

## Анализ на тяговото електропотребление на градския електрически транспорт в гр. София и насоки за оптимизирането му

Георги Димитров, Албена Христова

**Analysis of the traction energy consumption of urban electric transport in Sofia and guidelines for its optimization:** The report presents the results of a research on the electricity consumption from the urban electric transport in Sofia. Based on the obtained database is an analysis of the main parameters characterizing the traction power consumption. Indicated are some general guidelines for optimization.

**Key words:** Urban electric transport, Electricity consumption, Guidelines for optimizing energy consumption.

### ВЪВЕДЕНИЕ

За нормалното функциониране на съвременния град решаваща роля изпълнява масовият градски транспорт. Човек трудно може да си представи днес един град с многохилядно население без гъстата мрежа от маршрутни линии на средствата за градски пътнически транспорт. За осигуряване бърз превоз на жителите на големите градове в най-голяма степен ефективен се явява електрическият транспорт: трамваи, тролейбуси и метрополитен.

В доклада са разгледани резултатите от проведено изследване върху електропотреблението на наземния градски електрически транспорт в гр. София. Изследване от такъв характер не се прави за първи път у нас [2, 3], като настоящото има за цел не само да анализира товарите графици, а също така да направи по-обстойно проучване за факторите, влияещи върху тяговия товар. Посочени са и някои основни насоки за оптимизиране на електроенергийното потребление, свързани с промени в графици за движение, организацията на движението и обновяването на подвижния състав в трамвайния и тролейбусния парк.

### 1. АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕТО

Главна особеност на масовия градски транспорт и в частност на наземния електрически такъв е, че той се движи по диспечерски график. Поради тази причина може да се очаква систематично повтарящо се електропотребление през еднаквите часове на денонощието, съобразно сезоните и дните от седмицата. На практика обаче върху денонощното и месечното потребление оказват влияние множество фактори, някои от които със случаен характер, водещи до значителни разлики в консумираните енергии както през отделни дни в месеца, така и между идентични месеци през различни години.

В таблица 1 са показани данните за потреблението на енергия от 24<sup>-те</sup> токоизправителни станции /ТИС/, захранващи тяговата мрежа на градския електротранспорт /ГЕТ/ в гр. София [4].

При анализа на данните от таблица 1, могат да се направят следните по-щеществени изводи:

- Най-голямо електропотребление през съответната година се наблюдава през месец януари, който освен че е месец с 3 дни повече от февруари, се явява и месеца с най-ниска статистическа средномесечна температура – -1.5 °С (по данни на НИМХ за град София). Последното предполага наличието на значителен електрически товар за отопление на транспортните средства;

- Най-малко месечно електропотребление има през месец август, което е следствие на летния график на движение на ГЕТ и намаления пътничопоток;

- Абсолютния максимален товар за съответната година се явява през месеца с най-ниска средномесечна температура и обичайно неговата поява е през месец януари или февруари;

- Абсолютните минимални товари, с многократно по-ниска стойност от максималните, са следствие на липсата на движение през нощните часове и се формират от активните загуби на мощност в тяговите трансформатори, при работата им на празен ход. Значителното нарастване на тези товари през зимните месеци (декември, януари и февруари) се дължи на отоплението в токоизправителните станции, както и на други потребители (нямащи отношение към цялостния технологичен процес), присъединени към захранването за собствени нужди в някои ТИС, чиято енергия се регистрира от електромерите за търговско измерване;

- Ниската стойност на месечната използваемост на максималния товар е следствие на четиричасов период в денонощието без движение на транспортните средства, в т.ч. и на технологичен пробег. На годишна база използваемостта на максималния товар е около 3500 часа или около 40% от общото време.

Таблица 1

Данни за месечното потребление на електроенергия и електрическите товари през периода 2010-2012 г.

