на водачите оказва съществено влияние върху енергийното потребление, като отклоненията в електропотреблението за тягови нужди могат да достигнат до 20÷25% от оптималните за даден маршрут стойности.

Независимо, че поотделно повечето от посочените фактори имат прогнозен характер, като цяло съвместното им действие има вероятностен характер.

Таблица 1

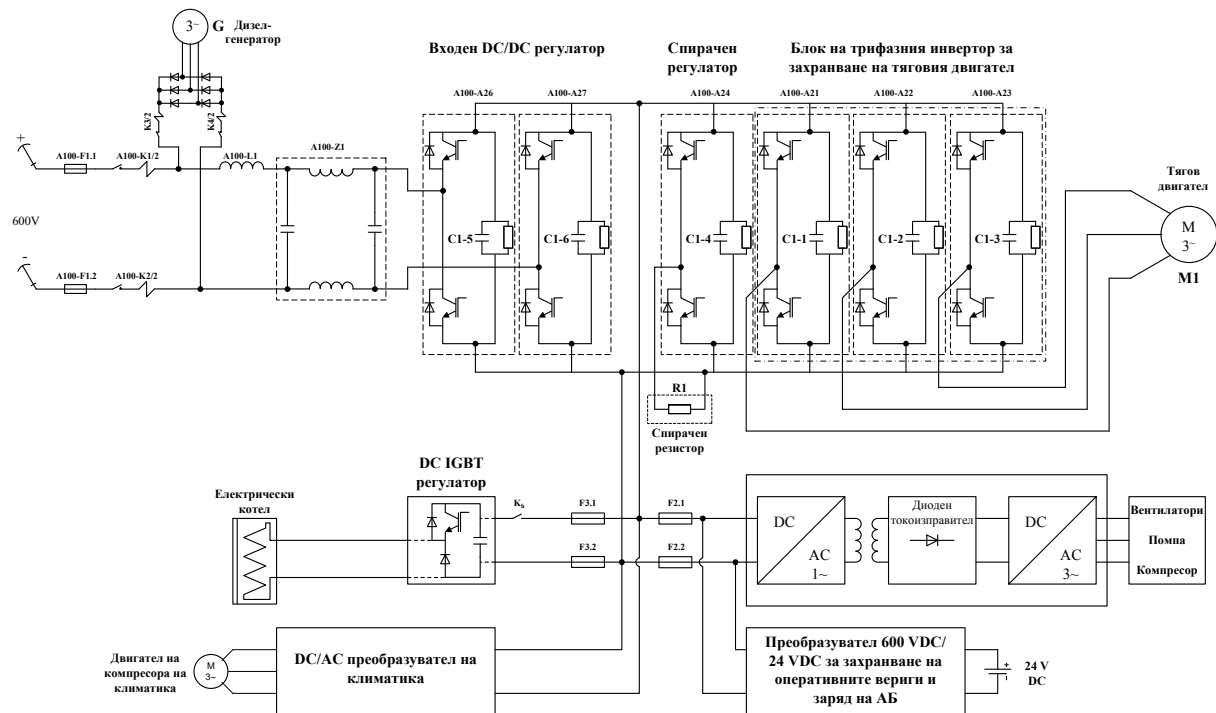
**Основни технически данни за експлоатираните в гр. София тролейбуси Škoda Solaris**

Производител	Škoda Electric A.S./ Solaris Bus & Coach	
Име на модела	Škoda 26Tr Solaris	Škoda 27Tr Solaris
Тип ЕТС	Тролейбус	Тролейбус
Шаси	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 18
Купе	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 18
Двигател	Škoda 4 ML 3444 K/4	Škoda 4 ML 3846 K/6
Тип на двигателя	Асинхронен, 4 полюсен	Асинхронен, 6 полюсен
Мощност на двигателя	160 kW	240 kW
Брой двигатели	1	1
Мощност на тяговия инвертор	205 kVA	260 kVA
Брой оси	2	3
Брой двигателни оси	1	1
Максимална скорост	70 km/h	65 km/h
Вид и мощност на отоплението	Водно, $P_{max} = 40$ kW	Водно, $P_{max} = 60$ kW
Ел. мощност на климатика	$P_{max} = \sim 12$ kW	$P_{max} = \sim 2 \times 12$ kW
Маса на возилото	10900 kg	16500 kg
Обща маса	18000 kg	28500 kg
Общ капацитет пътници	86	160
- седящи места	30	40
- правостоящи	55	120
- място за инвал. стол	1	1
Година на производство	2010	2013-2014

