

Възможности за планиране на тяговото електропотребление на наземния градски електрически транспорт

Георги Димитров

Opportunities for planning of the traction power consumption of ground urban electric transport: *The report presents a variant of the methodology for the planning of traction electricity consumption of ground urban electric transport. Of the research methodology of this type available for the first time here. The proposed methodology covers all major factors influencing traction load under real operating conditions. Through it can be done as operating (daily) planning of the energy consumption based on real parameters of daily operational work, and also monthly and annual planning.*

Key words: *Urban electric transport, Electricity consumption, Methodology for planning the traction electricity consumption.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Основен компонент в експлоатационните разходи на наземния градски електрически транспорт – трамваи и тролейбуси, се явява тяговото електроенергийно потребление. Необходимостта от неговото планиране е продиктувана от въвеждането у нас на „Правила за търговия с електрическа енергия“, въз основа на които потребителите могат да сключват двустранни договори за електроенергийни доставки с производители или търговци на електрическа енергия по свободно договорени и/или регулирани цени.

В доклада е представен вариант на методика за планиране на тяговото електропотребление на наземния градски електрически транспорт. От направеното проучване, методика от такъв характер се предлага за първи път у нас, като настоящата е разработена на база международен опит в тази област [4] и е адаптирана към особеностите на този вид транспортна дейност у нас. В предлаганата методика са обхванати всички основни фактори, оказващи влияние върху тяговия товар в реални експлоатационни условия. Чрез нея може да се извършва както оперативно (дневно) планиране на енергийния разход, въз основа на реални параметри на дневната експлоатационна работа трамвайния и тролейбусния транспорт, така и месечно и годишно планиране.

1. СЪЩНОСТ НА ПРОБЛЕМА

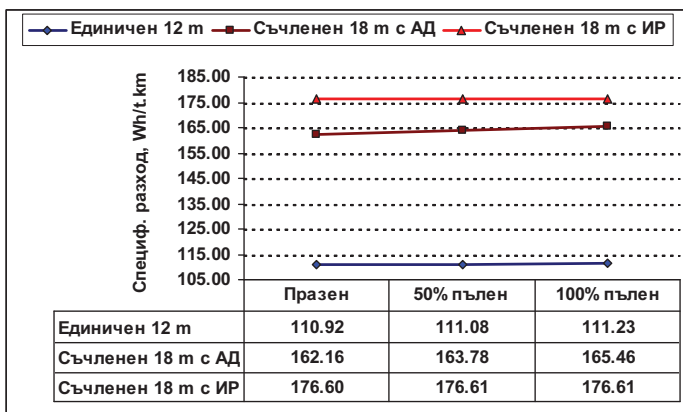
Планирането на разходът на електрическа енергия за тягови нужди е от съществено значение за енергийните отдели на транспортните фирми за градски електрически транспорт /ГЕТ/. Независимо, че масовият градски електрически транспорт се движи по диспечерски график и следва да се очакват незначителни отклонения в енергийното потребление през отделните дни от седмицата, в реални пътни условия върху електропотреблението оказват влияние множество фактори, някои от които със случаен характер, изискващи да бъдат взети под внимание.

Въпреки, че в литературата [1, 3, 5] са известни аналитични методи за определяне разхода на електроенергия на електрическите транспортни средства, всички те изискват да бъдат известни техните механични и електрически характеристики. През последните години обновяването на парка на градския електрически транспорт се извършва чрез внос на реновирани и нови транспортни средства, в чиято техническа документация не се предоставят данни за техните електромеханични и електротягови характеристики. Това прави тези аналитични методи неприложими, а ако се прибегне до използване на универсални тягови характеристики [2], грешката при изчисленията може да бъде значителна. В съвременната практика, при разработването на норми за електроенергийно потребление, най-често се прибегва до провеждане на експериментални измервания в реални или тестови условия, въз основа на които се определят съответните норми.

2. МЕТОДИКА ЗА ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ИНДИВИДУАЛНИ НОРМИ ЗА РАЗХОД НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ НА ГРАДСКИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПОДВИЖЕН СЪСТАВ

При разработване на индивидуалните норми за електропотребление на градските електрически транспортни средства /ЕТС/ е необходимо да се познат в детайли техническите параметри и енергийни характеристики на всеки отделен тип подвижен състав, особеностите на отделните маршрути (профил, регулирани кръстовища, трафик и др.), както и данни за пътничопотоците и средното превозно разстояние.