Година	2010				2011				2012			
	Показател	<i>E</i>	<i>P<sub>max</sub></i>	<i>P<sub>min</sub></i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>P<sub>max</sub></i>	<i>P<sub>min</sub></i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>P<sub>max</sub></i>	<i>P<sub>min</sub></i>
Месец	kWh	kW	kW	h	kWh	kW	kW	h	kWh	kW	kW	h
Януари	5060271	12636	698	400	5155122	12616	940	409	5451432	13444	1065	405
Февруари	4561314	13118	704	348	4584299	12552	752	365	5165487	13806	1021	374
Март	4415297	13079	383	338	4333145	12348	450	351	4199861	11995	372	350
Април	3484743	9388	269	371	3328313	10001	312	333	3261316	10951	240	298
Май	3185834	8334	227	382	3210275	8732	233	368	3285508	8620	221	381
Юни	3151753	7704	238	409	2993292	7500	228	399	2967606	7601	218	390
Юли	3002002	7309	232	411	2828596	6955	229	407				
Август	2873217	6981	240	412	2708852	6527	219	415				
Септември	3006722	8213	134	366	2902795	7895	219	368				
Октомври	3697723	10761	264	344	3655555	11057	225	331				
Ноември	3648938	10756	322	339	4483405	12051	498	372				
Декември	4890257	13118	432	373	4853537	12354	714	393				
За година	44978070	13118	134	3429	45037186	12616	219	3570	24331209	13806	218	1762

Анализът на денонощното електропотребление не дава точна представа за показателите, характеризиращи особеностите на тяговия товар, поради наличието на периоди в денонощието с „нулево“ движение на транспортните средства (0:30÷4:30 ч.). Затова основните показатели, характеризиращи товарите графици са определени и анализирани само за периодите с маршрутно движение на ГЕТ – 5:00÷24:00 ч., поотделно за среден работен и среден почивен ден, за всеки месец на съответната година. Резултатите от това изследване са показани в таблица 2.

От изчислените стойности на основните показатели – коефициент на максимума –  $k_{max} = P_{max}/P_{ave}$ , коефициент на плътност на графика –  $k_{плътн.} = P_{ave}/P_{max}$  и коефициент на върховост  $k_{върх.} = P_{min}/P_{max}$ , където  $P_{max}$ ,  $P_{min}$  и  $P_{ave}$  са съответно максималния, минималния и средния товари в kW [5], могат да се формулират следните изводи:

- Коефициента на максимума се изменя в сравнително широки граници – за среден работен ден  $k_{max} = 1.26\div 1.43$  и за среден почивен ден  $k_{max} = 1.22\div 1.30$ . Повисоките му стойности за среден работен ден през зимните месеци с температури близки до нормалните са следствие на силно изменящият се през отделните дни отоплителен товар. През месеци с преобладаващи екстремално ниски температури (януари и февруари 2012 г.)  $k_{max}$  намалява, което е следствие на значителния по стойност отоплителен товар, чиято средно часова стойност практически се изменя слабо и оказва стабилизиращо влияние върху променливия тягов товар. Повишаването на стойността му през месеците юли и август се дължи основно на по-неравномерния график за движение, определен с лятното разписание. По-

слабото изменение на коефициента на максимума през среден почивен ден е в пряка зависимост от по-равномерния график за движение (фиг. 1);

- Коефициента на върховост силно се влияе както от равномерността в графика за движение, така и от външните климатични условия;

