

ИЗСЛЕДВАНЕ РАЗХОДА НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ НА МЕТРОСЪСТАВИ SIEMENS INSPIRO SF В РЕАЛНИ ЕКСПЛОАТАЦИОННИ УСЛОВИЯ

Бойко Вълков
bobivalkov@abv.bg

**„Метрополитен” ЕАД,
1000 София, ул. „Княз Борис I” № 121
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: *Софийско метро, метровакове Siemens Inspiro SF, енергийно потребление.*

Резюме: *Софийското метро е основна транспортна артерия на общественя градски транспорт. Третият метродиаметър (Линия 3) е изграден е с изцяло нова технология за тягово електрозахранване (въздушна контактна система с напрежение 1500 VDC) и телекомуникационна система за управление на влаковото движение (CBTC), осигуряваща напълно автоматичен режим на работа на влаковете. Линия 3 на метрото се обслужва с нов високотехнологичен подвижен състав - метровакове Siemens Inspiro SF, които са специално произведени за Софийското метро. Тези влакове са тривагонни и представляват един неделим съчленен метросъстав.*

В настоящата разработка са представени резултати от проведено изследване върху параметрите на енергийно потребление на метровакове Siemens Inspiro SF в реални експлоатационни условия по Линия 3 на Софийския метрополитен. Получените по експериментален път данни за енергийното потребление са аналитично обработени и са представени в табличен вид. Въз основа на получените резултати е проведен анализ на енергийните показатели на метроваковете Siemens Inspiro SF и са формулирани съответни изводи.

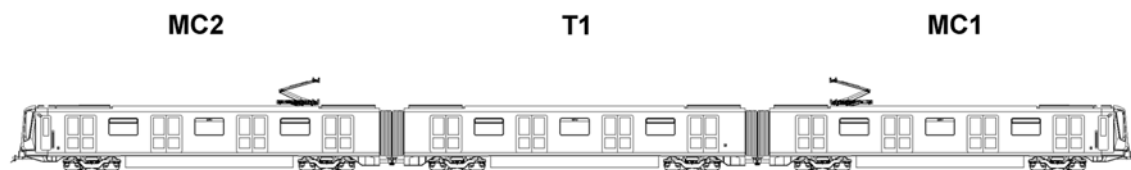
ВЪВЕДЕНИЕ

Третият метродиаметър на Софийското метро се обслужва с нов подвижен състав – метровакове модел Siemens Inspiro SF. В тях са интегрирани най-модерни технологии по отношение на тяговото асинхронно електрозадвижване, спомагателното електрообзавеждане и са използвани конструктивни материали, водещи до намаляване на теглото им. Този модел метровакове са неделими подвижни единици, съставени от два моторни челни вагона (MC) и един междинен немоторен вагон (T) – фиг. 1 [1].

Метроваковете Siemens Inspiro SF, са конструирани за напълно автоматично управление на влака от „Система за телекомуникационно управление на влаковото движение” (CBTC), изградена за Линия 3 на Софийското метро.

Към настоящия момент са проведени редица изследвания върху разхода на енергия на метроваковете на Софийското метро [2, 3], като настоящото изследване има

за цел да установи и анализира разхода на енергия на влаковете Siemens Inspiro SF в реални експлоатационни условия.



Фиг. 1. Разположение на вагоните в метровлакове Siemens Inspiro

РЕЖИМИ НА РАБОТА НА МЕТРОВЛАКОВЕ SIEMENS INSPIRO SF

Режимите на работа на метровлака определят активираните бордни функции и вида на контрола върху работата на влака (например автоматичен, ръчен). Различните нужди при работа се управляват от различните режими на работа. Режимите на работа зависят от специфичната експлоатационна обстановка. Смяната на режима на работа се инициализира от бордната подсистема на базата на ситуацията от пътя чрез извикване на маршрут или изход от депо.

Всички контролни функции се изпълняват и следят от Централния блок за управление (CCU).

