



ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗХОДА НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ ОТ МЕТРОВЛАКОВЕТЕ НА СТОЛИЧНИЯ МЕТРОПОЛИТЕН В РЕАЛНИ ЕКСПЛОАТАЦИОННИ УСЛОВИЯ

Георги Димитров, Тодор Лалев
dimitrov_gd@mail.bg

*ВТУ “Тодор Каблешков”, гр. София, ул. “Гео Милев” № 158
ОФ “Метрополитен” ЕАД, гр. София, ул. “Княз Борис I” № 121
БЪЛГАРИЯ*

Резюме Столичния метрополитен е една от съвременните градски транспортни системи. Той се явява една от основните алтернативи за разрешаване на транспортния проблем на гражданите в двумилионния столичен град. В доклада са представени резултати от експериментално изследване за установяване на разхода на електрическа енергия от метровлаковете серия 81-717.4/81-714.4 и серия 81-740.2/81-741.2 в реални експлоатационни условия. Въз основа на получените резултати е направена оценка и анализ за разхода на електрическа енергия от влаковете на метрополитена. Определени са основните показатели за оценка на енергетичните параметри на метровагоните – специфичен разход на електроенергия за единица работа ($Wh/t.km$) и относителен разход на електроенергия за единица пробег (kWh/km). Направен е и кратък сравнителен енергетичен анализ с другите видове градски електрически транспорт (трамваи и тролейбуси).

Ключови думи: Влакове на метрополитена, Експлоатационен разход на електроенергия, Анализ на енергетичните показатели.

ВЪВЕДЕНИЕ

Метрополитена в град София е най-голямото строително, транспортно и екологично съоръжение, изградено през последните десетилетия в Република България.

Първият участък от първи метрорадиус с 5 метростанции /мс./ е въведен в търговска експлоатация с пътници през 1998 г. През периода 1999-2001 г. е въведен в търговска експлоатация още един участък с 2 метростанции – „Опълченска” и „Сердика”, а през пролетта на 2003 г. е въведен в експлоатация и участък от мс. „Сливница” до мс. „Обеля. С това приключва и първия етап от строителството на метрополитена, като общата дължина на линията на метрото достига 9,9 km.

През 2005 г. започва строителството на участъка от разширението на метрото от пл.

„Света Неделя” до Стадион „Васил Левски” с дължина 2,3 km и 2 метростанции, като паралелно започва и изграждането на трасето от Стадион „Васил Левски” до „Интерпред” с дължина 2,5 km и 1 метростанция.

С оглед осигуряване на връзка на повече източни жилищни комплекси като „Изгрев”, „Дървеница”, „Мусагеница” и ж.к. „Младост” с централната градска част, през 2006 г. започва строителството и на участъка „Интерпред” - ж.к. Младост 1 с дължина 3,2 km и още 3 метростанции, като от месец април 2009 г. е въведен в редовна експлоатация участък от Стадион „Васил Левски” до „Младост 1”, а през месец септември 2009 г. се очаква да бъде пуснат в експлоатация втори метрорадиус в цялата си дължина – от пл. „Света Неделя” до ж.к.

„Младост 1” с обща дължина на трасето 8 km и 6 метростанции.

Основните технически показатели на експлоатираните участъци от първи метродиаметър са [1, 4]:

- средно разстояние между станциите – 1100 m за първи метрорадиус и 1600 m за втори метрорадиус;

- максимална експлоатационна скорост – 80 km/h;

- средна скорост – 41 km/h за първи метрорадиус и 47,5 km/h за втори метрорадиус;

- максимална превозна способност – 50 хил. пътници в час в едно направление за всеки метрорадиус;

В ОФ „Метрополитен” ЕАД се експлоатират два типа метровагони производство на „Метровагонмаш” (до 1992 г. – „Мытищинский машиностроительный завод”) в Русия. Първия тип вагони от серия 81-717.4/714.4 са производство от края на 80-те години на миналият век и са с постояннотоково задвижване и контакторно-резисторно управление [3], а втория от серия 81-740.2/741.2 са производство 2006 и 2009 година. Тези вагони са с асинхронно задвижване и полупроводниково управление чрез инвертори, реализирани на базата на IGB транзистори. Влаковете от тази серия притежават и режим на електрическо рекуперативно спиране.