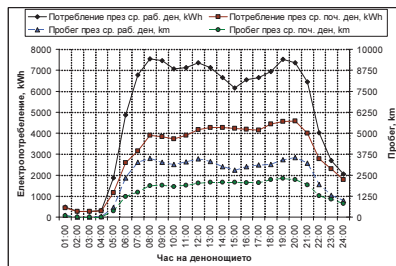
Таблица 2

Показатели на тяговите товари графици за среден работен и почивен ден

Ден	Година	2010							2011						
		Показател Месец	$P_{max}$ kW	$P_{min}$ kW	$P_{ave}$ kW	$K_{max}$ -	$K_{плътн.}$ -	$K_{върх.}$ -	$T$ h	$P_{max}$ kW	$P_{min}$ kW	$P_{ave}$ kW	$K_{max}$ -	$K_{плътн.}$ -	$K_{върх.}$ -
Среден работен ден	Януари	12098	3575	9111	1.33	0.75	0.30	15.06	11810	3639	9082	1.30	0.77	0.31	15.38
	Февруари	11632	3578	8786	1.32	0.76	0.31	15.11	11631	3615	9024	1.29	0.78	0.31	15.52
	Март	9297	2935	7222	1.29	0.78	0.32	15.54	10940	2951	7948	1.38	0.73	0.27	14.53
	Април	8594	2392	6554	1.31	0.76	0.28	15.25	8185	2268	6448	1.27	0.79	0.28	15.76
	Май	7597	1751	6027	1.26	0.79	0.23	15.87	7634	1802	5970	1.28	0.78	0.24	15.64
	Юни	7325	1631	5769	1.27	0.79	0.22	15.75	6972	1483	5490	1.27	0.79	0.21	15.75
	Юли	6971	1359	5299	1.32	0.76	0.19	15.20	6651	1314	5096	1.31	0.77	0.20	15.32
	Август	7360	1617	5547	1.33	0.75	0.22	15.07	6277	1256	4797	1.31	0.76	0.20	15.28
	Септември	6708	1501	5303	1.26	0.79	0.22	15.81	7187	1520	5585	1.29	0.78	0.21	15.54
	Октомври	8538	2073	6690	1.28	0.78	0.24	15.67	8961	2216	6461	1.39	0.72	0.25	14.42
	Ноември	8761	2268	6549	1.34	0.75	0.26	14.95	11501	2863	8036	1.43	0.70	0.25	13.97
	Декември	11646	3426	8859	1.31	0.76	0.29	15.21	10997	3140	8435	1.30	0.77	0.29	15.34
Среден почивен ден	Януари	7473	2617	5955	1.25	0.80	0.35	15.94	6994	2945	5838	1.20	0.83	0.42	16.69
	Февруари	7041	2575	5597	1.26	0.79	0.37	15.90	6514	2700	5443	1.20	0.84	0.41	16.71
	Март	6381	2194	5012	1.27	0.79	0.34	15.71	5698	2106	4590	1.24	0.81	0.37	16.11
	Април	5120	1622	3993	1.28	0.78	0.32	15.60	4723	1547	3757	1.26	0.80	0.33	15.91
	Май	4767	1189	3618	1.32	0.76	0.25	15.18	4552	1148	3564	1.28	0.78	0.25	15.66
	Юни	4788	1062	3660	1.31	0.76	0.22	15.29	4262	996	3350	1.27	0.79	0.23	15.72
	Юли	4080	951	3292	1.24	0.81	0.23	16.14	4065	945	3216	1.26	0.79	0.23	15.82
	Август	3915	907	3155	1.24	0.81	0.23	16.11	3769	867	3018	1.25	0.80	0.23	16.02
	Септември	4262	1006	3290	1.30	0.77	0.24	15.44	4160	954	3307	1.26	0.79	0.23	15.90
	Октомври	4998	1549	3966	1.26	0.79	0.31	15.87	5106	1428	4000	1.28	0.78	0.28	15.67
	Ноември	5100	1640	4041	1.26	0.79	0.32	15.85	6403	2404	5104	1.25	0.80	0.38	15.94
	Декември	6680	2416	5482	1.22	0.82	0.36	16.41	6424	2624	5270	1.22	0.82	0.41	16.41

Таблица 2 /продължение/

Ден	Година	2012						
		Показател Месец	$P_{max}$ kW	$P_{min}$ kW	$P_{ave}$ kW	$K_{max}$ -	$K_{плътн.}$ -	$K_{върх.}$ -
Ср.раб. ден	Януари	11975	3692	9579	1.25	0.80	0.31	16.00
	Февруари	12879	3903	10123	1.27	0.79	0.30	15.72
	Март	10359	2769	7479	1.39	0.72	0.27	14.44
	Април	8470	2156	6369	1.33	0.75	0.25	15.04
	Май	7674	1921	6050	1.27	0.79	0.25	15.77
	Юни	6978	1495	5506	1.27	0.79	0.21	15.78
Ср.поч. ден	Януари	7267	2866	5804	1.25	0.80	0.39	15.97
	Февруари	7369	2916	6140	1.20	0.83	0.40	16.66
	Март	5598	2238	4487	1.25	0.80	0.40	16.03
	Април	4937	1300	3795	1.30	0.77	0.26	15.37
	Май	4613	1160	3608	1.28	0.78	0.25	15.65
	Юни	4325	973	3388	1.28	0.78	0.23	15.67



Фиг. 1. Товаров график за среден работен и среден почивен ден – май 2012 г.

