

---

**ЕКСПИРЕМАНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕКУПЕРАТИВНИТЕ  
РЕЖИМИ НА ТРАМВАЙНИ МОТРИСИ PESA 120NaSf В УЧАСТЪК  
ЗАХРАНВАН ОТ ФИДЕРИ “ЕМИЛ МАРКОВ” И “ШИРОКА ЛЪКА”  
КЪМ ТИС “МОТОПИСТА” В ГРАД СОФИЯ**

*Георги Павлов, Любомир Секулов, Румен Стоицев,  
Лазар Михайлов, Петър Бодуров*  
[g\\_pavlov61@abv.bg](mailto:g_pavlov61@abv.bg), [res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg)

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”  
гр. София, ул. „Гео Милев” 158  
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

**Ключови думи:** наземен електрически транспорт, електрически транспортни средства, трамвайни мотриси, трамваи, рекуперативно спиране, фидери, токоизправителни станции.

**Резюме:** Обектът на изследване в доклада е участък от обособено трамвайно трасе по бул. България, София, захранван от токоизправителна станция (ТИС) “Мотописта” през фидери “Емил Марков” и “Широка лъка”. Електрическите транспортни средства (ЕТС), които се експлоатират в участъка са трамвайни мотриси (ТМ) модели PESA 120 NaSf с възможност за рекуперативно спиране. ТМ обслужват линии ТМ№7 и ТМ№27 от мрежата на обществения транспорт на град София и се експлоатират от “Столичен електротранспорт” ЕАД. Експерименталното изследване е направено при нормални експлоатационни условия за периода от 21 юли до 25 юли 2022 г. на територията на ТИС “Мотописта”. Измервани са токовете (прави и обратни) през фидери “Емил Марков” и “Широка лъка”, както е и измерено напрежението на общата захранваща шина. Измерванията са проведени в реално време и са направени записи на стойностите с период на семплиране 100 ms. Основната цел е да се определи разходът на електрическа енергия за участъка в зависимост от режима и графика на движение на ЕТС, както и усвоената рекуперативна енергия при различните режими на работа.

От проведените експериментални изследвания е получен голям обем от данни. Част от тях са показани в графичен и табличен вид в доклада. Направен е подробен анализ на получените резултати и са установени екстремумите на стойностите на напрежението и токовете в зависимост от броя на движещите се ТМ в участъка. Определен е разходът на енергия и усвоената електрическа енергия от рекуперативното спиране в участъка.

## ВЪВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМА

Рекуперативното спиране е един от най-важните източници за икономия на електрическа енергия в електротранспорта. В тази връзка увеличаването на ефективността на този вид електрическо спиране е една от основните посоки за намаляване на специфичното потребление на електрическа енергия за конкретен участък и намаляване на енергопотреблението като цяло.

Ефективността на рекуперативното спиране и използването на върнатата енергия от рекуперация зависи от много на брой фактори. Така например, в участъците с натоварен график на движение, времеви интервал за неусвояване на рекуперативната енергия е незначителен и по-голямата част от енергията се изразходва за собствени нужди на ЕТС. Следователно, с по-интензивен график за движение, само малка част от възстановената електрическа енергия се използва неефективно. От друга страна делът на усвоената рекуперативна енергия се намалява с намаляването на интензивността на графика на движението на ЕТС.

Количеството усвоена рекуперативна електрическата енергия зависи от фактори като профила на пътя, теглото на ЕТС, броя на ЕТС, които се движат в участъка, броя на спирките, светофарните уредби и тяхната синхронизация с движението на ЕТС, разклоняването на захранващата КМ. Важен фактор, влияещ върху ефективността на рекуперативното спиране и използването на енергията му е наличието системи за съхранение на неусвоената енергия от рекуперацията.

