



## **ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ТРАНСПОРТНАТА УСЛУГА ПО ЛИНИИ 1 И 2 НА СОФИЙСКОТО МЕТРО**

**Георги Димитров**

dimitrov\_gd@mail.bg, gdimitrov@vtu.bg

**Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“  
София, ул. „Гео Милев № 158  
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ**

***Ключови думи:** Софийско метро, Структура на енергийното потребление, Енергийна ефективност на транспортната услуга.*

***Резюме:** В настоящата разработка са представени резултати от проведено изследване върху разхода на електрическа енергия и електроенергийната ефективност на транспортната услуга, предоставяна от „Метрополитен“ ЕАД по линии 1 и 2 на метрото в гр. София. Измерванията на електропотреблението са проведени разделно, с цел по-детайлно анализиране влиянието на различните потребители върху общата енергийна ефективност. Данните за електроенергийното потребление на отделните обособени групи потребители са аналитично обработени с използването на, специално разработена за целите на изследването, система от показатели за оценка на електроенергийната ефективност. Резултатите са представени под формата на таблици и графики. Извършен е анализ на енергийните показатели и са формулирани конкретни изводи.*

### **ВЪВЕДЕНИЕ**

Софийският метрополитен заема важно място в транспортната схема на столичния град. За цялостното функциониране на Софийското метро, се изразходва електрическа енергия за различни нужди. В електрическия транспорт и в частност в метрополитена, общият разход на електроенергия е прието да се подразделя на такъв за тягови и нетягови нужди. Целта на настоящото изследване е да се оцени и анализира електроенергийната ефективност на транспортната услуга, предоставяна от превозвача „Метрополитен“ ЕАД, по Линии 1 и 2 на метрото в гр. София.

### **АНАЛИЗ НА СТРУКТУРАТА НА ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ**

За провеждане на детайлен енергиен анализ и изследване енергийната ефективност на транспортната услуга, предоставяна от „Метрополитен“ ЕАД по Линии 1 и 2 на Софийското метро, е необходимо да се познава специфичната структура на електропотребление. В структурно отношение, електропотреблението в метрото се разделя на тягово и нетягово. От своя страна нетяговата енергия може допълнително да се раздели между две функционално обособени групи потребители: на такава за технически нужди и на енергия за административно-управленски сгради. Последното е възможно, тъй като в захранващите станции на метрото (ТПС и ПС) са инсталирани

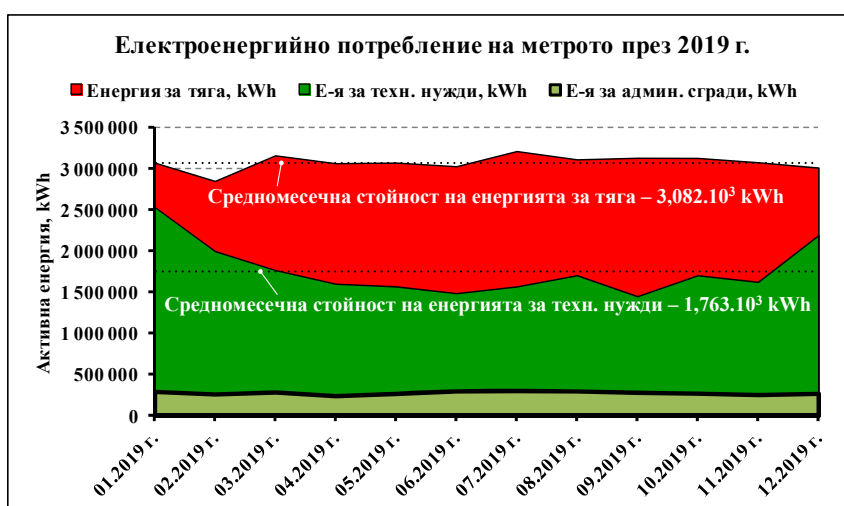
средства за контролно измерване на електрическата енергия, което се извършва на страна средно напрежение 10 kV. Измерването на енергията става диференцирано – отделно за тяговите агрегати, захранващи контактната система, и за трансформаторите за собствени нужди /СН/, захранващи потребителите в метростанциите и съоръженията в междустанционните участъци. От своя страна депо „Обеля” и сградите с административно-управленско предназначение имат отделно измерване на енергията.