В доклада са представени резултатите от проведено експериментално изследване за електроенергийното потребление на влаковете на метрополитена в реални експлоатационни условия.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗМЕРВАНЕ НА РАЗХОДА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ ОТ МЕТРОВЛАКОВЕТЕ

Експлоатираните в столичния метрополитен влакове не са оборудвани от производителя с измерватели за електрическата енергия. За целите на експерименталното изследване в един метрвалак от всеки модел (серия) бяха монтирани специализирани измервателни средства – преобразуватели на постоянен ток и напрежение и комбиниран електромер (за постоянен и променлив ток), производство на фирма LEM [5, 6, 7].

Параметри на техническите средства за измерване разхода на електроенергия

Използваният в изследването електромер EM4T е предназначен за използване във всички съществуващи тягови мрежи (за постоянно напрежение от 600 V до 3000 V, за променливо напрежение 15 kV/16,7 Hz и 25 kV/50 Hz) [7]. Този модел електромер е конструиран да измерва енергията, както в променливотокови така и в постояннотокови електрически вериги, което позволява използването му в електрическите транспортни средства, които могат да бъдат захранвани от няколко системи.

Електромерът е изпитан и одобрен по всички стандарти съответстващи на различните системи за захранване на електрическия подвижен състав и стандарти за измерване на електрическата енергия.

Основните технически характеристики на използваният модел електромери са следните:

- Измервателен клас на точност: 0,2;

- Електрическо захранване: постоянно напрежение 24 V;

- 4 входни канала за измерване на енергия в постояннотокови и променливотокови вериги (за постоянно напрежение от 600 V до 3000 V, за променливо напрежение 15 kV/16 ⅔ Hz и 25 kV/50 Hz)

- Актуализиране информацията: за време от 1min до 1h

- Възможност за свързване към модем и сваляне на файл с информация във всеки един момент, независимо къде се намира електрически подвижен състав.

Методът, използван за измерване на електрическата енергия е индиректен, като електромерът е присъединен към силовата верига на метровагоните с помощта на първични преобразуватели за ток и напрежение.

В конкретния случай са използвани токов преобразувател тип LTC 500-SF и напреженов – LV 100, като и двата са производство на фирма LEM с клас на точност 0,2.

И двата първични преобразувателя, токовият – LTC 500-SF и напреженовият – LV 100, работят на принципа на ефекта на Хол [5, 6].

Сигналите подавани от тези датчици, освен във веригата за измерване на електрическата енергия, могат да се използват и за управление, контрол и защита във вериги за постоянен ток.

Трябва да се отбележи, че поради икономически и технически причини измервателните средства (електромер EM4T и датчици) са монтирани да измерват енергията само на

един вагон от съответния метровлак (главни вагони на метровлакове с №№ 1005 и 2003), а също така датата на монтаж в отделните влакове е с разлика от една година. Тъй като метровагоните в метровлакове от серия 81-740.2/741.2 са три, а при влакове от серия 81-717.4/714.4 – четири, и отчитайки обстоятелството, че отделните вагони в един влак имат еднотипно силово електрообзавеждане (еднакви инсталирани електрически мощности, еднакъв брой и тип тягови двигатели, приблизително една и съща маса) и режим на управление, може с достатъчна точност да се твърди, че общият експлоатационен разход на енергия за съответния влак може да се получи като показанията на електромера се умножат по 3, съответно по 4.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ

За провеждане на изследването бяха избрани два влака на метрополитена – по един от всяка серия, със служебни номера А22 и А11.