Като цяло разходът на електроенергия, измерван на токоснемателя на ЕТС, се състои от два основни компонента: разход за движение на ЕТС и разход за спомагателни нужди. Най-често в практиката се работи с т.н. специфичен експлоатационен разход e , който се определя като отношение на общо потребената енергия от ЕТС E към извършената превозна работа $m_{br} \cdot s$, изчислен в дименсия Wh/(t.km). Работата с този показател е твърде удобна, тъй като неговата стойност много слабо се изменя в зависимост от променливото натоварване с пътници на отделните ЕТС от даден тип. Последното се потвърждава с данни от проведено през 2009 г. изследване върху тролейбусния транспорт в гр. Милано – Италия [6], което графично е илюстрирано на фиг. 1.



Фиг. 1. Изменение на специфичния експлоатационен разход при различен тип тролейбуси, експлоатирани в гр. Милано - Италия. АД – асинхронен двигател; ИП – импулсен регулатор.

Необходимите изходни данни при разработване на индивидуалните норми за експлоатационен разход на електроенергия са:

- Базов специфичен тягов разход на енергия за единица превозна работа, извършена от даден тип ЕТС – e_{0i} , Wh/(t.km).
- Електрически мощности и режими на работа на спомагателните съоръжения и системи в ЕТС – P_k , t_k и k_k (режимните параметри се определят опитно, като тези за осветлението и отоплението на ЕТС се задават за всеки месец от годината).
- Данни за превозната способност (брой пътници) на отделните типове ЕТС.
- График за движение на ЕТС и експлоатационни скорости на трамвайния и тролейбусния транспорт – v_e , km/h.
- Данни за профила на пътя (наклони и криви) на отделните маршрути.
- Данни за пътничопотоците по маршрути и спирки на градския електротранспорт (отделно за интервалите на върхов, невърхов и нощен график).

Изчисляването на индивидуалната норма за специфичен експлоатационен разход на електроенергия e_i за i -тия тип подвижен състав на ГЕТ става по формулата:

$$e_i = e_i^{tr} + e_i^{aux}, \quad (1)$$

където:

e_i^{tr} е специфичния експлоатационен разход на електроенергия за движение на i -тия тип ЕТС (включва и разхода за вентилация на силовите преобразуватели), Wh/(t.km);
 e_i^{aux} – специфичен експлоатационен разход на електроенергия за спомагателни нужди (осветление, вентилация, отопление, климатизация и др. под.), Wh/(t.km).

Специфичният експлоатационен разход за движение на i -тия тип ЕТС e_i^{tr} се изчислява на въз основа на базов специфичен разход на електроенергия e_{0i} , коригиран със съответни коефициенти, по следната формула:

$$e_i^{tr} = e_{0i} \cdot k_v \cdot k_i \cdot k_{ext}, \quad (2)$$

където:

e_{0i} е специфичния разход на електроенергия за движение на i -тия тип ЕТС в градски условия, измерен при базови тестови условия, Wh/(t.km);

k_v – коефициент отчитащ изменението в специфичния разход на електроенергия при реално зададени експлоатационни скорости на движение по даден маршрут;

k_i – коефициент отчитащ изменението в разхода на електроенергия при движение по участъци с реални наклони;

k_{ext} – коефициент отчитащ изменението в разхода на електроенергия при движение в променливи пътни условия.

Базовият специфичен разход на електроенергия за движение на даден тип ЕТС e_{0i} се определя чрез изследвания (тестове) в градски условия, при провеждането на които следва да се спазват определени експлоатационни параметри. За конкретните експлоатационни условия в Република България се приема да те да имат следните стойности: базова експлоатационна скорост $v_{e\ base}$, която за трамваите с междурелсие 1009 mm има стойност $v_{e\ base} = 13,5\text{ km/h}$ (при $v_{max} = 35\text{ km/h}$), за трамваите с междурелсие 1435 mm – $v_{e\ base} = 14\text{ km/h}$ (при $v_{max} = 40\text{ km/h}$), а за тролейбусите – $v_{e\ base} = 15\text{ km/h}$ (при $v_{max} = 50\text{ km/h}$); движение по участък с еквивалентен наклон $i_{eq} = 0\text{ ‰}$; температура на външния въздух $\Theta = +10,5\text{ °C}$, която е средногодишната температура в България. При извършване на измервания за конкретен град, се работи със средногодишна температура (респ. средномесечна) за съответния регион, като се допуска отклонение от нея $\pm 2\text{ °C}$.