В таблица 1 са показани данни за електропотреблението на Софийското метро през всеки от месеците на 2019 г., общо и по отделни групи потребители.

Таблица 1

Данни за електропотреблението по отделни групи потребители на Софийското метро през 2019 г.

Месец, година	Общо енергия на страна Ср.Н, $E_{MVS}$	Енергия за тягови нужди, $E_{MVT}$	Общо енергия за нетягови нужди	Енергия за технич. нужди, $E_{MV Tech}$	Енергия за админ. сгради, $E_{MV Admin}$
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
01.2019 г.	5 898 314	3 077 859	2 820 455	2 529 741	290 714
02.2019 г.	5 106 018	2 853 303	2 252 715	1 993 521	259 194
03.2019 г.	5 213 201	3 165 856	2 047 345	1 763 884	283 461
04.2019 г.	4 907 992	3 070 714	1 837 278	1 598 083	239 195
05.2019 г.	4 910 088	3 078 239	1 831 849	1 566 120	265 729
06.2019 г.	4 812 509	3 032 338	1 780 171	1 484 010	296 161
07.2019 г.	5 083 373	3 217 609	1 865 764	1 564 565	301 199
08.2019 г.	5 116 079	3 117 307	1 998 772	1 701 469	297 303
09.2019 г.	4 861 939	3 136 235	1 725 704	1 446 917	278 787
10.2019 г.	5 104 957	3 134 725	1 970 232	1 700 834	269 398
11.2019 г.	4 954 711	3 081 244	1 873 467	1 620 352	253 115
12.2019 г.	5 470 125	3 016 430	2 453 695	2 186 121	267 574
<b>ОБЩО '19</b>	<b>61 439 306</b>	<b>36 981 859</b>	<b>24 457 447</b>	<b>21 155 616</b>	<b>3 301 831</b>
<b>ОБЩО '11</b>	<b>30 126 966</b>	<b>16 489 040</b>	<b>13 637 926</b>	<b>10 580 675</b>	<b>3 057 251</b>



Фиг. 1. Диаграма на потреблението на електроенергия на основните групи потребители

На фиг. 1 графично е показана месечната динамика в електропотреблението на основните групи потребители през 2019 г.

От данните в таблица 1 могат да се направят следните заключения:

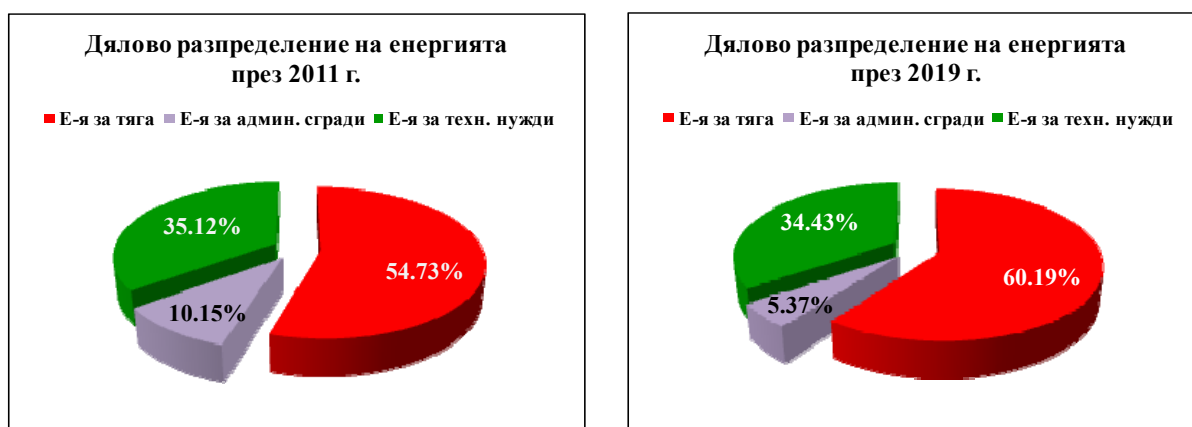
- Разходът на енергия за тягови нужди през отделните месеци се колебае в относително тесни граници – около  $\pm 5\%$  спрямо средномесечната му стойност, което

