

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ЕФЕКТИВНО ИЗПОЛЗВАНЕ НА РЕКУПЕРИРАНАТА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ В ТЯГОВА МРЕЖА ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК

Тодор Лалев

[todor.lalev@siemens.com](mailto:todor.lalev@siemens.com)

Сиенс ЕООД, София, ул. Кукуш №2  
БЪЛГАРИЯ

*Ключови думи:* рекуперативно спиране, електрически транспортни средства, тягова електрозахранваща система.

*Резюме:* Всички съвременни електрически транспортни средства (ЕТС) се произвеждат с възможност за връщане на енергия в мрежата в спиращен рекуперативен режим. Към настоящия момент не е актуален въпроса как да се осъществи рекуперативно спиране, а как да се повиши неговата ефективност. Затова в настоящия доклад е разгледана възможността за повишаване на ефективността на оползотворяване на електроенергията, получена при рекуперативното спиране в тяговите електрозахранващи системи (ТЕС) за постоянен ток.

### 1. Въведение

Развитието и енергийната ефективност на електрическия транспорт са изключително важни за всички градове, характеризиращи се с голяма плътност на населението. В тази връзка оптимизирането на разходите за електроенергия за нуждите на електрическия транспорт винаги е бил особено актуален въпрос.

Един от начините за намаляване на разхода за електроенергия е като се повиши ефективността на рекуперативното спиране на ЕТС. Обикновено рекуперативно спиране, т.е. връщане на електроенергия, се осъществява като напрежението генерирано от ЕТС  $U_{ТМРек}$  достигне стойност, която е по-висока от номиналното напрежение на тяговата мрежа  $U_{нТМ}$ . В общия случай на рекуперативен процес, при липса на консуматори (ЕТС) в участъка, напрежението се повишава и при достигане на до  $U_{ТМРек,max}$ , електрическото спиране преминава в електродинамично (реостатно). При този режим на електрическо спиране, генерираната електрическа енергия се преобразува в топлина, посредством съпротивлението на спиращните резистори, и в следствие се отдава в околната среда, без да се използва за задоволяване на електроенергийни нужди.

Изводът, който може да бъде направен е, че дори при идеални условия за рекуперация (голяма мощност на ЕТС, продължителен наклон на спускане, оптимално секционирание на ТМ), ефективността на рекуперативния спиращен режим може да бъде незначителна, поради липса на подходящи консуматори в този момент. Този проблем донякъде може да бъде решен с оптимизиране на графика на движение, но това няма да бъде достатъчно.

В доклада са представени резултатите от направено проучване на възможностите за прилагане на нови технологии, за повишаване ефективността на оползотворяване на рекупериранията електрическа енергия от ЕТС в ТМ за постоянен ток. Обектът на изследване е ТМ на „Метрополитен“ ЕАД и експлоатираните метросъстави на първи и втори метродиаметър.

## 2. Енергийната ефективност на метросъставите при рекуперативно спиране – Възможности за нейното повишаване

На този етап в Софийския метрополитен са изградени два метродиаметъра, а третият е в процес на строителство. В експлоатация са пуснати общо 26 ТПС и 8 ПС. Общата дължина на линиите от първи и втори метродиаметър е 40 км с общо 35 метростанции (МС). Проучването е направено на база измервания извършени в реални експлоатационни условия на електрическата енергия за собствени нужди в ТПС, тяговата и рекуперативната енергии на ЕТС и графика за движение на влаковете в подходящо избрани метроучастъци.

### 2.1. Характеристики на метроучастъците

В Столичния метрополитен движението на влаковете се осъществява съобразно действащ график. В зависимост от пътникопотока, графици за движение на влаковете са разработени с различна интензивност в различните часови интервали, както и в делнични и празнични разписания (виж. Таблица 1 и Таблица 2).