Изследваните метросъстави имат следните параметри:

1. Влак серия 81-740/741

Конфигурация на влак А22

2003(М1)+6002(М2)+2004(М3)

Маса влака (средно натоварен):

- Главен вагон 2005(М1): 68, 05 t
- Междинен вагон 6003(М2): 65,10 t
- Главен вагон 2006(М3): 68,05 t

ОБЩА МАСА: 201,20 t

2. Влак серия 81-717/714

Конфигурация на влак А11

1005(М1)+5005(М2)+5006(М3)+1006(М4)

Маса влака (средно натоварен):

- Главен вагон 1005(М1): 41,00 t
- Междинен вагон 5005(М2): 40,50 t
- Междинен вагон 5006(М3): 40,50 t
- Главен вагон 1006(М4): 41,00 t

ОБЩА МАСА: 163,00 t

Резултати от измерванията на електрическата енергия в реални експлоатационни условия

Данните за използваната и рекупериранията (върнатата в мрежата) електрическа енергия се записват във вътрешната памет на електромера. С помощта на специализиран софтуер данните от паметта на електромера се прочитат и записват като компютърен файл (електронна таблица). Трябва да се отбележи, че по време на експерименталните измервания рекуперативния режим на спиране при влаковете сер. 81.740/741 е изключен в експлоатационни условия, по предписание на ОФ „Метрополитен” ЕАД. Поради тази причина не са получени експериментални данни за възможното количеството върната в тяговата мрежа електрическа енергия по време на търговско движение.

Обобщените данни от периодичните контролни отчети на електрическа енергия, поотделно за двата изследвани влака, са показани в таблици 1 и 2.

Таблица 1

Контролни отчети за разхода на електрическа енергия на влак А22 – сер. 81.740/741

Месец	Относителен разход на енергия за целия влак kWh/km	Дата на отчитане	Час	Показание на километража, km	Показание на електромера, MWh	
					Регистър 1.08 Потребление	Регистър 2.08 Рекуперация
Начална дата		19.02.08*		164202 km	0,182	0,086
I		09.01.09	11:00 ч.	223697 km	178,286	0,204
II	9,2862	20.02.09	14:10 ч.	236398 km	217,600	-
III	9,1053	12.03.09	14:00 ч.	237739 km	221,670	-
IV						
V	9,1536	12.05.09	13:50 ч.	251916 km	264,927	0,254

* За нуждите на изследването са взети данни за електрическата енергия само за съпоставими периоди през 2009 г.

Таблица 2

Контролни отчети за разхода на електрическа енергия на влак А11 – сер. 81.717/714

Месец	Относителен разход на енергия за целия влак e^* , kWh/km	Дата на отчитане	Час	Показание на километража, km	Показание на електромера, MWh	
					Регистър 1.08 Потребление	Регистър 2.08 Рекуперация
	Начална дата	06.02.09		0	0,114	-
II	8,29	24.02.09	.	403,6	0,949	-
III						
IV						-
V	8,64	18.05.09	12:40 ч.	11576,6	25,073	-

Изчислителни параметри и формули за определяне на основните енергетични показатели на влаковете на метрополитена

Получените от измерванията данни за потреблението на не дават ясна представа за енергетичните показатели на двата модела влакове. Това налага експерименталните данни да бъдат обработени за целите на изследването.

Ще бъдат разгледани основните показатели, използвани при обработка и анализа на данните от изследването.

Определяне на относителния разход на електрическа енергия

Относителния разход на енергия от един метровлак представлява отношението на общата консумирана от тяговата мрежа, електрическа енергия и пробег на метровлака – e^* , kWh/km и се определя по формулата:

$$(1) \quad e^* = \frac{E}{S}$$

където E е отчетения по електромера разход на енергия за определен период от време, kWh;

S – пробег на влака за същия период от време, km.

Чрез формула (1) се отчита разхода на енергия за единица пробег. В практиката този показател е основен при планиране на необходимите количества трафична електрическа енергия.

