

## **ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕКУПЕРАТИВНИТЕ РЕЖИМИ НА ТРАМВАЙНИ МОТРИСИ PESA 120NaSf ЗА УЧАСТЪЦИ ЗАХРАНВАНИ ОТ ТИС “МОТОПИСТА” В СОФИЯ ЧАСТ I**

*Любомир Секулов, Мартина Томчева*

[res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg), [mtomcheva@vtu.bg](mailto:mtomcheva@vtu.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, рекуперация, рекуперативно спиране, фидери, токоизправителни станции.

**Резюме:** Изследването е насочено към разходът на енергия за обособено трамвайно трасе по бул. “България”, София, захранвано от токоизправителна станция (ТИС) “Мотописта”. 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 ТМ7 и ТМ27 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 7 юли до 25 юли 2022 г. на територията на ТИС “Мотописта”. Измервани са токовете (прави и обратни) през 6 фидера (Манастирски ливади, Тодор Каблешков, Невестина скала, Метличина поляна, Емил Марков, Широка лъка“), захранващи три секции от трамвайното трасе по бул. България в София. Измервани са в реално време и целодневно токовете за всяка секция, както и напрежението на общата захранваща шина. Направени са записи на стойностите с период на семплиране 100 ms. Основната цел е да се определи разходът на електрическа енергия за участъците в зависимост от режима и графика на движение на ЕТС, както и усвоената рекуперативна енергия при различните режими на движение.

Поради големия обем от данни докладът е разделен на няколко части. В част I от доклада са представени основните параметри и характеристики на изследваните участъци, а именно дължини на изследваните участъци, дължини и характеристики на контактната мрежа (КМ), дължини и характеристики на захранващите фидери, профил на пътя, скорости на движение, местоположение на спирки, график на движение на ТМ.

### **ВЪВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМА**

Настоящото изследване е свързано с повишаване на ефективността на рекуперативните режими на в Столичен електротранспорт (СЕТ). В тази връзка ефективността на спиращите процеси в ЕТС, които са основно електрически, зависят от вида на регулатора, алгоритъма на системата за управление (СУ), параметрите и начина

на секционирание на контактната мрежа (КМ). Изследването на процесите при реализация на рекуперативни режими на ЕТС крие огромни възможности за оптимизация и постигане на по-висока електроенергийна ефективност (ЕЕЕф) на електрическия транспорт (ЕТ).

Всички съвременни производители проектират и изработват ЕТС за градски обществен транспорт с възможност за рекуперативно спиране, което по същество представлява генериране на електрическа енергия в спиращ режим и връщането и в КМ. С това се постигат значителни икономии на електрическа енергия. Рекуперацията се осъществява в зависимост от изискванията на ТЕС и техническите възможности, които е осигурил производителят на ЕТС. От експериментални изследвания е доказано, че рекупериранията електроенергия може да достигне до 30÷50% от общата консумирана енергия от ЕТС. [6]

Основните фактори, които влияят на рекуперативното движение са:

Състояние на пътната инфраструктура – Влошеното състояние на градската пътна инфраструктура води до по-ниски на максимални скорости на движение на ЕТС и по-продължителна работа в режим на тяга. Крайният ефект е повишаване на общия относителен разход на енергия, 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 ЕТС в необособени трасета в интензивен трафик е съпроводено с чести спирания и потегляния, които от своя страна водят както до повишаване на общото потребление на електрическа енергия на ЕТС, така и на общия относителен разход, kWh/km. От друга страна наличието на множество светофарни уредби за регулиране на движението също води до нахъсване непрекъснатия ход на возилата. [4]

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

Квалификация на водачите – Техниката на управление на ЕТС 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 [2].

При оценка на ефективността на използването на рекуперативното спиране в транспорта, за постигане на по-висока ЕЕЕф и за нуждите на доклада се използват следните понятия:

**Абсолютната рекуперативна енергия** е максималната стойност на енергията, която може бъде върната в КМ в режим на рекуперация, получена според резултатите от тяговите изчисления. Реално абсолютната енергия на рекуперация е тази енергия, която ЕТС може генерира чрез своите механични и електромеханични характеристики в процеса на движение в участъка;

**Нетягова рекуперативна енергия** е част от енергията генерирана в режим на рекуперация, която не се използва за тягови нужди, а се усвоява или преобразува от специални товари, например рекуперативната енергия, която се използва за собствени нужди на ЕТС, заряд на акумулатори, осветление, климатизации и др.;

**Усвоена рекуперативна енергия** е тази, която може да бъде отдадена в КМ при условие, че се консумира напълно други ЕТС захранвани от същата система;

**Неусвоена рекуперативна енергия** е разликата в стойностите на абсолютната и усвоената рекуперативна енергия. Например тази, която се използва за спиране в реостатите на същото ЕТС;

**Потенциал на рекуперацията** е разликата между изчислената стойност на абсолютната рекуперативна енергия и действителната стойност на върнатата енергия според измервателните уреди на ЕТС [3].