Таблица 1

Интервали за движение на влаковете за делничен делничен и празничен ден за участък МС10 – МС09 МС211–МС210

Часови интервал	Интервал между влаковете в делничен ден , min	Интервал между влаковете в празничен ден , min
05:00-7:30	6	7,5
7:30-10:30	3	6,5
10:30-16:00	4,5	6
16:00-20:30	4	6
20:30-22:00	5	6,5
22:00-23:00	6	7,5
23:00-24:00	7	7,5

Таблица 2

Интервали за движение на влаковете за и празничен ден участък за участък

Часови интервал	Интервал между влаковете в делничен ден , min	Интервал между влаковете в празничен ден , min
05:00-7:30	12	15
7:30-10:30	6	13
10:30-16:00	9	12
16:00-20:30	8	12
20:30-22:00	10	13
22:00-23:00	12	15
23:00-24:00	14	15

За целите на настоящото проучване са разгледани конкретни участъци от първи и втори метродиаметър.

**Участък 1** - метростанция (МС 10) „Жолио Кюри” – метростанция (МС 9) „Стадион Васил Левски” – с обща дължина 2185 м, преобладаващият наклон на разстояние от 1600 м е 24%, а 227 м са с наклон 38%. При така зададените в Таблица 1 интервали между влаковете в изследвания участък, в делничен ден между МС 10 и МС 9 се движат 220 влака, а в празничен ден 190 влака или 77164 влака годишно.

**Участък 2** - метростанция (МС 211) „Джеймс Баучер” – метростанция(МС 210) „Европейски съюз”- с обща дължина 1071 м, като преобладаващия наклон е 39,9% с дължина 847,5 м и 200 м са с наклон 3%. При така зададените в Таблица 2 интервали между влаковете в изследвания участък, в делничен ден между МС 211 и МС 210 се движат 133 влака, а в празничен ден 93 влака или 37900 влака годишно. Като се има предвид, че броят на влаковете с възможност за рекуперация е 77% от общия брой преминаващи влакове, то за участъка МС10-МС9 се получава, че приблизително за една година преминават 59 416 влака с възможност за рекуперация, аналогичен е случаят за участъка МС211-МС210, където броят на влаковете с възможност за рекуперация е 29183.

## 2.2. Измерване на тяговата и рекупериранията от метросъставите електрическа енергия и енергията консумирана за собствени нужди

Към настоящия момент в метрото на гр. София се експлоатират две серии метровлакове, всяка една от тях съставена от два модела метровагони. Влаковете, съставени от вагони модел 81-717.4/81-714.4 са с постоянно-токово задвижване и резисторно-контакторно управление на режимите на работа без режим за рекуперативно спиране. Влаковете, съставени от вагони модел 81-740.2/81-741.2 са с асинхронно тягово електрозадвижване, захранвано чрез инвертори, изградени с IGB транзистори, които реализират векторно управление на двигателите и режим на рекуперативно спиране [2].

При направеното изследване е оценена ефективността на рекуперативното спиране, като за целта са използвани данните от електромерите инсталирани в един метровлак от всяка серия. Измерените от електромерите данни за количествата на електрическа енергия при тяга и рекуперация са обработени съгласно методика подробно описана в [1].

Резултатите от измерванията за разхода на електрическа енергия и пробега на влаковете, както и стойностите на относителните енергии  $e_T^*$  и  $e_R^*$  са показани в таблица 3 и подробно анализирани в предходна публикация [2] на колектива.

Разход на електрическа енергия на влак серия 81-740.2/81-741.2 Таблица 3

Дата на отчитане	Показание на километража,	Показание на електромера		Относителен разход на енергия за целия влак, $e^*$	Относителна рекуперирана енергия за целия влак, $e_r^*$	Относит. дял на върнатата енергия
		Регистър 1.08 Потребление	Регистър 2.08 Рекуперация			
-	km	MWh	MWh	kWh/km	kWh/km	%
22.06.2012 г.	517540	984,044	136,112	-	-	-
23.05.2013 г.	596843	1233,664	199,307	9,44	2,39	25,3
08.05.2014 г.	606406	1263,038	205,642	9,21	1,99	21,6
03.07.2014 г.	620263	1305,294	215,940	9,15	2,23	24,4
29.10.2015 г.	688631	1515,617	266,781	9,23	2,23	24,2