Изискванията за целогодишен топлинен комфорт на пътниците е свързано с допълнителен разход на електрическа енергия, който оказва влияние както върху общия енергиен разход, така и върху върнатата в тяговата мрежа енергия при рекуперативно спиране.

За анализирани параметрите на енергийно потребление на тролейбусите са необходими данни за енергиите (тягова, рекуперативна и енергия за отопление), познаване на техните основни технически данни, както и силовите им схеми.

В таблица 1 са посочени основните технически данни, а на фиг. 1 е показана опростена електрическа схема на главните (силовите) вериги на тролейбуси Škoda Solaris [2], обект на настоящото изследване.



Фиг. 1. Опростена схема на главните (силовите) вериги на тролейбус Škoda Solaris

За изчисляване на основните показатели за оценка енергийната ефективност на превозите са използвани следните формули:

– За изчисляване на общите относителни енергии,

$$(1) \quad e_c = \frac{E_c}{s}, \quad e_r = \frac{E_r}{s}, \quad e_h = \frac{E_h}{s},$$

където:

$e_c$ ,  $e_r$ ,  $e_h$  са съответно относителните стойности на общата консумирана от тяговата мрежа енергия, върнатата в тяговата мрежа енергия и енергията за отопление, kWh/km;  
 $E_c$ ,  $E_r$ ,  $E_h$  – обща консумирана от тяговата мрежа енергия, върната в тяговата мрежа енергия и енергия за отопление, kWh;  
 $s$  – пробег на изследваните тролейбуси, km.

– За изчисляване на относителната енергия за тягови нужди,

$$(2) \quad e_{trac} = \frac{E_c - E_h}{s},$$

където:

$e_{trac}$  е относителната енергия за тягови нужди, kWh/km.

– За изчисляване на brutната относителна рекуперативна енергия,

$$(3) \quad e_{r br} = e_r + \Delta e_h,$$

където:

$\Delta e_h$  е частта от генерираната в рекуперативен спиращ режим енергия, използвана за захранване на отоплителната система на тролейбуса, изразена като относителна, kWh/km.

– За изчисляване на нетните относителни енергии – обща и тягова,

$$(4) \quad e_n = \frac{E_c - E_r}{s}, \quad e_{n trac} = e_{trac} - e_{r br},$$

където:

$e_n$  е нетната относителна енергия консумирана от тяговата мрежа, kWh/km;

$e_{n trac}$  – нетна относителна енергия за тягови нужди, kWh/km.

## РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследването е проведено през периода 2010-2014 г. В изследването са обхванати 29 от общо 30 броя тролейбуси Škoda 26Tr Solaris, като са измерени общата консумирана от тяговата мрежа електрическа енергия  $E_c$ , върнатата в тяговата мрежа енергия  $E_r$  и енергията за отопление на возилата  $E_h$ , като част от общо консумираната енергия.

Резултатите от проведените измервания за разхода на енергия, общо за всички изследвани тролейбуси, както и изчислените средни стойности на относителните енергии са показани в таблица 2.