- Като цяло следва да се отбележи, че коефициента на плътност  $K_{плътн.}$  има сравнително високи стойности –  $0.70 \div 0.80$ , като през по-студените месеци той достига и до стойности  $0.82 \div 0.84$ , следствие продължителна работа на отоплението;

- Средноденонощната използваемост на максималния тягов товар е около 15-16 часа, което практически означава 75-80% от периода с маршрутно движение.

За оценка на влиянието на променяният се, през отделните часове, тягов товар върху загубите на мощност и енергия е изследван друг показател – коефициент на формата на товаровия график  $K_f$ , определен като отношение на

средноквадратичния товар  $P_{ср.кв.}^d$ , kW за интервала от време 5:00÷24:00 ч. и средния товар  $P_{аве}^d$ , kW за същия период, изчислени по следните формули [5]:

$$k_{\phi} = \frac{P_{ср.кв.}^d}{P_{аве}^d}, \quad P_{ср.кв.}^d = \frac{\sqrt{m}}{T_{експл.}} \sqrt{\sum_{j=6}^{24} (E_j)^2}, \quad P_{аве}^d = \frac{\sum_{j=6}^{24} E_j}{T_{експл.}}, \quad (1)$$

където:

$m$  е броя на интервалите с еднаква продължителност от 1 час – ( $m = 19$ );

$T_{експл.}$  – интервала от време, с маршрутно движение, h – ( $T_{експл.} = 19$  h);

$E_j$  – активната енергия консумирана през  $j$ -тия интервал от 1 час, kWh;

$j$  – часовия интервал, в който е измерена активната енергия  $E_j$  – ( $j = 6 \div 24$ ).

Получените резултати от изследването показват, че за среден работен ден  $k_{\phi}$  се изменя в границите 1.025÷1.035, а за среден почивен ден изменението на  $k_{\phi}$  е 1.015÷1.025. Относително добрата стойност на коефициента на формата, дължаща се на сравнително равномерното движение на транспортните средства в денонощен разрез, дава основание да се предположи, че делът на допълнителните загуби от променливия тягов товар са около 2-3%.

## 2. ФАКТОРИ ОКАЗВАЩИ ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕТО

Електроенергийното потребление на градския наземен електрически транспорт зависи от редица фактори, всеки от които оказва различно по тежест влияние върху месечния и годишния му размер.

- Енергетични характеристики на електрическите транспортни средства /ЕТС/ – Те оказват в най-голяма степен влияние върху електропотреблението. Най-често в практиката като показател за оценка ефективността на превозите с даден тип ЕТС се използва относителния разход на енергия  $e^* = E^*/s^*$ , kWh/km, където  $E^*$  е измереният разход на енергия в точката на токоснемане, а  $s^*$  е изминатият път от возилото. Голямото разнообразие на транспортни средства в парка на „Столичен електротранспорт“ ЕАД, с различни системи за регулиране (импулсни и резисторни) и задвижване (с асинхронни и постояннотокови двигатели), определя и широките граници на изменение на  $e^*$  в реални експлоатационни условия [6]. За тролейбусния транспорт този показател има средна стойност около 1.58 kWh/km, докато за трамвайния транспорт средната му стойност е около 2.31 kWh/km;

- Състояние на пътната инфраструктура – Влошеното състояние на градската пътна инфраструктура, което през последните години е характерно за големите градове у нас, води до понижаване на максималните скорости на движение на ГЕТ и по-продължителна работа в зоната на регулиране. Крайният ефект е повишаване на относителния разход  $e^*$  следствие влошаване на енергетичния к.п.д. на ЕТС;