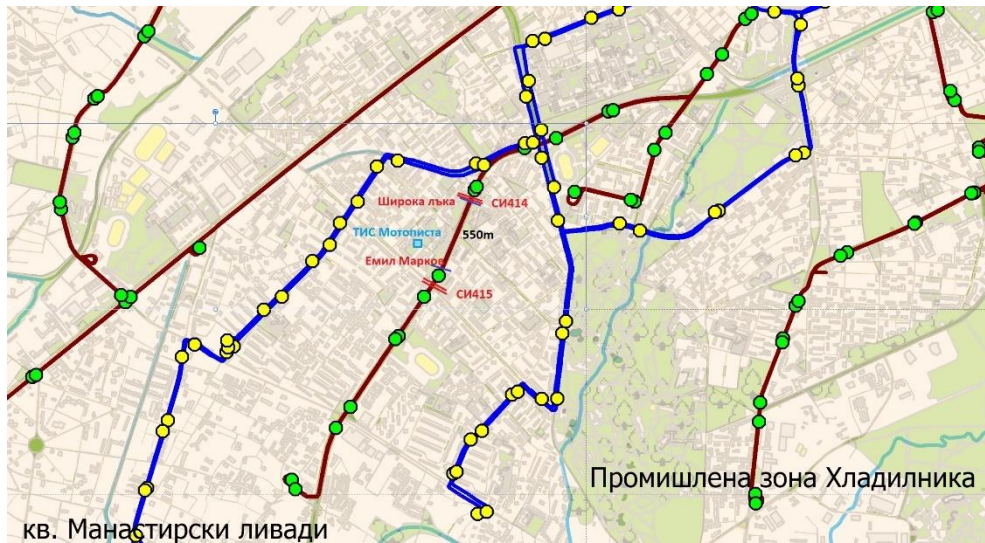
Експерименталните измервания на токовете и напреженията са определящи за коректните анализи на енергийната ефективност на движение на ЕТС за конкретен участък.

## ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ УЧАСТЪК

Изследваният участък е част от обособено трамвайно трасе намиращо се на бул. България в град София отделено със секционни изолатори (СИ) №414 и №415 от съседните участъци. Дължината на участъка е 550 m и е захранен двустранно от фидери “Емил Марков” и “Широка лъка”, като “Широка лъка” е непосредствено до СИ№414, а “Емил Марков” е на 80 m от СИ№415. Контактната мрежа (КМ) е изградена с меден проводник АС-100 по БДС EN 50149:2004. Фиксиращите обтежки на гъвкавите напречници в правата бронзово въже 35 mm<sup>2</sup> /7x2,5/ по DIN 48201. Носещата мрежа в кривите с бронзово въже 35 mm<sup>2</sup> /7x2,5/ по DIN 48201. Релсовият път е изпълнен с релси тип S49 , релсова стомана с линейна маса 49.4 kg/m и сечение 6300 mm<sup>2</sup>. Захранването на КМ е с фидери от алуминиев проводник 500 mm<sup>2</sup>, като дължините са съответно 715 m за ±“Емил Марков” и 1670 m ± “Широка лъка”. Захранването на фидерите се осъществява през обща шина от неуправляеми изправители и три тягови трансформатора. Максималнотоковите защиты (МТЗ) на двата фидера са настроени за ток на изключване 1400 А. [1,2,3]

В изследвания участък няма криви на релсовия път и трасето на движение е обособено, двупътно с междурелсие 1009 mm. Към датата на изследването там има един светофар и една спирка на обществения транспорт. Средният наклон на пътя е 16 %. Измерените средни скорости на движение на ЕТС участъка са съответно 19.94 km/h и 20.48 km/h посока Манастирски ливади и посока София - Център. Времето за преминаване на ЕТС през участъка в двете посоки е в границите между 2:45 min и 4:12 min.

На Фиг. 1 е показано местоположението на изследвания участък в град София.