Таблица 2

Обобщени данни за пробег и енергийните показатели на изследваните в гр. София тролейбуси Škoda 26Tr Solaris

Измерени и изчислени величини	Стойност
Общ пробег, km	5444458
Общо консумирана от тяговата мрежа енергия $E_c$ , kWh	9986093
Общо върната в тяговата мрежа енергия $E_r$ , kWh	1133012
Обща енергия за отопление $E_h$ , kWh	2190466
Средна стойност на относителната общо консумирана енергия от тяговата мрежа $e_{c cp.}$ , kWh/km	1,834
Средна стойност на относителната върната в тяговата мрежа енергия $e_r$ , kWh/km	0,208
Средна стойност на относителната енергия за отопление $e_{h cp.}$ , kWh/km	0,402
Средна стойност на относителната нетната енергия за движение $e_{n cp.}$ , kWh/km	1,626
Среден относителен дял на върнатата в тяговата мрежа енергия, %	11,35

За определяне ефективността на спиращия рекуперативен режим на тяговите електрозадвижвания на изследваните тролейбуси, измерените стойности за консумираната и върнатата в тяговата мрежа енергии са коригирани с използване на формули (2) и (3). Общият разход на електроенергия  $E_c$  е намален със стойността на

енергията за отопление  $E_h$ . Върнатата в тяговата мрежа енергия  $E_r$  е увеличена с част от енергията за отопление  $\Delta E_h$ , съответстваща на средното времетраене на рекуперативния спирачен процес. На база така коригираните енергии са изчислени съответно средната относителна енергия за тягови нужди  $e_{trac\ cp.}$  и средната брутна рекуперативна енергия  $e_{r\ br\ cp.}$ .

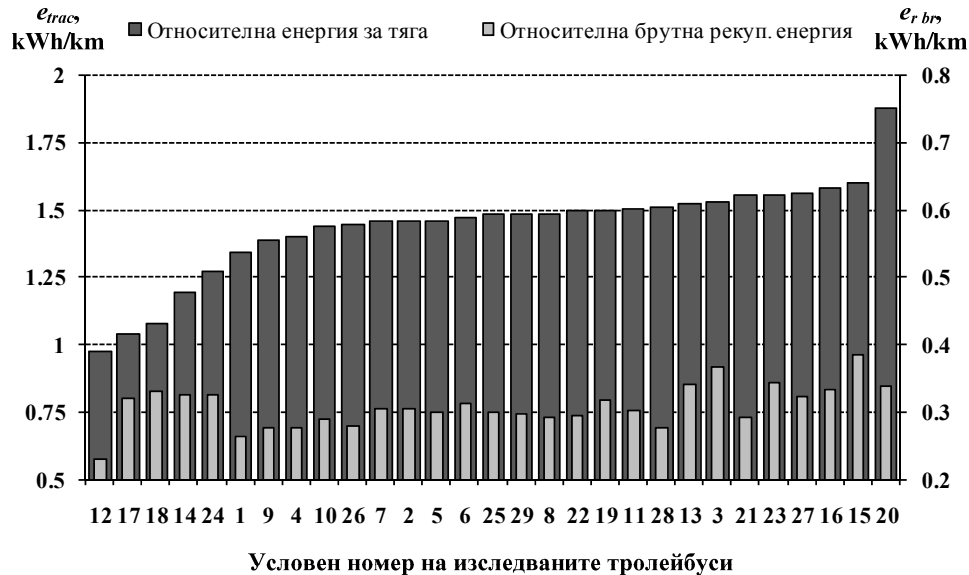
Резултатите от изчисленията са показани в таблица 3.

Таблица 3

Обобщени данни за аналитично определените енергийни показатели на тяговото електропотребление на тролейбуси Škoda 26Tr Solaris

Измерени и изчислени величини	Стойност
Общ пробег, km	5444458
Общо консумирана енергия от тяговата мрежа за тягови нужди $E_{trac}$ , kWh	7795627
Средна стойност на относителната тягова енергия $e_{trac\ cp.}$ , kWh/km	1,432
Средна стойност на относителната брутна рекуперативна енергия $e_{r\ br\ cp.}$ , kWh/km	0,308
Средна стойност на относителната нетна енергия за движение $e_{n\ trac\ cp.}$ , kWh/km	1,124
Среден относителен дял на брутната рекуперативна енергия, %	21,75

На фигура 2 са показани диаграми на относителната енергия за тягови нужди и относителната брутна рекуперативна енергия, отделно за всеки изследван тролейбус Škoda 26Tr Solaris.