Моментните и краткотрайни измервания не могат да представят реално разходът на усвоената рекуперативна енергия и потенциалът на рекуперацията и това е причина да се направят целодневните експерименталните измервания на токовете и напреженията. Именно те са определящи за коректните анализи на ЕЕЕф на движение на ЕТС за конкретен участък. [5]

Измерванията се извършват с измервателна техника осцилоскоп от серия Picoscope 2000 с USB 2.0 комуникации към РС. [1]

## ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ИЗСЛЕДВАНИТЕ УЧАСТЪЦИ

Изследвани са три съседни участъка, в които трасето на движение е обособено, двупътно с междурелсие 1009 mm. Към датата на изследването там има три светофара и по пет спирки в посока. 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 Ман. ливади и посока София - Център. Общата дължина на участъците е 1500 m.

Контактната мрежа (КМ) е изградена с меден проводник АС-100 по БДС EN 50149:2004. Фиксиращите обтежки на гъвкавите напречници в правата са от бронзово въже 35 mm<sup>2</sup> /7x2,5/ по DIN 48201. Носещата мрежа в кривите бронзово са от 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>,

Първият участък от изследването се захранва едностранно с фидери “Манастирски ливади”, “Тодор Каблешков” и е с дължина 400 m като фидерите са със следните дължини ± “Т. Каблешков” 740 m и 860 m и ± “Ман. ливади” 1800 m и 860 m. В този участък се намира обръщалото (първа и последна спирка) на ТМ7 и ТМ27, както и крива с малък радиус и подлез с по-голям от средния наклон. Разделен е от съседния участък със секционен изолатор (СИ) 416. Максималнотоковите защиты (МТЗ) на двата фидера са настроени за ток на изключване 1200А.

Вторият участък е между СИ415 и СИ416 с дължина 550 m. Захранва се двустранно чрез фидери ± “Невестина скала” с дължина на правия и обратния фидер 1670 m и фидер ± “Метличина поляна ” с дължина на правия и обратния фидер 715 m. МТЗ на двата фидера са настроени за ток на изключване 1400 А.

Третият участък разделен от съседните участъци със СИ №414 и №415. 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. Дължините на фидерите 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. МТЗ на двата фидера са настроени за ток на изключване 1400 А.

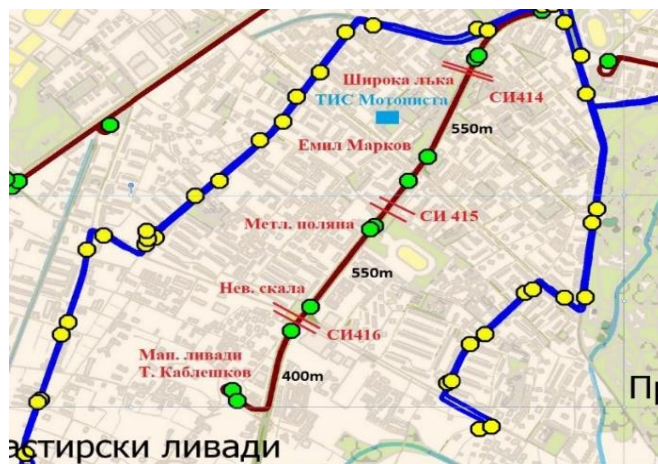
В таблица 1 са показани дължините и електрическото съпротивление на фидерите.

**Таблица 1. Дължина на фидери и ел. съпротивление**

Наименование на фидера	Фидери дължина	Сечение	Съпротивление
	m	m <sup>2</sup>	Ω
Манастирски ливади+	1800	0,0005	0,0936
Манастирски ливади-	860	0,0005	0,04472
Т. Каблешков +	1740	0,0005	0,09048
Т. Каблешков -	860	0,0005	0,04472

Метличина поляна±	550	0,0005	0,01892
Невестина скала±	550	0,0005	0,01892
Емил Марков ±	715	0,0005	0,03718
Широка лъка±	1670	0,0005	0,08684

На Фиг. 1 е показано местоположението на изследваните участъци в град София, тяхната дължина и местоположението на СИ.

