



ИЗСЛЕДВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА ЕНЕРГИЙНО ПОТРЕБЛЕНИЕ НА МЕТРОВЛАКОВЕ МОДЕЛ SIEMENS INSPIRO SF ПО ВРЕМЕ НА ПЪТНИ ТЕСТОВЕ

Георги Димитров

dimitrov_gd@mail.bg, gdimitrov@vtu.bg

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

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

Резюме: *Софийското метро е най-важната транспортна артерия на обществения масов градски транспорт. През 2016 г. стартира строителството на третия метродиаметър (Линия 3) на метрото в гр. София, който се изгражда с изцяло нова технология за тягово електрозахранване и система за управление на движението на метровлаковете. Линия 3 на метрото ще се обслужва с нов високотехнологичен подвижен състав – метровлакове Siemens Inspiro SF, които са специално произведени за Софийското метро.*

В настоящата разработка са представени резултати от проведено изследване върху параметрите на енергийно потребление на метровлакове Siemens Inspiro SF по време на пътни тестове 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 метровлаковете Siemens Inspiro SF при различни пътни тестови изпитания, като са формулирани конкретни изводи.

ВЪВЕДЕНИЕ

Софийският метрополитен е най-важната транспортна артерия на обществения масов градски транспорт. През 2016 г. стартира строителството на третия диаметър (Линия 3) на метрото в гр. София, изграждан с изцяло нова технология по отношение тяговото електрозахранване (въздушна контактна система с напрежение 1500 VDC) и системата за управление движението на метровлаковете (автоматично, чрез безжична телекомуникация). В края на месец август 2020 г. е въведен в експлоатация първият участък от Линия 3 – от ж.к. „Красно село” (кръстовище ул. „Житница” и бул. „Цар Борис III) до ж.к. „Хаджи Димитър” (началото на бул. „Владимир Вазов”), с експлоатационна дължина за превоз пътници 7,25 km и 8 метростанции.

Третият метродиаметър на Софийското метро ще се обслужва с нов подвижен състав – метровлакове модел **Siemens Inspiro SF**, в които са интегрирани най-модерни технологии по отношение на тяговото асинхронно електрозадвижване, спомагателното

електрообзавеждане (осветление и климатизация) и са използвани конструктивни материали, водещи до намаляване на теглото им.

В таблица 1 са показани основни технически характеристики на метровлакове модел **Siemens Inspiro SF** [1]. За сравнение са посочени и техническите характеристики на експлоатираните по Линии 1 и 2 на метрополитена, метровлакове „**Русич**” модел **81-740.2Б/741.2Б**, които са със сходно електрозадвижване и са оборудвани със система за вентилация, климатизация и отопление /СВКО/ [2].

Таблица 1

Основни технически характеристики на метровлакове **Siemens Inspiro** и „**Русич**”

№	Параметър	Модел метровлакове	
		Siemens Inspiro SF	„Русич”
		Тривагонни	мод. 81-740.2Б/741.2Б
1	Конфигурация на влака	МС1-Т1-МС2*	ЧМ1-ММ1-ЧМ2**
2	Колоосна формула за влака	Во'Во'+2'2'+Во'Во'	Во'2'Во'+Во'2'Во'+Во'2'Во'
3	Дължина на метровлак включително автосцепката, mm	60008	83575
4	Система на електрозахранване	1500 VDC, пантограф	750 VDC, трета релса
5	Брой на моторните вагони	2	3
6	Брой на немоторните вагони	1	няма
7	Брой двигателни оси	8	12
8	Относителен дял на двигателните колооси, %	66,7	66,7
9	Номинална тягова мощност на метровлака, kW	1120	1920
10	Електрическа мощност на метровлака, kW (приблизит.)	~1400	~2300
11	Собствена маса на екипиран метровлак, t	86,4 ±4%	140
12	Места за сядане (общо за влака), бр.	110	134
13	Максимална вместимост при разчетна плътност 6 пътн./m ² свободно подово пространство заедно със седящите пътници, бр.	617	853
14	Пълна маса на влака: всички седалки заети + правосъстоящи при плътност 6 пътн./m ² (80 kg/пътн.), t	135,7	208,2
15	Максимална скорост, km/h		
	- при експлоатация - проектна скорост	80 90	80 90

*МС – моторен вагон с кабина за управление, Т – междинен (прикачен) немоторен вагон

**ЧМ – член моторен двусекционен вагон, ММ – междинен моторен двусекционен вагон

МЕТОДИКА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Метровлаковете **Siemens Inspiro SF** не са оборудвани със средства за измерване на консумираната и върнатата електрическа енергия в точката на токоснемане. Енергийното потребление при тези метровлакове 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 и за собствени нужди /СН/ и спомагателни системи. Енергийните данни се съхраняват в паметта на бордовия компютър, които с помощта на специализиран софтуер на фирма Siemens могат да бъдат прочитани и съхранявани на външен информационен носител.