Фигура 1 Местоположение на изследвания участък

## РЕЗУЛТАТИ ОТ НАПРАВЕНОТО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

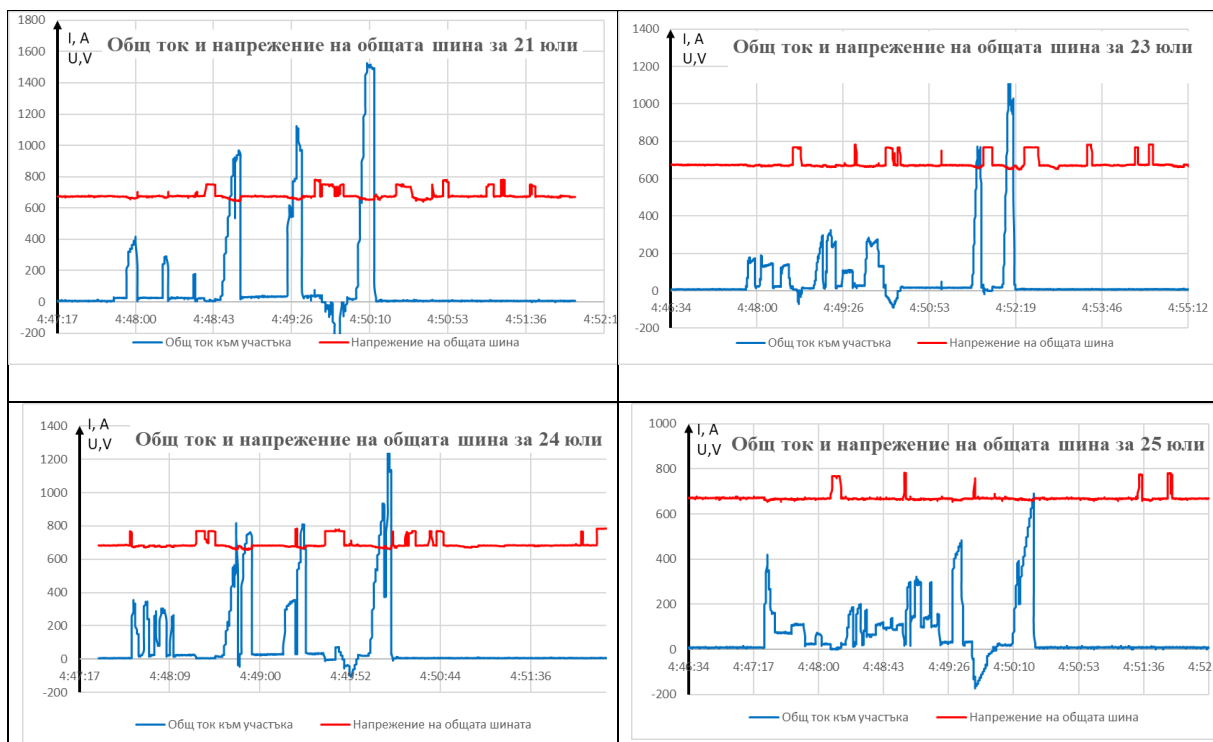
Изследването е проведено през периода от 21 до 25 юли 2022 г. включително. Всички изследвания са проведени при сухо време при следните дневни температури за София показани в Таблица 1.

Таблица 1 Дневни температури за София

Дневни температури за София					
	21.юли	22.юли	23.юли	24.юли	25.юли
	°C	°C	°C	°C	°C
Максимални	33,327	33,597	35,657	35,757	31,327
Минимални	17,397	18,737	17,647	18,037	19,197
Средни	25,856	27,129	27,701	27,798	26,251

Направени са две изследвания, които обхващат три делнични и два празнични дни. Първото изследването е с цел да се определи разходът на енергия за първия курс в участъка, когато върнатият ток към общата шина е минимален и характерът на движение е разнообразен, а не по график. По време на измерването в участъка има само едно возило, което е важен показател за точността на анализа през същото време ТИС “Мотописта” захранва единствено това возило.

На Фиг. 2 са показани графично общия ток на двата фидера към участъка и напрежението на общата шина за първата преминала мотриса през участъка за периода на изследването. Стойностите на измерваните величини се отнасят за движението на една ТМ посока Ман. ливади. Консумираната енергия е показана в първа колона на Таблица 2, а върната рекуперативна енергия от ТМ включително загубите за пренос са показани във втора колона от Таблица 2. Времената за тяга, за реостатно спиране и за общото спиране са показани в Таблица 2. [4]