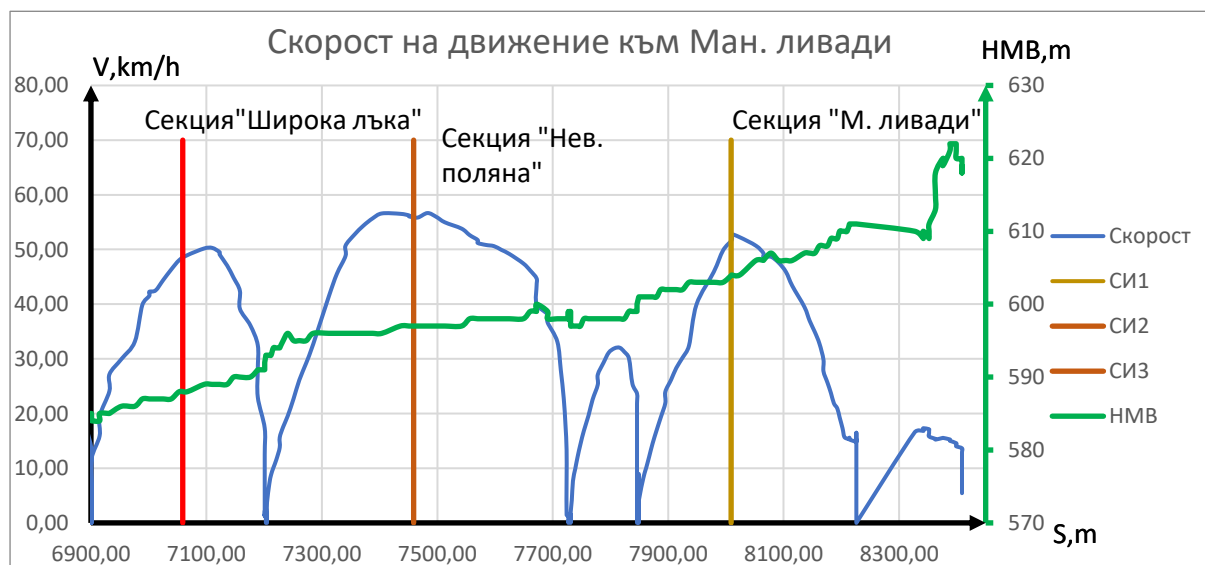


Фигура 1 Местоположение на изследваните участъци

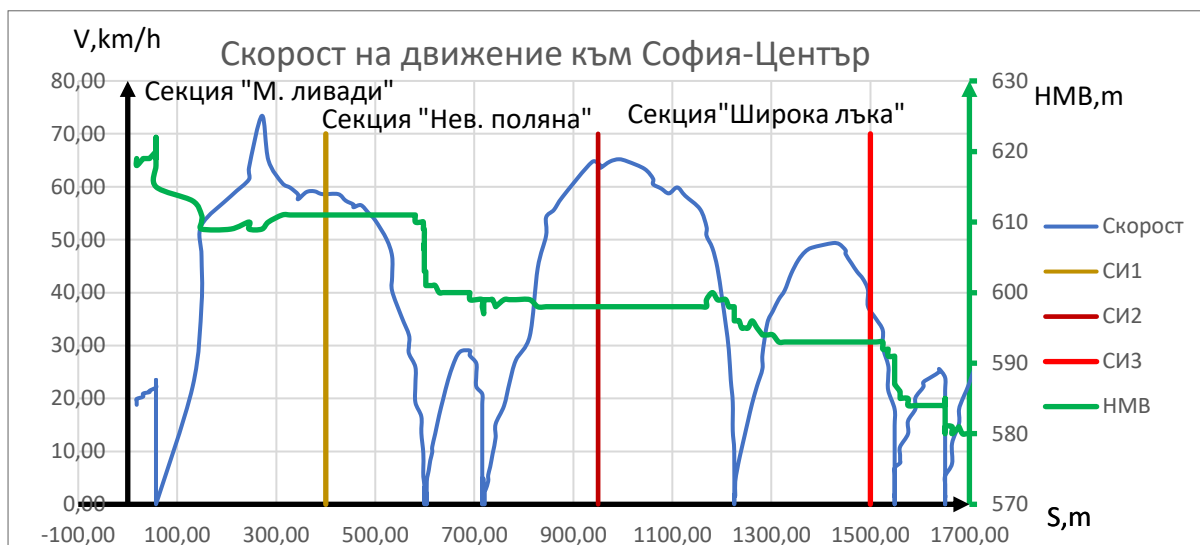
Трите участъка се захранват от ТИС “Мотописта” от три тягови трансформатора през неуправляеми изправители захранващи обща шина. От ТИС “Мотописта” се захранват и участъци, по които се движат тролейбуси (ТБ) Solaris. Те обслужват линии ТБ9 и ТБ2.

