

---

**АНАЛИТИЧНО И ЕКСПИРЕМАНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА  
РЕКУПЕРАТИВНИТЕ РЕЖИМИ НА ТРОЛЕЙБУСИ SOLARIS 27TR  
ЗА УЧАСТЪЦИ ЗАХРАНВАНИ ОТ ФИДЕРИ “БОЯНА” И “МУР”  
КЪМ ТИС “ПАВЛОВО” В ГРАД СОФИЯ - ЧАСТ II**

*Мартина Томчева, Любомир Секулов*

[mtomcheva@vtu.bg](mailto:mtomcheva@vtu.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, тролейбуси, рекуперативно спиране, фидери, токоизправителни станции.

**Резюме:** Обектът на изследване в доклада са участъци от тролейбусно трасе по бул. Братя Бъкстон, София, захранван от токоизправителна станция(ТИС) “Павлово” през фидери “Бояна” и “Мур”. Електрическите превозни средства(ЕТС), които се експлоатират в участъка са тролейбуси(ТБ) модели Solaris 27Tr с възможност за рекуперативно спиране. ТБ обслужват линия ТБ9 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 1 юли до 7 юли 2022 г. на територията на ТИС “Павлово”. Измервани са токовете (прави и обратни) през фидери “Бояна” и “Мур” както е и измерено напрежението на общата захранваща шина. Измерванията са правени едновременно в реално време, целодневно 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.

В настоящия доклад (част II), са показани резултатите от измерените токове на фидери “Бояна” и “Мур” в ТИС “Павлово”. Направени са анализи и изводи.

### **ВЪВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМА**

При определяне на енергийната ефективност на ЕТС в зависимост от режима на движение, освен напреженията на общата шина, техните средни и моментни стойности, които са изследвани в част I от доклада е необходимо да се знаят и стойностите на токовете, които протичат през захранващите фидери, както и времената за които протичат.

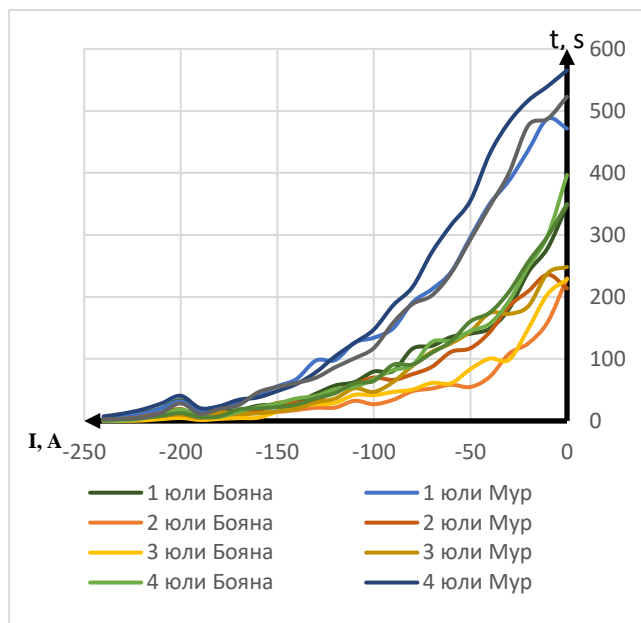
Рекуперативният ток се определя от формулата[4]:

$$(1) I_{rec} = \frac{U_{rec} - U_{KM}}{\sum R}, A$$

Където:  $U_{KM}$  е напрежението на КМ, V;  $U_{rec}$  е напрежението на токоснемателя на рекупиращото ЕТС, V;  $\sum R$  е еквивалентното съпротивление на веригата на тока на рекуперация,  $\Omega$ .

### РЕЗУЛТАТИ ОТ НАПРАВЕНОТО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

На Фиг.1 и Таблица 1 в графичен и табличен вид е отразено времевото разпределение на обратните токове от 0A до -250A с диапазон на изменение -10A.