Видно от таблица 3 в реални експлоатационни условия, в Столичния метрополитен върнатата електрическа енергия, в тяговата мрежа се движи в границите от 20% до 25% от консумираната от метросъставите. Според [3, 4] размерът на рекупериранията електрическа енергия може да достигне до 40 % от консумираната от метросъставите. Като сравним нашият случай със случаите посочени в [3, 4] и приемем, че при [3, 4] е постигната 100% оползотворяване на енергията получена при рекуперативното спиране, то за „Метрополитен” ЕАД оползотворената при рекуперативното спиране електроенергия варира в границите от 50% до 62,5%. Това означава, че между 40% - 50% от енергията получена при спиране се консумира от спирачните резистори, като се превръща в топлина и се отдава в околната среда. От казаното до тук и на база на получената от стойностите в таблица 3 Средна относителна рекуперирана енергия за целия влак,  $e_{rcp}^*=2,21 \text{ kWh/km}$  се вижда, че същата може да бъде повишена с  $\Delta e_{rcp}=0,884 - 1,105 \text{ kWh/km}$ . Това може да бъде постигнато с конкретен анализ за възможностите за нейното усвояване и чрез внедряване в ТПС на подходящи за това технически средства.

## 2.3. Измерване на електрическата енергия за собствени нужди в ТПС

Електроснабдяването на метрото се извършва чрез специално изградени тягово понижаващи станции (ТПС) и понижаващи станции (ПС). С оглед пълно резервиране на електрозахранването, ТПС и ПС са свързани една с друга в система (пръстен), а външното им захранване е със средно напрежение 10 kV от различни градски подстанции.

Целта на ТПС е да преобразуват променливото напрежение 10 kV в постоянно с големина 825 V, необходимо за движение на влаковете и да осигурят захранване 380/220 V на съоръженията за собствени нужди.

Подходяща възможност за ефективно оползотворяване на енергията получена при рекуперация е ако бъде използвана от консуматорите собствени нужди.

За проучването на тази възможност в периода от 00:00 на 17.10.16г. до 24:00 на 23.10.16 г. бяха снети товарите графици от електромерите инсталирани в ТПС 23 – МС „Жолио Кюри”, ТПС 23 - МС „Стадион Васил Левски”, ТПС 43 - МС „Джеймс Баучер” и ПС 42 - МС „Европейски съюз”.

В таблица 4 са показани обработените стойности на консумираната електроенергия за собствени нужди на трансформатори 31 и 32) на съответните ТПС.

Видно е, че очакваната годишна консумация на МС 10 "Жолио Кюри" ТПС 23 само на Тр-32 собствени нужди, в часовия интервал от 05:00 до 24:00 (когато има движение на влакове) е 736 679 kWh. Аналогично за МС 211 "Джеймс Баучер", ТПС 43 за Тр-31 собствени нужди годишната консумация е 328 463 kWh.

Таблица 4

Обобщени стойности на разход на електроенергия за собствени нужди

	Първи метродиаметър				Втори метродиаметър			
	МС 10 "Жолио Кюри" ТПС 23		МС 09 "Стадион Юнак" ТПС22		МС 211 "Джеймс Баучер" ТПС43		МС 210 "Европейски съюз" ПС 42	
Консуматор	Тр-31	Тр-32	Тр-31	Тр-32	Тр-31	Тр-32	Тр-31	Тр-32
<b><i>P sum</i>, kWh</b>	9380	17846	4575	6922	7957	2448	9339	4160
<b><i>P aver</i>, kWh</b>	56	106	27	41	47	15	56	25
<b><i>P max</i>, kWh</b>	104	116	68	160	118	47	71	61
<b><i>P min</i>, kWh</b>	36	100	13	14	24	6	29	9

*P sum*, kWh – общ разход за периода от 00:00 на 17.10.16г. до 24:00 на 23.10.16г; *P aver*, kWh – среден почасов разход на енергия за собствени нужди; *P max*, kWh – максимален разход на енергия за собствени нужди; *P min*, kWh – минимален разход на енергия за собствени нужди;

Като се вземат предвид очакваната годишна консумация за собствени нужди за горесцитираните ТПС, графика за движение на влаковете в разглежданите участъци, факт е, че оползотворяването на електроенергия получена на рекуперативно спиране може да бъде повишено с  $\Delta e_{rep} \approx 1 \text{ kWh/km}$  то:

- За участъка МС 10 „Жолио Кюри” –МС 9 „Стадион Васил Левски” количеството електроенергия получена при рекуперация която може да се оползотвори от консуматорите средно напрежение за една година може да достигне до **194 736 kWh**.