Определяне на специфичния разход на електрическа енергия

Специфичният разход на енергия на един метровлак представлява отношението на

общата консумирана от тяговата мрежа, електрическа енергия и брутната превозна работа (брутотон-километър), извършена от подвижния състав – e , Wh/t.km. Той се определя по формулата:

$$(2) \quad e = \frac{E}{m_{\text{бруто}} \cdot S}$$

където $m_{\text{бруто}}$ е общата средна експлоатационна маса на влака, t.

Показателят, определен по формула (2), дава общата енергоемкост на транспортния процес. В практиката този показател служи за оценка на енергийната ефективност на превозите.

Определяне на разхода на електрическа енергия за единица полезна превозна работа

Под полезна превозна работа в пътническия транспорт се разбира броя на превозените пътници на определено разстояние (пътник-километър). Този показател представлява отношението на общата консумирана от тяговата мрежа, електрическа енергия и полезната превозна работа (пътник-километър), извършена от влака – e_p , Wh/пътн.km. Изчислява се по формулата:

$$(3) \quad e_p = \frac{E}{Pass \cdot S}$$

където $Pass$ е средният брой пътници в метро влак или транспортно средство на градския транспорт, бр.

Показателят, изчислен по формула (3) служи за оценка енергоемкостта на превоза на

един пътник и енергийната ефективност на полезната превозна работа.

КРАТЪК СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ ЗА РАЗХОДА НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ ПРИ РАЗЛИЧНИТЕ СЕРИИ МЕТРОВЛАКОВЕ

На база получените резултати от измерванията, по формули (1) и (2) са изчислени основните енергетични показатели за двете серии метровлакове. Резултатите са показани в таблица 3.

Получените резултати показват значително по-високата енергийна ефективност на метровлаковете с импулсно управление от тези с контакторно-резисторно управление. По-високият относителен разход на енергия при влаковете сер. 81-740/741 се дължи на по-голямата им обща маса.

За по-голяма пълнота на изследването е направено и сравнение и с транспортните средства на масовия градски електрически транспорт – трамваи и тролейбуси.

Според резултати от проведени изследвания за относителния разход на енергия, посочени в [2], средно единица тягов подвижен състав на градския електрически транспорт (тролейбуси или трамваи общо) в град София изразходва 2,99 kWh/km. Относителния разход при този вид транспорт е значително по-нисък от този при влаковете

на метрополитена, което е следствие на по-малката им обща маса и превозна способност.

Направена е и оценка на енергийната ефективност за превоза на един пътник. По експлоатационни данни средното запълване на едно транспортно средство на наземния градски електрически транспорт (средно денонощно натоварване за трамваи и тролейбуси в цялата маршрутна мрежа) в момента е 60-75 пътника. Същият показател за един метровлак е около 250-300 пътника.

Отчитайки реалната средна превозната способност на транспортните средства на градския електрически транспорт и метросъставите, по формула (3) е определен средният специфичен разход на енергия за единица полезна пътническа превозна работа. Резултатите са показани в таблица 4.

Получените резултати показват, че метровлаковете сер. 81-740/741 имат по-висок специфичен разход за единица полезна превозна работа от тези сер. 81-717/714, което се дължи на по-ниската плътност на пътниците (пътн./m²) в тези модели влакове, която е следствие от еднаквия пътнически поток.

Като цяло обаче, метровлаковете имат значително по-високата енергийна ефективност за единица полезна превозна работа спрямо тази извършена от наземния градски електрически транспорт.