Фиг. 2. Диаграма на относителните тягова и рекуперативна енергии на изследваните тролейбуси

На фигура 3 са показани диаграмите на отклоненията на относителните енергии, спрямо средните им стойности, за всичките 29 изследвани тролейбуса Škoda 26Tr Solaris.

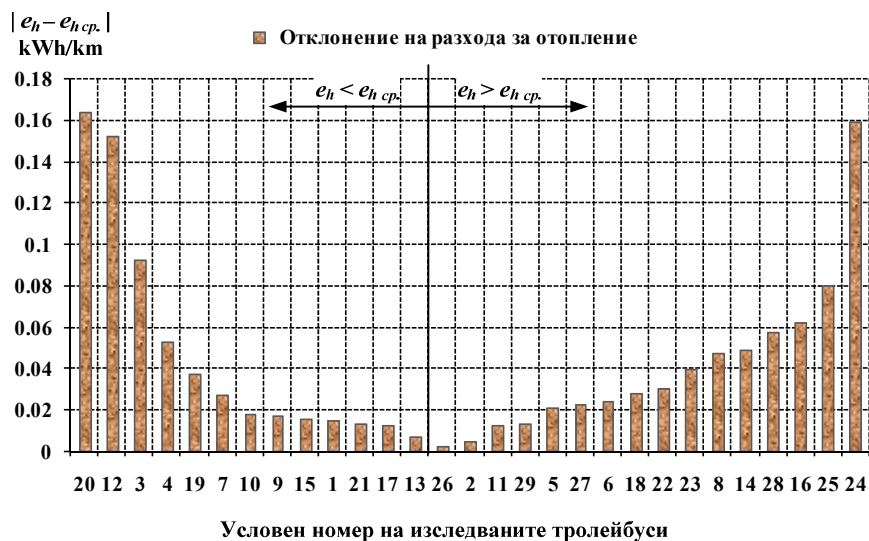
Енергийните показатели за тролейбуси Škoda 27Tr Solaris са определени с използване на аналитични методи, описани в литературните източници [1].



а) диаграма на отклонението на относителния тягов разход



б) диаграма на отклонението на относителната брутната рекуперативна енергия



в) диаграма на отклонението на относителния разход за отопление

Фиг. 3. Диаграми на отклонението на относителните енергии за изследваните тролейбуси

При аналитичните разчети са използвани експериментално установените стойности при тролейбусите Škoda 26Tr Solaris, като са взети под внимание техническите параметри на тролейбусите, еднотипност на алгоритъма за управление на тяговото електрозадвижване, специфични особености на обслужваните от тях маршрутни линии, средният брой пътници в един тролейбус. Получените средни изчислителни стойности от аналитичните разчети са следните:

- Общ относителен разход на енергия –  $2,65 \div 2,80$  kWh/km;
- Относителна върната в тяговата мрежа енергия –  $0,28 \div 0,31$  kWh/km;
- Относителен разход за тягови нужди –  $2,05 \div 2,15$  kWh/km;
- Относителен разход за тягови нужди –  $2,05 \div 2,15$  kWh/km;
- Относителна брутна рекуперативна енергия –  $0,40 \div 0,46$  kWh/km.

## **ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ПРОВЕДЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ**

Събраните по експериментален път енергийни данни за изследваните тролейбуси и получените резултати след тяхната аналитична обработка позволяват да се направят следните изводи:

- Средният относителен общ разход на енергия при тролейбусите Škoda 26Tr Solaris е  $1,834$  kWh/km, който е близък по стойност до този установен при изследвания проведени в други европейки градове върху тролейбуси с идентични параметри [4, 5]. Сравнително високата му стойност е следствие многократни пускови процеси при движение в трафик и множеството светофарни уредби, както и на целогодишната работа на климатичните инсталации.

- Средният относителен дял на върната в тяговата мрежа енергия при тролейбусите Škoda 26Tr Solaris е  $11,35\%$ , който е по-малък от очаквания. Като основна причина може да се посочи множеството спирачни процеси с ниски начални скорости (около и под  $8$  m/s), следствие движение в интензивен автомобилен трафик.