- Аналогично за участъка метростанция „Джеймс Баучер” – метростанция „Европейски съюз” се получава **46 882,49 kWh**.

Тези количества електроенергия няма да бъдат заплатени на доставчика на електроенергия и ще бъдат спестени от сметките на „Метрополитен” ЕАД. За целта е необходимо да бъде намерено подходящо техническо решение.

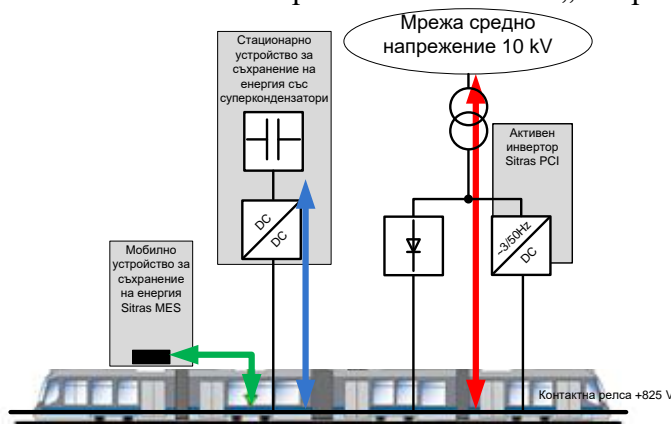
### 3. Предложение за техническо решение за повишаване ефективността на рекуперативното спиране

Най-разпространените и предпочитани технически решения към момента са показани на фигура 4. Те могат да бъдат разделени на две групи. Първата група са технически решения използващи акумулиращи устройства (в случаите на фигура 4 суперкондензатори) и втората група технически решения, които позволяват енергията получена при рекуперация да бъде върната в мрежата средно напрежение и да бъде използвана за нетягови нужди [5, 6].

Устройствата за съхранение на енергия използващи суперкондензатори имат висока цена и кратък живот. Този тип технически решения са предпочитани за тягови електрозахранващи системи, при които липсва собствена мрежа за захранване и резервиране на страна средно напрежение.

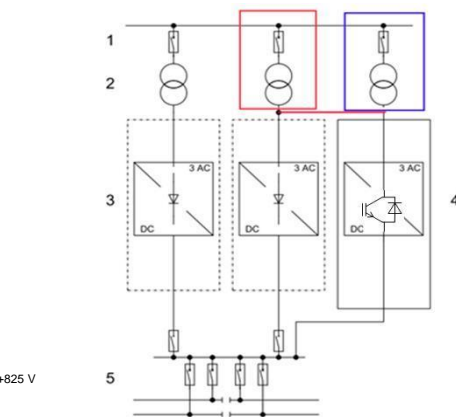
Втората група технически решения са предпочитани при тягови електрозахранващи системи с изградена собствена мрежа за захранване и резервиране на системата на страна средно напрежение, като тук рекупериранията от ЕТС електрическа енергия може да бъде върната на страна средно напрежение и съответно използвана както за тягови, така и за друг вид консуматори (пр. ескалатори, осветление, ОВиК и др).

От гореизложеното става ясно, че устройствата за съхранение на енергия не са оптималното техническо решение за ТЕС на „Метрополитен“ ЕАД.