Таблица 3

Стойности на енергетичните показатели за метровлаковете на «Метрополитен» ЕАД

Период	Пробег	Серия и маса на влака	Абсолютен разход на ел. енергия за целия влак, E, MWh	Специфичен разход на ел. енергия за целия влак, e, Wh/t.km	Относителен разход на енергия за целия влак, e*, kWh/km
февруари – май 2009 г.	11576,6 km	81-717/714 163,00 t	24,959	52,90	8,624
януари – май 2009 г.	28219,0 km	81-740/741 201,20 t	86,641	45,78	9,211

Таблица 4

Стойности на показателя e_p за метровлаковете и градския електрически транспорт

Период	Серия на състава	Пробег	Среден брой пътници във влак, бр.	Относителен разход на енергия за целия влак, e*, kWh/km	Специфичен разход на ел. енергия за пътн. работа e _p , Wh/пътн.km
февруари – май 2009 г.	81-717/714	11576,6 km	300	8,624	28,75
януари – май 2009 г.	81-740/741	28219,0 km	300	9,211	30,70
януари – май 2009 г.	Трамваи и тролейбуси	-	70	2,99	42,71

ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ

От направеният кратък анализ могат да се формулират следните изводи:

- Метровлаковете от серия 81-740/741 имат значително по нисък специфичен разход на енергия – e , Wh/t.km, което ги прави по-енергоефективни от метровлаковете серия 81-717/714;

- По показателя енергоемкост за единица полезна превозна работа, метровлаковете от серия 81-717/714 са енергийно по-ефективни;

- Независимо от по-високата си енергоемкост, трамваите и тролейбусите имат своето място транспортната схема на столичния град, поради по малките инвестиции за изграждане на транспортните маршрути.

На база на формулираните изводи може да се препоръча на специалистите от експлоатацията във фирма „Метрополитен“ ЕАД да оптимизират графика за оборота на влаковете, като в часовете на пиков пътничкопоток се движат преимуществено влакове с импулсно управление от серия 81-740/741, а в останалите часове остават да се движат влакове от серия 81-717/714.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Братоев Ст., Софийски метрополитен, „Нота бене“ ЕООД, София, 2004 г.
- [2] Миленов И. К., Г. М. Павлов, Възможности за повишаване на енергийната ефективност на градския електрически транспорт чрез оптимизиране на тягови електрозадвижвания, Семинар на НДЕТ, „Електроенергетика и електрообзавеждане на транспорта” – Сборник доклади, София, 2002 г.
- [3] Милошев В., К. Кръстев, Фирма „Метрополитен” направление „Подвижен състав”, Електрически машини използвани в метровагони тип 81-717.4 и 81-714.4, София, април 1994 г.
- [4] Официална интернет страница на ОФ „Метрополитен” ЕАД, София, http://www.metropolitan.bg/index_bg.html
- [5] LEM – “Isolated Current and Voltage Transducers, Characteristics – Applications – Calculations”.
- [6] LEM – “Current and Voltage Transducers for Railway applications”, LEM solutions for traction electrical measurements”.
- [7] LEM – “EM4T Energy Meter for Traction usable on each network”, “ENERGY MEASUREMENT FOR ON-BOARD APPLICATIONS”.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF ELECTRICITY POWER CONSUMPTION FROM TRAINS OF SUBWAY (METROPOLITAN) IN SOFIA IN REAL EXPLOITATION CONDITIONS

Georgi Dimitrov, Todor Lalev
dimitrov_gd@mail.bg

*Higher School of Transport “Todor Kableshkov”, 158, “Geo Milev” str., Sofia
“Metropolitan” JSC, 121, “Kniaz Boris I” str., Sofia
BULGARIA*

Keywords: *Subway trains, Energy consumption, Comparative analysis*

Abstract: *The subway (metropolitan) in Sofia is a modern urban transport systems. He is one of the main alternatives for solving the transport problem of citizens in capital city.*

The paper present the results of experimental studies to establish the electricity power consumptions from metro trains model 81-717.4/81-714.4 and model 81-740.2/81-741.2 in real exploitation conditions. Based on the results is estimated the power consumption of two model metro trains. Defined are the main indicators for assessing energy parameters of metro trains. In article is presented and a brief comparative analysis between the two model trains and other vehicles of urban electric transport (trams and trolleybuses).