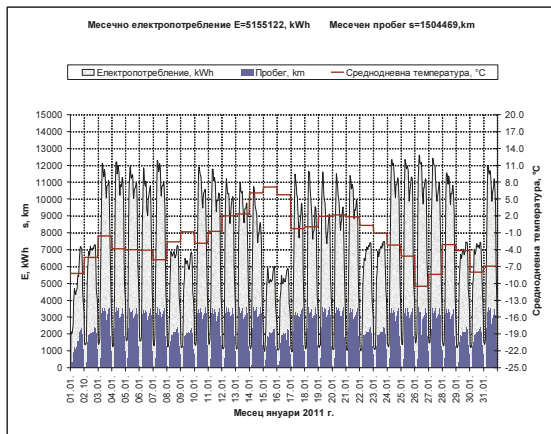
- График за движение (разписанията) – Много от маршрутите на ГЕТ в централната част на гр. София имат общи участъци (сектори). При действащия в момента график на движение, интервала между отделните возила, пристигащи на дадена спирка в час-пик, е около 1 min, последван от продължителен период на липса на движение в сектора. Този цикъл се повтаря около 2-3 пъти за един час. Всичко това води до повишено краткотрайно (2-3 min) токово натоварване в даден сектор на мрежата, а оттам и на повишени загуби на мощност и енергия в хранящите ги кабелни фидери;

- Трафик, организация и регулиране на движението – В големите градове и особено в столицата основен проблем на градската мобилност е трафика. Движението на ГЕТ в трафик е съпроводено с чести спирания и потегляния, които от своя страна водят до повишаване на относителния разход  $e^*$ , kWh/km на транспортните

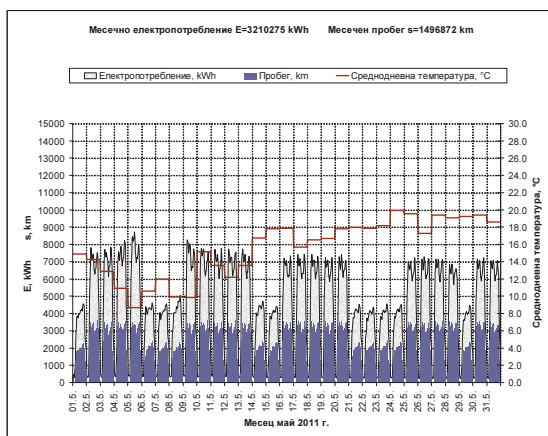
средства, а оттам и на общото потребление на електрическа енергия  $E$ , kWh. От друга страна повечето светофарни уредби за регулиране на движението през натоварените кръстовища се управляват преимуществено ръчно. В бъдеще време се предвижда те да се управляват от централна система базирана на микропроцесорни контролери с GPRS модеми, свързани към светофарните уредби [1]. Проведеното изследване върху влиянието на този фактор показва, че относителния разход  $e = E/s$ , kWh/km, определен франко шините средно напрежение на ТИС, за часовете с натоварен трафик през среден работен ден има стойност около 2.27 kWh/km, докато през часовете с нормален трафик стойността му е около 2.13 kWh/km. През среден почивен ден тази стойност се изменя слабо – между 2.00 kWh/km и 2.04 kWh/km. Наблюдаваната тенденция към понижаване на относителния разход  $e$  за среден работен ден през май 2011 г. и 2012 г. спрямо този през 2010 г. е следствие на пренасочване на част от пътничопотока към метрото;

- Схема на електроснабдителната система на ГЕТ – В гр. София като цяло се използва централизирана схема за захранване на контактната мрежа. Съсредоточаването на тяговите захранващи мощности в 24 на брой ТИС води до увеличаване дължината на захранващите кабелни фидери, която често надхвърля 1000 m и достига на места до 2000 m. Последното води до увеличаване на загубите по преноса на енергия. Въз основа на изследваната база от данни, средния процент на загубите, свързани с преноса и преобразуването на енергията, за месеците без отоплителен товар е около 17-20%, като този процент нараства за зимните месеци.