основно се дължи на различния брой дни в месеците, при неизменен през годината делничен и празничен график за движение на влаковете;

- През годината разходът на енергия за технически нужди (потребители в метростанциите, междустанционните участъци и депо „Обеля“) се променя в широки граници, като има ясно изразен ръст през зимните месеци, дължащ се на повишената консумация на електроенергия за отопление в метростанциите. Неговото повишаване през някои летни месеци най-вероятно е следствие на по-продължителна работа на тунелните и станционните вентилационни системи;

- Разходът на енергия на административно-управленските сгради се колебае в границите  $\pm 10\div 12\%$  спрямо средномесечния. Повишен разход на електроенергия се наблюдава през зимните и особено през горещите летни месеци, следствие работата на множество климатични системи, инсталирани в стаите на административния персонал.

На фиг. 2 са показани диаграми на дяловото разпределение на електроенергията между тези потребители през 2011 г. [1] (преди пускане в експлоатация на Линия 2) и през 2019 г. От диаграмите на фиг. 2 се вижда, че основен дял в електропотреблението има този за тягови нужди. С удължаването на метромрежата и увеличаване броя на тягово-понижителните станции, делът му спрямо 2011 г. нараства с около 5%, което почти изцяло е за сметка на намаляване делът на енергията за административно-управленски сгради. От своя страна относителния дял на разхода на електроенергия за технически нужди почти не се променя, тъй като той почти линейно зависи от дължината на метролиниите.



Фиг. 2. Диаграми на дяловото разпределение на енергията между основните групи потребители

### МЕТОДИКА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Данните за електроенергийното потребление на отделните обособени групи потребители са аналитично обработени, с използването на специално разработена за целите на изследването система от показатели за оценка на енергийната ефективност на влаковата транспортна дейност, дефинирани за единица пробег на метротяговете.

❖ **Относителен общ разход на енергия за движение на метротяговете –  $e_{MVS}^*$ , kWh/km.**

Показателят се изчислява по формулата:

$$(1) \quad e_{MVS}^* = \frac{E_{MVS}}{\sum_{i=1}^m s_i}$$

където:

$E_{MVS}$  е общият разход на електроенергия на всички потребители в метрото измерен на страна Ср.Н. във всички захранващи станции на метрото (ТПС и ПС) за определен период от време (обичайно един месец), kWh;

$m$  – брой на метровлаковете, движени се през периода;

$s_i$  – пробег на  $i$ -тия метровлак през периода, за който е измерен общият разход на електроенергия, km.

Показателят изчислен по формула (1) отчита общия относителен разход на електрическа енергия за единица пробег на метровлаковете. За извършване на детайлен енергиен анализ, отчитащ поотделно влиянието на тяговите и групирани по функционално предназначение нетягови потребители, се използват следващите показатели.

❖ **Относителен брутен разход на тягова енергия за движение на метровлаковете –  $e_{MVT}^*$ , kWh/km.**

Този показател се определя с използване на следната формула:

$$(2) \quad e_{MVT}^* = \frac{E_{MVT}}{\sum_{i=1}^m s_i}$$

където:

$E_{MVT}$  е измереният на страна Ср.Н. общ разход на електроенергия на всички тягови агрегати за определен период от време (обичайно един месец), kWh.