Тъй като до момента не са предоставени подробни електрически схеми на метровлаковете **Siemens Inspiro SF**, не е известно местоположението на токовите и напреженовите сензори, чрез които се измерват съответните електрически величини.

За определяне на енергийните показатели, данните от енергийните измервания са вторично обработени, чрез използване на аналитични методи.

Показателите, използвани за анализ на параметрите на електропотребление на метровлаковете **SiemensInspiro SF**, и формулите по които те се определят са следните:

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

$$(1) \quad e_{N Trac} = \frac{1000.(E_{Trac} - E_{RB})}{m_{br} \cdot s}$$

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 – $e_{N Trac}^*$, kWh/km

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

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.

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

Изследването е проведено през периода май-юли 2020 г. по време на следните два вида пътни тестове:

♦ **Пътни тестове за настройка системите на влаковете и тази за телеуправление на движението им** – проведени са в периода май-юни 2020 г. Влаковото движение е осъществявано без установен график за движение, основно в автоматичен режим, като по разпореждане управлението е поемано от машинист.

♦ **Пътни тестове с изпълнение на график за движение на влаковете** – проведени са през месец юли 2020 г., като при тях влаковете са се движили по непълнен (9:00÷20:30 часа) график за движение, включващ периоди на невърхови (8÷9 мин.) и върхови (4÷5 мин.) интервали между влаковете. Движението е осъществявано изцяло в автоматичен режим, а влакове са придвижвани за кратко ръчно само при откази.

Всички тестове са проведени при пътуване на празни метровлакове, като по време на провеждането им са правени многократни ъпдейти на софтуера за управление движението на влаковете с цел постигане оптимален и надежден режим на работа на системата.

Таблица 2

Данни от енергийните измервания и реализираните показатели от празни метровлакове Siemens Inspiro SF по време на пътни тестове за настройка системите на влаковете и тази за телеуправление на движението им

Верига на консуматор	Вид на енергията и енергийните показатели	Мярка	Вагони МС1	Вагони Т1	Вагони МС2	Общо
Тягови инвертори	Консумирана енергия за тяга, E_{Trac}	kWh	17063	-	17008	34071
	Върната в тяговата мрежа енергия, E_{RB}	kWh	4089	-	4745	8834
	Енергия в спирачните резистори, E_{BR}	kWh	4745	-	4205	8950
	Относит. дял на ED спирачна енергия	%	51,77	-	52,62	52,20
	Нетно консумирана енергия за ускорение и тяга на влаковете	kWh	12974	-	12263	25237
Спомагателни инвертори	Енергия, отдадена за захранване на променливотоковите потребители	kWh	-	7802	-	7802
	Енергия, за захранване потребителите на постоянен ток и заряд на АБ	kWh	-	2230	-	2230
	Общо консумирана енергия за СН и от спомагателни системи, E_{Aux}	kWh	-	10032	-	10032
Общ нетен разход на енергия, $(E_{Trac} - E_{RB} + E_{Aux})$		kWh	35269			
Относителен дял на върната в тяговата мрежа енергия в общия разход на енергия, $E_{RB}\%$		%	20,03			
Общ пробег на изследваните метровлакове		km	6703			
Средна брутна маса на празен метровлак		t	87			
Изчислени енергийни показатели	Нетен специфич. разход за ускорение и тяга (без СН и спомагат. системи)	Wh/t.km	43,28			
	Общ специфичен разход на енергия на влака, e_{Veh}	Wh/t.km	60,48			
	Нетен относит. разход за ускорение и тяга (без СН и спомагат. системи)	kWh/km	3,765			
	Общ относителен разход на енергия на влака, e_{Veh}^*	kWh/km	5,262			

Заб. Междинните (прикачените) вагони Т1 са немоторни и за тях не се отчита разход на енергия за тяга, а само разход на енергия за собствени нужди и спомагателни системи, тъй като спомагателните инвертори са монтирани на тях.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Резултатите от измерванията за разхода на енергия на метровлаковете **Siemens Inspiro SF**, реализиран при различните пътни тестове, както и изчислените стойности на енергийните показатели са показани в таблици 2 и 3.