- Външни климатични фактори – Тяхното влияние най-силно се проявява през зимния период на експлоатация и се изразява в почти 50 процентно увеличение на електрическите товари и електропотреблението през през най-студените зимни месеци (фиг. 2, а) и б). Стойността на този товар е в пряка зависимост от външната температура, но тъй като в над 80% от експлоатираните ЕТС отоплението се управлява ръчно от водачите, върху него съществено влияние оказва и субективния фактор.



а)



б)

Фиг. 2. Типови месечни товари графици

а) за зимен месец - януари б) за пролетен месец - май

### 3. НАСОКИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТОВАРИТЕ И ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕТО

За намаляване на електро-потреблението при запазени количествени параметри на движение на ГЕТ, могат да се посочат следните по-основни насоки за оптимизиране:

- Обновяване на трамвай-ния парк с нови или рецикли-рани състави с цел окончателно извеждане от експлоатация на моторсите с резисторно регулиране;
- Въвеждане на системи за автоматично регулиране на отоплението в ЕТС, според външната и вътрешната (във возилото) температура;
- Подобряване организация-та на движение чрез внедря-ване на автоматизирани систе-ми за управление на светофа-рите според текущия трафик;
- Подобряване състоянието на пътната инфраструктура и обособяване на индивидуални пътни ленти за градския транс-порт по всички многолентови еднопосочни булеварди;
- Оптимизиране на тролей-бусните маршрути и въвеждане на обиколни такива.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати от проведеното изследване показват, че електрическите товари в системата на електроснабдяване на градския електрически транспорт зависят от множество фактори, които в съвкупност формират общата картина на електропотреблението.

Формулираните в доклада аналитични изводи могат да послужат като една добра основа при следващи изследвания върху електропотреблението на ГЕТ, обследвания за енергийна ефективност на промишлената система „Градски електрически транспорт“, както и за провеждане на целеви изследвания за енергийна ефективност на превозната работа на тролейбусния и трамвайния транспорт, изразена чрез показателя kWh/пътник.километър.

В заключение може да се отбележи, че повишаването на енергийната ефективност на наземния градски електрически транспорт е важна задача, която следва да бъде решена в изпълнение на целите, заложили в Енергийната стратегия на Република България. Постигането на енергийно ефективен градски електрически транспорт е свързано както с използване на съвременен подвижен състав, така и с подобряване организацията на градското движение.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Василева, М., Интелигентните помощници на градския транспорт, вестник „Строителство Градът“, бр. 15/16.04.2012.

<http://stroitelstvo.info/show.php?storyid=1808734>

[2] Миленов, И., Г. Павлов, Възможности за повишаване на енергийната ефективност на градски електрически транспорт чрез оптимизиране на тягови електрозадвижвания. Семинар „Електроенергетика и електрообзавеждане на транспорта“, Сборник доклади, стр. 10-17, Национално дружество на електроинженерите в транспорта в Република България, 2002.

[3] Попов, Р., Х. Богданов, Е. Влъчков, И. Миленов, Електрически товари и товари диаграми на електрическия градски транспорт, Десета научна конференция с международно участие ТЕМРТ '97, Сборник доклади – част 1, стр. 446-453, ВВТУ „Тодор Каблешков“, София, 1997.

[4] Статистически данни за тяговото електропотребление и пробега на градския електрически транспорт в гр. София за 2010-2012 г., „Столичен електротранспорт“ ЕАД – поделение „Трансенерго и РП“.

[5] Стоянов, С. и кол., Справочник по енергетика – том 1, АВС Техника, 1997.

[6] Технически и енергетични данни за електрическите транспортните средства в експлоатация в гр. София, „Столичен електротранспорт“ ЕАД.

### За контакти:

Гл. ас. инж. Георги Димитров, катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”, тел.: 02 9709 471, e-mail: [dimitrov\\_gd@mail.bg](mailto:dimitrov_gd@mail.bg)

Гл. ас. инж. Албена Христова, катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”, тел.: 02 9709 374, e-mail: [histova\\_as@abv.bg](mailto:histova_as@abv.bg)

**Докладът е рецензиран.**