❖ **Приведен към движението на метровлаковете относителен разход на енергия за технически нужди –  $e_{MVTech}^*$ , kWh/km.**

Показателят се определя по формулата:

$$(3) \quad e_{MVTech}^* = \frac{E_{MVTech}}{\sum_{i=1}^m s_i}$$

където:

$E_{MVTech}$  е измереният на страна Ср.Н. на трансформаторите за собствени нужди във всички ТПС и ПС общ разход на електроенергия за технически нужди за определен период от време (обичайно един месец), kWh.

❖ **Приведен към движението на метровлаковете относителен разход на енергия на административно-управленските сгради –  $e_{MVAdmin}^*$ , kWh/km.**

Този показател се определя по формулата:

$$(4) \quad e_{MVAdmin}^* = \frac{E_{MVAdmin}}{\sum_{i=1}^m s_i}$$

където:

$E_{MVAdmin}$  е измереният на страна Н.Н., в съответните разпределителни електротабла в ТПС и ПС или в главните електрически табла на сградите, разход на електроенергия на административните сгради за определен период от време (обичайно един месец), kWh.

## РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследването обхваща период от 12 месеца (от януари до декември 2019 г.). Периодът е избран целево, така че да обхваща годината, преди въведените през 2020 г. мерки, свързани с ограничаване разпространението на вируса COVID-19, следствие на които рязко намаля броя на пътниците пътуващи с метрото. В таблица 2 са показани изчислените стойности на оценъчните енергийни показатели.

Таблица 2

Изчислителни стойностите на оценъчните енергийни показатели за 2019 г.

Месец, година	Общ пробег на метровлаковете km	Общ брой превозени пътници бр.	Стойности на енергийните показатели				
			$e_{MV S}^*$ kWh/km	$e_{MV Trac}^*$ kWh/km	$e_{MV Tech}^*$ kWh/km	$e_{MV Admin}^*$ kWh/km	$e_{MV 100p-km}$ kWh/100p-km
01.2019 г.	376 576,3	7 770 618	15,66	8,17	6,72	0,77	8,46
02.2019 г.	337 482,0	7 611 372	15,13	8,45	5,91	0,77	7,48
03.2019 г.	371 829,8	8 345 827	14,02	8,51	4,74	0,76	6,96
04.2019 г.	366 693,9	7 794 937	13,38	8,37	4,36	0,65	7,02
05.2019 г.	366 217,7	7 966 380	13,41	8,41	4,28	0,73	6,87
06.2019 г.	360 803,1	7 512 912	13,34	8,40	4,11	0,82	7,14
07.2019 г.	372 652,4	7 114 385	13,64	8,63	4,20	0,81	7,97
08.2019 г.	371 468,1	6 360 109	13,77	8,39	4,58	0,80	8,97
09.2019 г.	360 728,0	7 024 247	13,48	8,69	4,01	0,77	7,72
10.2019 г.	385 875,8	9 019 013	13,23	8,12	4,41	0,70	6,31
11.2019 г.	359 882,7	8 421 854	13,77	8,56	4,50	0,70	6,56
12.2019 г.	367 371,8	7 471 298	14,89	8,21	5,95	0,73	8,16
<b>Общо '19</b>	<b>4 397 582</b>	<b>92 412 952</b>	<b>13,97</b>	<b>8,41</b>	<b>4,81</b>	<b>0,75</b>	<b>7,41</b>
<b>Общо '11</b>	<b>2 162 850</b>	<b>58 751 887</b>	<b>13,93</b>	<b>7,62</b>	<b>4,89</b>	<b>1,41</b>	<b>5,13</b>

## ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ПРОВЕДЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Получените резултати от проведеното изследване върху електроенергийното потребление на Линии 1 и 2 на Софийското метро през 2019 г. и изчислените енергийни показатели, дадени в таблица 2, позволяват да са направят следните изводи:

- Изчисленият на годишна база относителен общ разход на енергия за движение на метровлаковете е  $e_{MV S}^* = 13,97 \text{ kWh/km}$ . Той е повече от два пъти по-висок от изследвания в [2], среден за всички модели метровлакове, относителен нетен разход на електроенергия, чиято стойност е  $e_{MV}^* = 6,65 \text{ kWh/km}$ . Това главно се дължи на денонощното потребление на електрическа енергия в метростанциите, депо „Обеля” и денонощните потребители в административните сгради, вкл. диспечерския център.