**Фигура 2** Общ ток и напрежение на общата захранваща  
шина за първата преминала трамвайна мотриса през участъка

**Таблица 2.** Резултати от измерванията за първия курс на ТМ

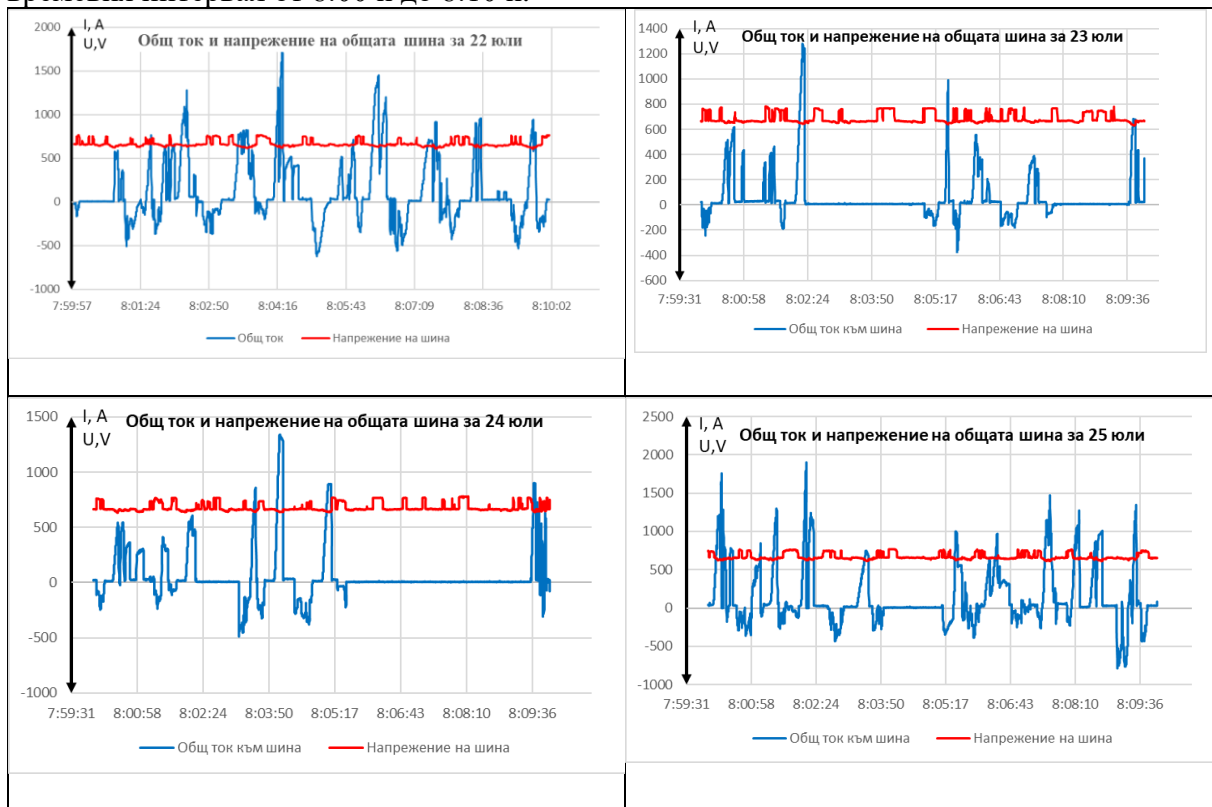
	Общо консумирана енергия	Усвоена рекуператив на енергия	Усвоена рек. ен-я към обща ен-я	Врем е за тяга	Време за реостатн о спиране	Време за усвоена рекуперац ия	Общо време за спиране
	kWh	kWh	%	s	s	s	s
21.юли	5,364196	0,220643	4,1132604	116,1	40,3	9,5	49,8
22.юли	3,929129	0,023197	0,5903742	141,2	21,4	1,5	22,9
<b>23.юли</b>	5,104461	0,14261	2,793837	142,1	45,7	13,5	59,2
<b>24.юли</b>	3,238168	0,081983	2,531775	101,8	24,6	7,4	32
25.юли	2,818421	0,208117	7,3841707	129,4	8,5	11,1	19,6

Второто изследване е в период когато има по-голяма интензивност на движението определен от тримесечния график В Таблица 3 са показани резултатите от измерванията за времевия диапазон от 8:00 h до 8:10 h през изследваните дни, както и броят на возилата намиращи се в участъка.

**Таблица 3.** Резултати от измерванията за времевия интервал от 8:00 h до 8:10 h

	Общо консумирана енергия	Усвоена рекуператив на енергия	Усвоена рекуперати вна енергия към обща ен-я	Врем е за тяга	Време за усвоена рекупер ация	Време за неусвоена рекупера ция	Брой возила в участък а
	kWh	kWh	%	s	s	s	Бр.
21.юли	17,01334	6,262668	36,8103282	244	163,7	144,3	4
22.юли	19,68837	7,00727	35,5909085	331,8	170,4	98,8	5
<b>23.юли</b>	7,026251	1,603421	22,820431	192,3	76	151,2	2
<b>24.юли</b>	8,592271	3,193327	37,1651115	157,4	92,8	125,7	3
25.юли	19,85954	6,230092	31,3707803	309,8	158,6	124,6	4

На Фиг.3 са резултатите в графичен вид за два празнични и два делнични дни за времевия интервал от 8:00 h до 8:10 h.