Фигура 1 Времево разпределение на обратните токове на захранващите фидери

Таблица 1 Времево разпределение на обратните токове на захранващите фидери

Диапазон амperi	Времево разпределение за върнатия ток към общата шина									
	1.юли		2.юли		3.юли		4.юли		5.юли	
	Бояна	Мур	Бояна	Мур	Бояна	Мур	Бояна	Мур	Бояна	Мур
от 0 до -10	347,4	472	230,1	214	228	248,3	396,7	565,6	349,8	522,9
от -10 до -20	278,9	487	159,5	236	205	238,3	298,9	539,8	297,8	487,3
от -20 до -30	240,2	437	125,2	209	149	185,2	248,9	516,9	256,6	476,8
от -30 до -40	180,7	388	108,3	185	98,8	172,7	193,5	482,1	208,4	400,1
от -40 до -50	149	350	71,2	143	101	174	156,9	430,9	174,6	346,4
от -50 до -60	140,8	296	54,8	117	83,6	144,1	145,3	355,3	160,6	292,7
от -60 до -70	135,4	240	58,5	111	60,8	125,2	129,4	316,1	128,3	238,5
от -70 до -80	121,1	212	52,3	87,2	61,3	111,4	127,3	272	109,8	202,4
от -80 до -90	116,5	191	48	75,4	50,6	88,9	90,2	215,9	91	188,5
от -90 до -100	80,5	150	34,1	66,2	46,8	62,9	82,1	186,6	90,7	158,4
от -100 до -110	79,7	134	27	70	41,6	46,8	67,6	147,5	64,5	117,7
от -110 до -120	62,7	126	32,5	59,3	42,1	52,7	55	125,9	61	101,1
от -120 до -130	57,2	98,3	21,6	47,7	29,3	36,3	51,3	104,4	45	86,7
от -130 до -140	44	97,4	21,3	33,9	26,7	30	40,4	78,6	36,6	69,7
от -140 до -150	30,5	67,8	17,7	29,4	22,8	19,7	36,2	59,7	26,3	61,3
от -150 до -160	26,5	55,9	14,4	29	14,8	15,2	28,1	48,2	22	55,1
от -160 до -170	24,6	42,4	14	17,4	5,2	12,3	22,6	38	20,4	46,1
от -170 до -180	17	29,9	8,6	13,4	4,6	11,1	14,7	34,1	18,6	25,6
от -180 до -190	16	21,1	6,1	12,7	3,2	14,2	6,8	23,9	7,3	19,3
от -190 до -200	15,2	15	4,8	7,4	1,6	4,8	7,6	20,7	6,1	11,6
от -200 до -210	33,5	31,5	6,5	19	4,8	10,2	18,4	40,6	12,7	28,4
от -210 до -220	20,9	20,2	5	13	2,9	7,6	10,1	28,3	8,3	13,5
от -220 до -230	12,1	11,1	3,2	6,4	0,7	5,1	3,7	18,4	5,1	5,2
от -230 до -240	4,9	8,1	3,5	2,9	0	2	0,8	11,8	3	3,5
от -240 до -250	0,4	6,8	1,7	0,2	0	0,3	0,1	7,3	1,9	2,5

За делнични дни обратните токове в Мур са значително по големи от тези в Бояна, което важи и за празничните дни, но е изразено по-слабо. Продължителността на големите стойности на токовете е много по-малка. Това се обуславя от параметрите на рекуперативните режими на ЕТС, параметрите на КМ, фидерите и определя максимален ток, който стига до шината от -250A.

В Таблица 2 са дадени максималните моментни стойности на правите и обратни токове в двата фидера за периода на измерване.

Таблица 2 Минимални и максимални моментни стойности на фидерния ток

	Максимални стойности на обратните токове					Максимални стойности на тока в права посока				
	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Бояна	-255,8	-259,99	-241,6	-255,8	-292	785,49	910,63	566,04	734,42	753,32
Мур	-332,7	-242,03	-312,4	-332,7	-308	899,94	952,62	813,77	931,29	955,5

В Таблица 3 е показано общото дневно време за консумация от общата шина ТИС Павлово към КМ.