Измерванията за определяне на базовия специфичен разход на енергия се извършват при средно запълване с пътници на ЕТС и без включено отопление, климатични системи и осветление на пътническите салони.

Базовата експлоатационна скорост $v_{e\ base}$, km/h се дефинира като средна скорост за преминаване на тестовия участък в двете посоки. Времето за провеждане на изследванията обхваща целия период на теста и включва както времето за чисто движение, така и всички престои. Базовата експлоатационна скорост се определя по формулата:

$$v_{e\ base} = \frac{S_{test}}{t_{move} + t_{st} + t_{end}}, \quad (3)$$

където:

S_{test} е изминатото разстояние по време на теста ($S_{test} = 2 \cdot L_{test}$), km;

t_{move} – общо време за движение (включва времето между всеки две регламентирани спирания на спирки), h;

t_{st} – общо време за престой на спирките (вкл. отваряне и затваряне на вратите), h;

t_{end} – време за престой в края на тестовия участък (респ. на крайните станции), h.

Общото време за престой на спирките представлява сумата от времената за престой на всяка отделна спирка ($t_{st} = \sum t_{sti}$). От своя страна времето за престой на дадена спирка t_{sti} зависи от пътничопотока и интервала на движение на ЕТС. За нуждите на изследванията средното време за престой на една спирка се приема равно на **20 s (0,0055 h)**. Времето за престой на крайните станции в общия случай не следва да бъде по-голямо от интервала на движение между отделните транспортни единици. За тестовете се приема средно време са престой $t_{end} = 540 \text{ s (0,15 h)}$.

При провеждане на тестовите пробези с ЕТС трябва да се реализират всички режими на движение – потегляне и ускоряване, движение с установена скорост (при условие, че разстоянията между две регламентирани спирания позволяват), движение по инерция, спиране и престой на спирки. Препоръчва се измерванията да се правят по участъци със средни условия на градско движение (брой светофари, трафик и др. под.), еквивалентни наклони равни на нула и дължини L_{rest} не по-малки от 2500-3000 m. За регламентирани спирания, при тестовете могат да се използват съществуващите спирки в тези участъци, ако средното разстояние между тях е близко по стойност на средното междуспирково разстояние за съответния вид транспорт (трамваен или тролейбусен).

Измерванията се правят и за двете направления, като получените резултати за енергията и пробегата се отчитат отделно за всяка посока на движение, а базовият специфичен разход e_{0i} се изчислява въз основа на общо потребената енергия и общия пробег при теста при константна брутна маса на ЕТС. За намаляване на субективната грешка се препоръчва тестовете да се правят поне 3 пъти при идентични условия, но с използване на различни ЕТС от дадения тип и различни водачи, като получените резултати се усредняват.

Стойностите на коефициента k_v , отчитащ измененията в специфичния разход на електроенергия при реални експлоатационни скорости на движение, се определят по следната емпирична формула [4]:

$$k_v = 1 + k_e \cdot \frac{v_e - v_{e \text{ base}}}{v_{e \text{ base}}}, \quad (4)$$

където:

v_e е реалната (зададената с графика за движение) експлоатационна скорост, km/h;

$v_{e \text{ base}}$ – базова експлоатационна скорост, при която е определен базовия специфичен разход e_{0i} , km/h;

k_e – корекционен коефициент, отчитащ влиянието реалната експлоатационна скорост на движение върху разхода на електроенергия.

В условията на градско движение, при експлоатационни скорости по-малки от 20 km/h ($v_e \leq 20 \text{ km/h}$), стойностите на корекционния коефициент k_e , за различните видове градски електрически транспорт у нас, са както следва: за трамваен транспорт – $k_e = 1,2$ (при трамваи с резисторно пускане) и $k_e = 1,1$ (при трамваи с импулсно регулиране); за тролейбусен транспорт – $k_e = 1,0$.