Работни режими и нива на АТС

АТС има следните три основни режима на работа, посочени във възходящ йерархичен ред:

AM Автоматичен режим	▪ Автоматично управление (АТО) ▪ Потегляне чрез стартовия бутон на АТ ▪ Пълен контрол от АТР
SM Контролиран режим	▪ Ръчно управление ▪ Пълен контрол от АТР
RM Ограничен режим	▪ Ръчно управление ▪ Контрол на скоростта при RM ▪ Машинистът на влака е отговорен



Фиг. 2. Йерархия и връзки между основните режими на работа на метровлакове Siemens Inspiro

Режими на движение на метровлаковете под СВТС

СВТС осигурява следните режими на движение:

♦ Автоматичен режим

- Автоматично управление до достигане на линейна скорост с пълна АТР защита, с машинист в кабината, управляващ ръчно отварянето и затварянето на вратите.
- Индикаторната лампа "АТО Старт" трябва да мига преди да натиснете бутона "АТО Старт". За потегляне, машинистът натиска бутон "АТО Старт" за задействане функцията на "АТО Старт". След активирането на "АТО Старт", СВТС-АТО генерира команди за тягата, спирането и референтните стойности.
- СВТС ограничава максималната скорост.
- Ако е необходимо машинистът може да отмени командите на СВТС-АТО и да превключи в контролиран ръчен режим чрез превключване на главния контролер от вертикална позиция в позиция тяга, спиране или аварийна спирачка.

♦ Контролиран ръчен режим

- Ръчно управление до достигане на линейната скорост с пълна АТР защита, с машинист в кабината, управляващ отварянето и затварянето на вратите.
- ССУ ограничава максималната работна скорост, като е възможно движение с до 80 km/h.
- СВТС-АТР следи машиниста, който управлява скоростта на влака с ръчно задаване на тягата и спирането.
- АТР контролира ограниченията на скоростта, предавани от крайпътната СВТС система и задейства аварийната спирачка, ако моментната разрешена скорост е превишена.
- Взаимодействието със системата СВТС се осъществява през СВТС-НМІ.

♦ Ограничен ръчен режим

- Ръчно управление с ограничение на скоростта до 20 km/h, наложено от влаковото оборудване на АТР, т.е. движение в депо.
- СВТС-АТР контролира максималната скорост на влака и задейства аварийната спирачка, ако скоростта на влака надвишава прага на АТР за този режим.

Превключването между различните режими на управление на СВТС се осъществява от СВТС на базата на информацията от крайпътните съоръжения.

В зависимост от различните режими на управление на влака, се характеризират и определят и различни режими на движение и разход на енергия.

МЕТОДИКА ЗА ОБРАБОТКА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ДАННИ

За нуждите на настоящото изследване са използвани общоприети показатели за оценка разхода на електроенергия. Показателите, използвани за анализ на параметрите на електропотребление на метровлаковете SiemensInspiro SF и формулите по които те се определят, са следните [3]:

Нетен специфичен разход на енергия за ускоряване и тяга – e_{NTrac} , Wh/t.km

$$(1) \quad e_{NTrac} = \frac{1000 \cdot (E_{Trac} - E_{RB})}{m_{br} \cdot S}$$

където:

E_{Trac} е консумираната от тяговите инвертори електроенергия за даден период от време, kWh;

E_{RB} – върната в тяговата мрежа електроенергия през периода, за който е измерена консумираната от тяговите инвертори електроенергия, kWh;

m_{br} – брутна маса на метровлака, t;

s – пробег на метровлака през периода, за който са измерени електроенергиите, km.

Нетен относителен разход на енергия за ускоряване и тяга – e_{NTrac}^* , kWh/km

$$(2) \quad e_{NTrac}^* = \frac{E_{Trac} - E_{RB}}{s}$$

Относителен дял на върнатата в тяговата мрежа енергия при рекуперативно спиране – $E_{RB}\%$, % и относителен дял на общо генерираната енергия, при електродинамично /ED/ спиране – $ED\%$, %

$$(3) \quad E_{RB}\% = \frac{E_{RB}}{(E_{Trac} + E_{Aux})} \cdot 100$$

$$(4) \quad ED\% = \frac{E_{RB} + E_{BR}}{E_{Trac}} \cdot 100$$

където:

E_{Aux} е консумираната електроенергия от спомагателните инвертори през периода, за който са проведени измерванията на електроенергиите, kWh;

E_{BR} – отделена в спирачните резистори електроенергия през периода, за който са проведени измерванията на електроенергиите, kWh.