- Средната относителна нетна енергия за тягови нужди на тролейбусите Škoda 26Tr Solaris е  $1,124$  kWh/km, която е с около  $15\%$  по-висока от очакваната оптимална стойност от  $1,0$  kWh/km.

- Средният относителен дял на генерираната при рекуперативно спиране енергия на тролейбусите Škoda 26Tr Solaris е  $21,75\%$ , който е близък по стойност до този установен при изследвания проведени в гр. Люблин, Полша върху същия модел тролейбуси – около  $20\%$  [4].

- Аналитично изчисленият общ относителен разход на енергия при тролейбусите Škoda 27Tr Solaris е  $2,65 \div 2,80$  kWh/km е в границите на установени при други изследвания стойности за съчленени тролейбуси с дължина  $18$  m [5].

- Аналитично изчисленият относителен дял на върната в тяговата мрежа енергия при тролейбусите Škoda 27Tr Solaris е около  $10,5 \div 11\%$  и е близък до този при Škoda 26Tr Solaris.

- Аналитично изчисленият относителен дял на върната в тяговата мрежа енергия при тролейбусите Škoda 27Tr Solaris е около  $20 \div 21\%$  и е близък до този при Škoda 26Tr Solaris.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

За подобряване характеристиките на тягово електропотребление на тролейбусите, в частност ефективността на работа на рекуперативните им спирачни системи, е необходимо да се въздейства върху всички влияещи фактори. Посочени са само част от възможните решения, които могат да бъдат приложени по маршрутите на тролейбусния транспорт.

▪ **Мероприятия, свързани с трафика, организацията и регулирането на движението:**

- Премахване на зоните за паркиране по пътни артерии с две ленти за движение в една посока;
- Премахване на светофарните уредби от всички кръстовища, където се пресичат първостепенни с второстепенни улици, по които входящия към кръстовището автомобилен поток е под 100 автомобила за час;
- Монтираните в гр. София «Умни светофарни уредби» да се управляват от качествено нов софтуер, както и да бъдат оборудвани с необходимия хардуер за комуникация с GPRS модемите, монтирани в градските транспортни средства и в частност в тролейбусите, осигуряващ преимуществена „зелена вълна” за тях;
- Премахване на изградените по тролейбусните маршрути «повдигнати пешеходни пътеки», разположени на повече от 30 m преди и след спирките, като за ограничаване скоростта на движение се изградят специални «вибро-зони», разположени преди тях.

▪ **Мероприятия, свързани с квалификацията на тролейбусните водачи:**

- Провеждане на обучителни курсове с водачите за енергийно ефективно управление на тролейбусите, с отчитане спецификите на всеки маршрут.

**ЛИТЕРАТУРА:**

- [1] Българанов Л., Електрически транспорт, София, 2009
- [2] Технически данни за тролейбуси Škoda 26Tr Solaris и Škoda 27Tr Solaris, Škoda Electric a.s., 2010-2013
- [3] Ханс-Йохен Барч, Математически формули, Наука и изкуство, София, 1990
- [4] Eva Simonek, Analysis of trolleybus energy consumption, Advances in Science and Technology Research Journal, Volume 7, Issue 18, June 2013, pp. 81–84
- [5] Francesco De Gennaro, ATM Milan Trolleybuses - Main Features and Experiences, Azienda trasporti Milanesi S.p.A., 2010

**ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEMS OF TROLLEYBUSES ŠKODA SOLARIS UNDER REAL OPERATIONAL CONDITIONS**

**Georgi Dimitrov, Georgi Pavlov**  
[dimitrov\\_gd@mail.bg](mailto:dimitrov_gd@mail.bg), [pavlov61@abv.bg](mailto:pavlov61@abv.bg)

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

***Key words:*** Urban electric transport, Trolleybuses, Efficiency of regenerative braking.

***Abstract:*** The report presented results of a research on the effective use of regenerative braking systems in trolleybuses ŠKODA SOLARIS, operated in Sofia. The analysis has been conducted based on real measurements for traction and regenerative braking energy at trolleybuses Škoda 26Tr Solaris, and through the use of numerical methods. Research data are presented in tabular and graphical form and are formulated relevant conclusions.