Броят на курсовете на ТМ7 и ТМ27, според графика на движение, през летния сезон за делничен ден са 462, а за празничен 249.

На фигура 2 и фигура 3 са показани профилът на пътя и моментните скорости на движение на ЕТС в двете посоки за изследвания участък, която не съвпада със зададените средни скорости по графика на движение, определен от СЕТ за трето тримесечие от 2022 година. Измерените средни стойности на скоростта на движение са значително по-високи и те са между 19.94 km/h и 20.48 km/h.



Фигура 2 Моментна скорост на движениена ТМ посока Ман. ливади



Фигура 3 Моментна скорост на движение на ТМ посока София-Център

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В част I от доклада са представени специфичните особености на изследваните участъци, местоположение на СИ, дължина на фидери, дължина на КМ, дължина и профил на пътя, моментни и средни скорости на движение, наличието на криви. Характеристиките на изследваните участъци, описани в доклада, показват висок потенциал на рекуперацията. Движението по участъците се извършва само от трамваи модел PESA120NaSf, което е най-енергоемкото возило, експлоатирано от СЕТ, с възможност за рекуперативно спиране. По другите участъци захранвани от ТИС "Мотописта" се движат също само тролейбуси Solaris с възможност за рекуперативно спиране. И двата модела ЕТС, които се движат по захранваните от ТИС участъци, имат система за климатизация отговаряща на съвременните изисквания за комфорт. Избраният ТИС и избраните участъци за изследване, ще дадат реална представа за най-високата стойност към днешна дата на усвоената рекуперативна енергия на НГЕТ експлоатиран от СЕТ в рамките на град София.

## 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] Димитров Г., Г. Павлов. Анализ на ефективността на рекуперативните спиращи режими на тролейбуси Skoda Solaris в реални експлоатационни условия. III научна конференция с международно участие „КЕИТ 2016”, Научно списание „Механика, транспорт, комуникации“, том 14, брой 3/2, 2016, стр. X-24, статия 1380, ISSN 1312-3823(print), ISSN 2367-6620(online), <https://mtc-aj.com/library/1380.pdf>
- [3] Столичен електротранспорт ЕАД ;
- [3] Никифоров М. М., Каштанов , В. А. Кандаев “Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения” УДК 621.331:621.311
- [4] Търпов И., Изследване на екологичния ефект от рекуперативното спиране, IV Научна конференция с международно участие „Комуникации, електрообзавеждане и информатика в транспорта – КЕИТ 2018”, 28.09. - 30.09.2018 г., гр. Банско, 2018 г., Научно списание „Механика, транспорт, комуникации“, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), том 16, брой 3/2, 2018г., стр. IX-7 – IX-11, статия № 1712

[5] Лалев Т., Изследване на възможностите за ефективно използване на рекупериранията електрическа енергия в тягова мрежа за постоянен ток, XXIII Международна научна конференция „Транспорт 2017”, Научно списание „Механика Транспорт Комуникации”, ISSN 1312-3823 (print) ISSN 2367-6620 (online), том 15, брой 3, 2017 г., стр. X-84 – X-89, статия № 1527

[6] Георги Димитров, Георги Павлов, "Анализ на ефективността на рекуперативните спиращи 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>

## **TESTING OF THE RECUPERATIVE MODES OF TRAM MOTRICE PESA 120NaSf ALONG SEGMENTS OF THE TRACK POWERED BY THE ‘MOTOPISTA’ CURRENT-RECTIFIER STATION IN SOFIA, PART I**

**Lyubomir Sekulov, Martina Tomcheva**

***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:** *This survey explores the consumption of power for the tram line running along the Bulgaria Blvd., Sofia, which is powered by the ‘Motopista’ current-rectifier station. 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 Sofia Electric Transport LLC. The experimental testing was conducted under normal exploitative conditions over the period 7-25 July, 2022 in the territory of the ‘Motopista’ current-rectifier station. Current measurements were made (direct and reverse) through 6 feeders, powering three sections of the tram line along the Bulgaria Blvd. in Sofia. The measurements of current were taken simultaneously in real time, and voltage measurements were taken at the common power bus. 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.*

*Due to the ample volume of data produced in the course of the testing, the report was split into several parts. Part I of the report deals with the main characteristics and parameters of the surveyed track segments, in particular, the lengths of the segments surveyed, the length and characteristics of the contact grid (CG), the length and characteristics of the powering feeders, road profile, movement velocity, the location of the tram stops and the scheduling of the TM.*