Общ специфичен разход на енергия на влака – e_{Veh} , Wh/t.km.

$$(5) \quad e_{Veh} = \frac{(E_{Trac} - E_{RB}) + E_{Aux}}{m_{br} \cdot s}$$

Общ относителен разход на енергия на влака – e_{Veh}^* , kWh/km.

$$(6) \quad e_{Veh}^* = \frac{(E_{Trac} - E_{RB}) + E_{Aux}}{s}$$

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА ЗА РАЗХОДА НА ЕНЕРГИЯ

Енергийното потребление при метровлакове Siemens Inspiro SF се отчита чрез системата за железопътна автоматизация на фирма Siemens – SIBAS 32, която осигурява диференцирано измерване на енергиите на отделните функционални групи потребители – отделно за тягово електрозадвижване (тяговите инвертори) и собствени нужди /CH/ и спомагателни системи (спомагателните инвертори). От своя страна за тяговите инвертори разделно се измерват консумираната, генерираната при електродинамично спиране и погасената в спирачния резистор енергии. Отделно се измерват и енергиите за захранване на променливотоковите и постояннотоковите спомагателни системи.

Резултатите от измерванията, проведени за два метровлака Siemens Inspiro SF, като изчислените енергийни показатели са показани в таблица 1.

За сравнение в таблица 2 са показани и изчислените енергийни показатели при проведеното изследване за енергийното потребление на този модел влакове по време на предпусковите тестове на Линия 3 [3].

ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ПРОВЕДЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Събраните по експериментален път енергийни данни за изследваните метровлакове Siemens Inspiro SF в реални експлоатационни условия и получените резултати след тяхната аналитична обработка позволяват да се направят следните изводи:

Таблица 1

Данни от енергийните измервания и реализираните показатели от метровлакове Siemens Inspiro SF при движение в реални експлоатационни условия

Верига	Вид на енергията и енергийните показатели	Мярка	Вагони MC1	Вагони T1	Вагони MC2	Общо
Тягови инвертори	Консумирана енергия за тяга, E_{Trac}	kWh	261671	-	259808	521479
	Върната в тяговата мрежа енергия, E_{RB}	kWh	112020	-	110381	222401
	Енергия в спирачните резистори, E_{BR}	kWh	27701	-	29511	57212
	Отн. дял на ED спирачна енергия	%	53,40	-	53,84	53,62
	Нетно консумирана енергия за ускорение и тяга на влаковете	kWh	149651	-	149427	299078
Спомагателни инвертори	Енергия, отдадена за захранване на променливотоковите потребители	kWh	-	174696	-	
	Енергия, за захранване потребителите на постоянен ток и заряд на АБ	kWh	-	65353	-	
	Общо консумирана енергия за СН и от спомагателни системи, E_{Aux}	kWh	-	240049	-	240049
Общ разход на енергия, $(E_{Trac} - E_{RB} + E_{Aux})$		kWh	539127			
Относителен дял на върната в тяговата мрежа енергия в общия разход на енергия, $E_{RB}\%$		%	29,20			
Общ пробег на изследваните метровлакове		km	171248			
Средна брутна маса на метровлака		t	95			
Общ специфичен разход на енергия на влака, e_{Veh}		Wh/t.km	33,31			
Общ относителен разход на енергия на влака, e_{Veh}^*		kWh/km	3,15			

Таблица 2

Данни от енергийните измервания и реализираните показатели от празни метровлакове Siemens Inspiro SF по време на пътни тестове с изпълнение на график за движение

Експлоатационни параметри и енергийни показатели	Мярка	Стойност
Общ разход на енергия, $(E_{Trac} - E_{RB} + E_{Aux})$	kWh	8256
Относителен дял на върната в тяговата мрежа енергия в общия разход на енергия, $E_{RB}\%$	%	18,62
Общ пробег на изследваните метровлакове	km	1545
Средна брутна маса на празен метровлак	t	87
Общ специфичен разход на енергия на влака, e_{Veh}	Wh/t.km	61,42
Общ относителен разход на енергия на влака, e_{Veh}^*	kWh/km	5,344

- Общият специфичен разход на енергия в реални експлоатационни условия е около 33,3÷34,0 Wh/t.km, който е с около 25% по-нисък от този на влаковете по Линии 1 и 2 [2].