Таблица 3 Време за консумация

Време за тяга секунди					
	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли
	s	s	s	s	s
Бояна	43379.2	22317.7	24723.8	43418.3	40859.1
Мур	38279.9	19583.6	19180.2	38524.6	37628.3

В Таблица 4 е показано времето, през което протичат обратни токове към общата захранваща шина.

Таблица 4 Време за усвоена рекуперация

Време за усвоена рекуперация секунди					
	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли
	s	s	s	s	s
Бояна	2197,4	1130,2	1298,1	2217,9	2188,1
Мур	3943,1	1784,2	1822,1	4602,8	3936,6

### ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ОБЩАТА КОНСУМИРАНА И РЕКУПЕРАТИВНА ЕНЕРГИЯ ЗА ДВЕТЕ ИЗСЛЕДВАНИ СЕКЦИИ И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СРЕДНОДНЕВНИТЕ ТОКОВЕ

От получените експериментални изследвания за токовете и напреженията и измерените времена се изчисляват енергиите за тяга и рекуперация.

Общата консумираната енергия дневно за двата участъка е показана в Таблица 5.

Таблица 5 Общо консумирана енергия

Консумирана енергия, kWh					
	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
Бояна тяга	485,54	203,463	219,7396	485,60031	477,9
Мур тяга	627,32	294,913	285,6599	610,49687	614,9

6. Усвоената рекуперативна енергия от друга секция дневно е показана в Таблица

Таблица 6 Усвоена рекуперативна енергия от други секции

Усвоена рекуперативна енергия от други секции, kWh					
	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
Бояна рек.	23,111	10,9409	11,7692	21,028211	20,84
Мур рек.	41,732	19,0166	17,85938	46,811006	39,45

Отношението на усвоената рекуперативна енергия от други секции и консумираната енергия за двете секции е показано в Таблица 7.

**Таблица 7 Отношение на рекуперативна и общата енергия**

<b>Отношение на рекуперативната и общата консумирана енергия</b>					
	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли
	%	%	%	%	%
Бояна	4,76	5,377	5,356	4,33035	4,4
Мур	6,65	6,448	6,252	7,66769	6,4

От среднодневното напрежение, което е общо за двата участъка, енергиите за рекуперация и тяга и съответните времена се определят среднодневните токове за тяга и рекуперация. В Таблица 8 са изчислените стойности за среднодневния тягов ток.

**Таблица 8 Среднодневни стойности на общия ток**

<b>Среднодневни стойности на тяговия ток</b>					
	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли
	A	A	A	A	A
Бояна	58,36308498	47,1548	47,06262	58,695326	63,66
Мур	85,45081901	77,8915	78,86407	83,1654	88,96

В таблица 9 са изчислените стойности за среднодневния рекуперативен ток.

**Таблица 9 Среднодневни стойности на рекуперативния ток**

<b>Среднодневни стойности на рекуперативния ток</b>					
	1.юли	2.юли	3.юли	4.юли	5.юли
	A	A	A	A	A
Бояна	54,84196289	50,071	48,00891	49,757407	51,84
Мур	55,1857899	55,1289	51,90117	53,373201	54,55

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ И АНАЛИЗ**

Изследванията в тези два секционни участъка показват, че режимът за рекуперация при тролейбусите има широки граници на изменение, които се определят от средната и максимална моментна скорост на движение, графика и условията на движение. Ако е налице стъстен график, по-високи средни скорости на движение и наличие на разнообразни по вид ЕТС в другите неизследвани участъци, то процентът на усвоена рекуперативна енергия ще се увеличи. В конкретния случай според измерванията средните стойности са в доста широки граници между 661V и 696V и това се дължи на разтоварения непостоянен режим на работа на ТИС по време на измерванията. Други влияещи параметри големините на моментните максимални стойности на напрежението на работната шина 967V, както и максималния моментен обратен ток 332.67A и максималния моментен прав ток по фидерите 955.5 A. Тези стойности се отнасят в голяма степен за всички участъци в София, където се движат

еднотипни возила *Solaris* при такива скорости и график на движение. Друга особеност свързана с получените резултати е захранването на двете секции, което се извършва по средата на КМ в отделните секции и не може да се определи като едностранно или двустранно захранване.