Фиг. 4, а Възможности за съхранение и връщане в мрежата регуперираната от Метросъставите енергия

За да се повиши ефективното оползотворяване на електрическата енергията получена при рекуперативното спиране е необходимо в ТПС да се инсталират съвременни силови инвертори, изградени на базата на IGB технологията, които да направят възможен преноса на рекупериранията електроенергия от постояннотоковата страна на ТЕС към променливотоковата електрозахранваща мрежа средно напрежение (виж фиг. 4 а и фиг. 4 б Sitras®PCI). На фиг. 4 б е показана блок схема на Sitras®PCI (4), който се свързва успоредно на захранващия тяговата мрежа диоден тягов изправител (3). Според начина на присъединяване в силовата верига на ТПС Sitras®PCI може да бъде използван като автономен или спомагателен инвертор. Автономен инвертор е когато Sitras®PCI е свързан между сборна шина на РУ 825V DC (5) и КРУ 10 kV със спомагателен трансформатор (2). Този вариант е предпочитан при новостроящи се ТПС или при цялостна реконструкция на съществуващи ТПС[7]. В случай, че точките на свързване на Sitras®PCI в ТПС са вторичната страна на тяговия трансформатор (2) и сборна шина на РУ 825V DC (5) то той се използва като спомагателен инвертор. Този вариант е удобен, когато се извършва ретрофит в някоя от съществуващите ТПС. Предимството е, че с малко по обем строително монтажни работи и без допълнителни съоръжения инверторът се присъединява към съществуващото оборудване [5].



Фиг. 4, б Инвертор Sitras® PCI, видове на включване в ТПС средно напрежение

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати от проведеното изследване и направеният анализ дават основания да са направят следните изводи:

- При метровагони модел 81-740.2/81-741.2 средният относителен дял на върнатата в тяговата мрежа електрическа енергия при режим на рекуперативно спиране е около 24%;
- Благодарение на новите технологии при инсталиране на Sitras®PCI, в над 50% от експлоатираните ТПС ефективното оползотворяване на електроенергията получена при рекуперативното спиране от метросъставите може да бъде повишена с 40 % - 50%;
- Енергийните разчети за консуматори собствени нужди на ТПС показват едни добри условия за оползотворяване на електроенергията получена при рекуперативното спиране и оправдават инсталиране на управляеми инвертори от типа Sitras®PCI;
- Аналитичните разчети показват, че за разглежданите в доклада участъци (метростанция „Жолио Кюри” – метростанция „Стадион Васил Левски” и метростанция „Джеймс Баучер” – метростанция „Европейски съюз”) потенциалът за повишаване на оползотворяването на електроенергията получена при рекуперативното спиране е висок, като общо за двете станции той може бъде повишен с до 241 618,4 kWh годишно.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Българанов Л. **Електрически транспорт** – гр. София 2009г.
- [2] Иван Петров, Георги Димитров, Тодор Лалев; **Експериментално изследван на енергийната ефективност на метроваковете на Столичния метрополитен в реални експлоатационни условия–ТУ „София” VII научна кон. св.св. Константин и Елена, 2016г.**;
- [3] Daniel Cornic, **Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation** – Alstom Transport Electrical Systems, Railway and Ship Propulsion (OSCARS), 2010;
- [4] Meinert M., K. Rechenberg, G. Hein, A. Schmieder, **Energy efficient solutions for the complete railway system** - Siemens AG, Erlangen, Germany; in Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research, Seoul, 2008, pp. P1–P11;
- [5] **Sitras PCI / Product information No. A6Z00039742313** / Version 1.0.0 Siemens AG, Mobility Division, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 Munich, Germany. 2016;
- [6] Tomas Grief, Wolfgang Schmid, Alexander Schomburg, Rainer Weber, **Energy efficiency by inverter in d.c. traction power supply at Bayerische Zugspitzbahn**, 03. 2009;

## STUDIES OF POSSIBILITIES FOR EFFICIENT USE OF REGENERATIVE BRAKING IN DC TRACTION POWER SUPPLY

**Todor Lalev**

[todor.lalev@siemens.com](mailto:todor.lalev@siemens.com)

**SIEMENS EOOD, Sofia Kukush str. №2  
BULGARIA**

**Key words:** *regenerative braking, electrical vehicles, traction power supply*

**Abstract:** *All modern electrical vehicles are design and manufacture with the possibility to return energy in the traction network in brake recuperation mode. Nowadays the question how to realize the recuperative breaking is not relevant. The relevant question is how to increase the efficient of the recuperative braking. Therefore at this paper are presented the possibilities for increasing of efficient of the regenerative breaking at DC traction power supply.*