Фигура 3 Общ ток и напрежение на общата захранваща шина

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати при измерванията на енергийната ефективност на първия курс по трасето показват силното влияние на субективния фактор, определен от начина на управление на ТМ от ватманите при разхода на енергия. Ефективността е най-висока, когато общото време за спиране и времето за реостатно спиране е най-малко. Получените резултати при изследването на времевия интервал от 8:00 h до 8:10 h показват, че диапазона на ефективността от използваната рекуперативна енергия е голям и че ефективността е най-висока, когато в участъка има най-много возила. Представените експериментални изследвания в доклада не могат да определят точно разхода на енергия в зависимост от рекуперативното спиране, но показват широките граници за усвояване на енергията и че околната температура е фактор, който в случая не влияе така съществено, както начина на управление на возилата и графика на движение. По-точни резултати биха се получили, ако се разгледат времената за спиране, времената за тяга и времената за рекуперация за по-голям времеви интервал, а именно целодневен, където броят на курсовете е фиксиран от тримесечния график на движение. При по-продължителни измервания би могло да се установят достатъчно точно средните напрежения на захранващата шина и средните токове за тяга и рекуперация, които да се използват при разработването на математичен модел.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Димитров В., Изследване на сензори, специфични за съвременните електрически транспортни средства, Международна научна конференция „КЕИТ–2014”, н. сп. “Механика, Транспорт, Комуникации”, ISSN 1312-3823, том 12, брой 3/2, 2014 г. статия № 1012

[2] Българанов Л. Електрически транспорт. София, 2009 г.

[3] Столичен електротранспорт ЕАД

[4] Томчева М. Анализ на тяговите и спиращни режими на тролейбус SKODA SOLARIS. Научна конференция с международно участие „Устойчиво развитие на транспортните системи“, 18 – 20.06.2018 г.,

## **EXPERIMENTAL TESTING OF THE RECUPERATIVE MODES OF TRAM MOTRICES PESA 120NaSf ALONG THE TRACK SEGMENT POWERED BY THE ‘EMIL MARKOV’ AND ‘SHIROKA LAKA’ FEEDERS OF THE ‘MOTOPISTA’ CURRENT-RECTIFIER STATION IN SOFIA**

**Georgi Pavlov, Lyubomir Sekulov, Rumen Stoitsev,  
Lazar Mihailov, Peter Bodurov**

*Todor Kableshkov University of Transport  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

***Key words:** land electric transport, electric transport vehicles, tram motrice, recuperative braking, feeders, current-rectifier station.*

***Summary:** The object of the survey in the present report is a segment of the tram line running along Bulgaria Boulevard, Sofia, powered by the ‘Motopista’ current-rectifier station through the ‘Emil Markov’ and the ‘Shiroka Laka’ feeders. The electric transport vehicles (ETV), which run along this segment of the track are tram motrices (TM) of the model PESA 120 NaSf, which have the option for recuperative braking. The TM provide transportation service coverage for lines Nos. 7 and 27, which pertain to the Sofia Public Transport network and are managed by the Sofia Electric Transport LLC. The experimental testing was conducted under normal exploitational conditions over the period 20-27 July, 2022 in the territory of the ‘Motopista’ current-rectifier station. Current measurements were made (direct and reverse) through the ‘Emil Markov’ and ‘Shiroka Laka’ feeders, and also voltage measurements were taken at the common power bus. The measurements were taken simultaneously in real time and records of the values were made within a sampling period of 100 ms. The main purpose was to determine the power consumption within this segment of the track in relation to the mode and the scheduling of ETV movements, as well as to determine the amount of the recuperative energy used in the different modes.*

*The experimental testing produced an ample volume of data. Some of these are presented through graphs and tables in the report. The obtained results were analysed in detail and the extreme values of the voltage and currents were identified in relation to the number of TMs moving along the track segment. The power consumption and the amount of the recuperative energy used within the track segment were determined.*