От получените резултати за среднодневните стойности на токовете за тяга между 47,06 А и 88,96 А се вижда, че режимите за движение в делнични дни са сходни помежду си, както и празнични дни са сходни помежду си. Разликата между средните стойности на токовете празничен ден и делничен ден е различен, което обяснява различното усвояване на рекуперация в делнични и празнични дни в изследваните участъци.

От получените резултати за среднодневните рекуперативни токове се определя, че характерът на товара на ТИС в другите секции е идентичен за делник и празник и той не влияе съществено за усвояването на рекуперативната енергия.

Получените среднодневни стойности на токовете са определящи за бъдещи изследвания за двата участъка.

Процентът на усвоената рекуперативна енергия от изследваните участъци също е нисък между 4.4% и 7.6%. Основните причини са ремонтът на трамвайното трасе по линия на ТМ5, както и че коефициентът на натовареност е нисък, също така не е отчетен обменът на енергия между ЕТС в изследваните участъци. Възможни начини за неговото повишаване, освен чрез режима на движение, е чрез системи за съхранение на енергията например използването на супер кондензатори.

## 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] Саблин О. И., Повышение эффективности рекуперации энергии в системе электротранспорта при ограниченном тяговом электропотреблении, УДК 629.423.1, DOI: 10.15587/2312-8372.2014.33726
- [5] Томчева М. Анализ на тяговите и спирачни режими на тролейбус SKODA SOLARIS. Научна конференция с международно участие „Устойчиво развитие на транспортните системи“, 18 – 20.06.2018 г.,
- [6] Георги Димитров, Георги Павлов, "Анализ на ефективността на рекуперативните спирачни системи на тролейбуси ŠKODA SOLARIS в реални експлоатационни условия", Научно списание "Механика, транспорт, комуникации", том 14, бр. 3/2, стр. X-24, статия № 1380, 2016, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), <https://mtc-aj.com/library/1380.pdf>

# **ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL TESTING OF THE RECUPERATIVE MODES FOR SOLARIS 27TR TROLLEYBUSES IN THE LINE SEGMENTS POWERED BY THE ‘BOYANA AND ‘MUR’ FEEDERS OF THE ‘PAVLOVO’ CURRENT-RECTIFIER STATION IN SOFIA, PART II**

**Martina Tomcheva, Lyubomir Sekulov**

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

**Key words:** *land electric transport, electric transport vehicles, trolleybuses, recuperative braking, feeders, current-rectifier stations.*

**Summary:** *The objects of the survey in the present report are the segments of the trolleybus line running along the Bratya Buxton Boulevard, Sofia, powered by the ‘Pavlovo’ current-rectifier station through the ‘Boyana’ and ‘Mur’ feeders. The electric transport vehicles (ETV), which run along this segment of the line, are trolleybus (TB) models Solaris 27Tr, which have the option for recuperative braking. The TB provide transportation service coverage for line No. 9, which pertains to the Sofia Public Transport network and is managed by Sofia Electric Transport LLC. The experimental testing was conducted under normal exploitative conditions over the period 1-7 July, 2022 in the territory of the ‘Pavlovo’ current-rectifier station. Current measurements were made (direct and reverse) through the ‘Boyana’ and ‘Mur’ feeders, and voltage measurements were taken at the common power bus. The measurements were taken simultaneously in real time, over full days, 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 present report (Part II) shows the results from the measurements of the currents at the ‘Boyana’ and ‘Mur’ feeders of the ‘Pavlovo’ current-rectifier station. Analysis and conclusions have been drawn.*