Таблица 3

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

Верига на консуматор	Вид на енергията и енергийните показатели	Мярка	Вагони МС1	Вагони Т1	Вагони МС2	Общо
Тягови инвертори	Консумирана енергия за тяга, E_{Trac}	kWh	4171	-	4106	8277
	Върната в тяговата мрежа енергия, E_{RB}	kWh	777	-	1112	1889
	Енергия в спирачните резистори, E_{BR}	kWh	1399	-	1082	2481
	Относит. дял на ED спирачна енергия	%	52,17	-	53,44	52,81
	Нетно консумирана енергия за ускорение и тяга на влаковете	kWh	3394	-	2994	6388
Спомагателни инвертори	Енергия, отдадена за захранване на променливотоковите потребители	kWh	-	1335	-	1335
	Енергия, за захранване потребителите на постоянен ток и заряд на АБ	kWh	-	533	-	533
	Общо консумирана енергия за СН и от спомагателни системи, E_{Aux}	kWh	-	1868	-	1868
Общ нетен 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			
Изчислени енергийни показатели	Нетен специфич. разход за ускорение и тяга (без СН и спомагат. системи)	Wh/t.km	47,52			
	Общ специфичен разход на енергия на влака, e_{Veh}	Wh/t.km	61,42			
	Нетен относит. разход за ускорение и тяга (без СН и спомагат. системи)	kWh/km	4,135			
	Общ относителен разход на енергия на влака, e_{Veh}^*	kWh/km	5,344			

ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ПРОВЕДЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

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

- Общият специфичен разход на енергия при движение на празни метровлакове в график е около $61 \div 62$ Wh/t.km (виж табл. 3).
- Общият относителен разход на енергия при движение на празни метровлакове в график е около $5,3 \div 5,4$ kWh/km (виж табл. 3).
- Разходът на енергия за климатизация на празните метровлакове е сравнително висок за условията, при които са провеждани тестовете ($25 \div 28$ kWh/h), като вероятно се дължи на извършвани допълнителни настройки на климатичните системи в депо.
- Относителния дял на общата спирачна енергия при електродинамично спиране $ED\%$ е около 52-53% от консумираната енергия за ускоряване и тяга, което показва висока ефективност на електрическото спиране при метровлаковете Siemens Inspiro SF, режим който практически се използва за спиране на влака до скорост 0 km/h.
- Относителният дял на върнатата в тяговата мрежа електрическа енергия при режим на рекуперативно спиране $E_{RB}\%$ е около 19-20%, който е сравнително нисък в сравнение с други изследвани метровлакове [3], и най-вероятно се дължи на малката обща дължина на метроучастъка ($\sim 7,6$ km), изпълнявания график за движение с малко на брой влакове, както и отчасти на софтуера за управление движението на влаковете.

Получените резултати от изследването не позволяват да се направи сравнение между енергийните показатели на метровакове **Siemens Inspiro SF** и „Русич” модел **81-740.2Б/741.2Б**, тъй като измерванията са направени само в тестови условия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеното в доклада изследване върху параметрите на електропотребление от метроваковете **Siemens Inspiro SF** дава само първоначална представа за електроенергийното им потребление и реализираните от тях показатели за разход на енергия. За определяне действителните показатели за разход на енергия на метроваковете **Siemens Inspiro SF**, изследванията трябва да продължат след пускането в редовна експлоатация на Линия 3 на метрото и инсталиране на окончателни версии на влаковия софтуер и софтуера за управление движението на влаковете.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Академия за подвижен състав. Обучение за Софийски метрополитен, Обучение за машинисти, Модул ОР2, Siemens AG 2018, София, 2019 г.
- [2] Техническо описание на механичното оборудване на вагони серия 81-740, 81-741, „Метрополитен” ЕАД, София, 2016 г.
- [3] Петров И., Г. Димитров, Т. Лалев, Експериментално изследване на енергийната ефективност на метроваковете 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.

RESEARCH OF THE PARAMETERS OF ENERGY CONSUMPTION OF METRO TRAINS MODEL SIEMENS INSPIRO SF DURING ROAD TESTS

Georgi Dimitrov

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

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

Abstract: *The Sofia metro is the most important transport artery of public urban transport. In 2016 the construction of the third metro diameter (Line 3) of the metro in Sofia started, which is built with a completely new technology for traction power supply (overhead contact system with voltage 1500 VDC) and system for controlling the movement of metro trains (automatic, by wireless telecommunication). Line 3 of the metro will be serviced with new high-tech rolling stock - Siemens Inspiro SF metro trains, which are specially manufactured for the Sofia metro.*

The study presents the results of a research on the energy consumption parameters of Siemens Inspiro SF metro trains during road tests 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 trains, realized in various road tests, was carried out, and specific conclusions were formulated.