- Общият относителен разход на енергия на влаковете Siemens Inspiro SF при движение в реални експлоатационни условия е около 3,15÷3,20 kWh/km. Той е около 2 пъти по-нисък от този на влаковете модели 81-740.2/741.2 и 81-740.2Б/741.2Б [2] и се дължи на по-малката експлоатационна маса и оптимизирания софтуер за управление.

- Относителния дял на енергията генерирана при електродинамично спиране $ED\%$ е около 53-54% от консумираната от тяговия инвертор енергия, което показва висока ефективност на електрическото спиране при метровлаковете Siemens Inspiro SF.

- Относителният дял на върнатата в тяговата мрежа електрическа енергия при режим на рекуперативно спиране $E_{RB}\%$ е около 29%, който е с около 15% по-висок в сравнение с други изследвани метровлакове [2] и най-вероятно се дължи на софтуера за автоматично управление движението на влаковете.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното експериментално изследване дава възможност да се направи реална оценка на енергийната ефективност на експлоатираните от „Метрополитен“ ЕАД метровлакове Siemens Inspiro SF по Линия 3 на метрото в град София.

От извършените измервания и след направени изчисления се установява, че след многократното обновяване на софтуера за управление на влаковото движение и този на влаковете Siemens Inspiro SF, експлоатационният разход на енергията в режим АМ и задействан икономичен режим на метросъставите е намалял с около 20%-25% спрямо този в началните месеци след пускане в експлоатация на Линия 3 (2020-2021 г.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Академия за подвижен състав. Обучение за Софийски метрополитен, Обучение за машинисти, Модул ОР2, Siemens AG 2018, София, 2019 г.
- [2] Петров И., Г. Димитров, Т. Лалев, Експериментално изследване на енергийната ефективност на метровлаковете на столичния метрополитен в реални експлоатационни условия, ТУ - София, Електротехнически факултет, VIII Научна конференция „ЕФ 2016“, 12-15 септември 2016, к.к. „Св. св. Константин и Елена“, Варна, България, Годишник на Технически университет - София, том 67, книга 1, 2017 г., ISSN 1311-0829
- [3] Димитров Г. Изследване параметрите на енергийно потребление на метровлакове модел Siemens Inspiro SF по време на пътни тестове, Научно списание „Механика, транспорт, комуникации“, том 18, бр. 3/2, стр. X-52, 2020 г., ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), статия № 2033, <https://mtc-aj.com/library/2033.pdf>

A STUDY OF ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION OF SIEMENS INSPIRO SF METRO TRAINS IN REAL OPERATING CONDITIONS

Boyko Valkov

bobivalkov@abv.bg

**„Metropoliten“ JSC, 1000 Sofia, 121 Knyaz Boris I Str.
THE REPUBLIC OF BULGARIA**

Key words: Sofia metro, Siemens Inspiro SF metro trains, Energy consumption.

Abstract: The Sofia Metro is the main transport artery of public urban transport. The third metro diameter (Line 3) was built with a completely new technology for traction power supply (overhead contact system with a voltage of 1500 VDC) and a telecommunication system for train traffic control (Communication-Based Train Control - CBTC), ensuring a fully automatic mode of operation of trains. Line 3 of the metro is serviced with new high-tech rolling stock - Siemens Inspiro SF metro trains, which are especially manufactured for the Sofia metro. These trains are three-carriage and represent one indivisible articulated subway train.

The paper presents the results of a study conducted on the energy consumption parameters of Siemens Inspiro SF metro trains in real operating conditions on Line 3 of the Sofia Metro. The experimentally obtained data on energy consumption are analytically processed and presented in tabular form. Based on the obtained results, an analysis of the main energy indicators of Siemens Inspiro SF metro was carried out and relevant conclusions were formulated.