- През 2019 г. относителният брутен тягов разход на енергия за движение на метровлаковете е  $e_{MV Trac}^* = 8,41 \text{ kWh/km}$ , като същият нараства с около 10% в сравнение с 2011 г. Той е и с около 28% по-висок от средния за всички модели метровлакове относителен нетен разход на електроенергия, и се дължи на работата на тяговите трансформатори на празен ход през времето от 0:30÷4:30 часа, когато няма влаково движение, както и на енергийните загуби в тяговите агрегати и захранващата мрежа, когато метровлаковете се движат.

- Приведеният към движението на метровлаковете, относителен разход на енергия за технически нужди за 2019 г. е  $e_{MV Tech}^* = 4,81 \text{ kWh/km}$ . Той почти не се променя спрямо 2011 г., тъй като е в пряка зависимост от дължината на метромрежата.

- Приведеният към движението на метровлаковете, относителен разход на енергия на сградите с административно-управленско предназначение за 2019 г. е  $e_{MV Admin}^* = 0,75 \text{ kWh/km}$ . Неговият дял намалява почти два пъти спрямо 2011 г., което

се дължи на относително постоянното електропотребление в тези сгради през отделните години, при нараснал около два пъти пробег на метроваковете.

- Специфичната обща енергия за извършване на транспортна работа 100 пътничкилометра е  $e_{MV 100p-km} = 7,41 \text{ kWh}/100p\text{-km}$ , която е изчислена въз основа на относителния общ разход на енергия за движение на метроваковете  $e_{MV s^*}$  и средния брой пътници във влак (183 бр.). Тя нараства с около 40% спрямо 2011 г., основно поради преразпределяне на пътниците, между влаковете пътуващи по Линии 1 и 2.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведеното изследване показва, че относителният дял на нетяговата енергия в общата енергоемкост на транспортната услуга е около 40% и е в пряка зависимост от графика за движение на влаковете. По отношение обаче на специфичната пълна енергия за извършване на транспортна работа 100 пътничкилометра може да се каже, че извършваната транспортна услуга от „Метрополитен” ЕАД по Линии 1 и 2 има относително нисък специфичен разход на енергия в сравнение с този на редица други метрополитени в Европа ( $8 \div 15 \text{ kWh}/100p\text{-km}$ ). Получените резултати от проведеното изследване са добра основа за провеждане на бъдещи, по-задълбочени изследвания, свързани с ефективността на енергийното потребление на Софийското метро.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

- [1] Данни за месечното електроенергийното потребление, пробег на метроваковете и броя на превозените пътници за 2011 г. и за 2019 г., „Метрополитен” ЕАД, София, 2020
- [2] Петров И., Г. Димитров, Т. Лалев, Експериментално изследване на енергийната ефективност на метроваковете на столичния метрополитен в реални експлоатационни условия, Годишник на Технически университет - София, том 67, книга 1, 2017 г. (ISSN 1311-0829)

## **ENERGY EFFICIENCY OF THE TRANSPORT SERVICE ON LINES 1 AND 2 OF THE SOFIA METRO**

**Georgi Dimitrov**

dimitrov\_gd@mail.bg, gdimitrov@vtu.bg

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

**Key words:** *Sofia metro, Structure of energy consumption, Energy efficiency of transport service.*

**Abstract:** *The report presents the results of a research on the electricity consumption and energy efficiency of the transport service provided by „Metropolitan” JSC on lines 1 and 2 of the Sofia metro. Measurements of electricity consumption are conducted separately, in order to analyze in detail the impact of different users on the overall energy efficiency. The data on the electricity consumption of the separate groups of consumers are analytically processed, using a specially developed for the purposes of the research, system of indicators for evaluation of energy efficiency. The results are presented in tabular and graphical form. An analysis of the energy indicators has been made and specific conclusions have been formulated.*