Коефициентът k_i , отчитащ измененията в разхода на електроенергия при движение по участъци с реални наклони, се дефинира като функция на така наречения еквивалентен наклон i_{eq} . Еквивалентния наклон представлява постоянен фиктивен наклон (за целия маршрут или за части от него), при движение по който

ЕТС изразходва същото количество електроенергия, както и при движението по действителния профил.

Еквивалентният наклон може да се определи по един от методите описани в [2, 3, 4]. За експлоатационните условия в Република България, коефициентът k_i , може да се изчисли по следната емпирична формула [4]:

$$k_i = 1 + 0,02 \cdot i_{eq}, \quad (5)$$

където i_{eq} е средният еквивалентен наклон за цялата дължина на маршрута, ‰.

Коефициентът k_{ext} обхваща множество фактори като климатични условия, трафик и регулиране на движението, състояние на пътя и др. под. Всеки един от тези фактори оказва различно по тежест и време на действие влияние, и е необходимо те да се изследват поотделно.

Към настоящия момент, поради липса на необходимата изследователска база данни, за нуждите на методиката могат да се използват следните зависимости:

$$k_{ext} = 1 + k_\tau + k_{trac}, \text{ за } k_\tau = -0,005 \cdot (\tau - \Theta_R) \text{ и } k_{trac} = 0,06 \cdot (sp_{trac} - sp_{base}), \quad (6)$$

където:

k_τ – корекционен коефициент за влияние на външната температура [4];

k_{trac} – корекционен коефициент за влияние на пътния трафик;

τ – прогнозна средна външна температура за плановия период (ден или месец), °C;

Θ_R – средногодишна външна температура за съответния регион, °C;

sp_{trac} , sp_{base} – съответно среден брой пускови процеси от скорост $v = 0$ за 1 km пробег при движение в реални пътни условия и при базови тестови условия, бр.

Специфичният разход на електроенергия за спомагателни нужди на i -тия тип ЕТС e_i^{aux} се определя по формулата:

$$e_i^{aux} = \frac{\sum_{k=1}^{as} (P_k \cdot t_k \cdot k_k)_i \cdot 10^3}{m_{br\ i} \cdot s_i}, \quad (7)$$

където:

P_k е електрическата мощност на k -тото съоръжение или система в ЕТС, kW;

t_k – време за работа на k -тото съоръжение или система в ЕТС, h;

k_k – коефициент на включване на k -тото съоръжение или система ($0 < k \leq 1$);

$m_{br\ i} \cdot s_i$ – превозната работа на i -тия тип ЕТС изразена чрез показателя брутотон километри ($m_{br\ i}$ е средната брутна маса, t; s_i е общия пробег, km), t.km.

От особена важност при изчисляване на e_i^{aux} е сравнително точното определяне на средната брутна маса $m_{br\ i}$ на на i -тия тип ЕТС. За нейното изчисляване се използва формулата:

$$m_{br\ i} = m_i + m_{pass} \cdot n_{ave\ i}, \quad (8)$$

където:

m_i е собствената маса (тара) на ЕТС от тип i , вкл. масата на водача, t;

m_{pass} – средна маса на един пътник (приема се $m_{pass} = 0,07$ t), t;

$n_{ave\ i}$ – среден брой на пътниците в i -тия тип транспортно средство, бр.

При настоящите експлоатационни условия вместимостта на различните типове ЕТС не оказва съществено влияние върху поемане на потока от пътници. При

относително еднакъв пътничопоток по всеки от маршрутите на ГЕТ или при силно различаващи се пътничопотоци по отделните маршрути, средният брой пътници в една транспортна единица се определя по една от посочените формули (9):

$$n_{ave i} = n_{ave} = \frac{N \cdot I_{ave}}{S_{\Sigma}} \quad \text{или} \quad n_{ave i} = n_{ave j} = \frac{N_j \cdot I_{ave j}}{S_j}, \quad (9)$$

където:

n_{ave} и $n_{ave j}$ са съответно среден брой на пътниците транспортно средство при еднакъв пътничопоток по отделните маршрути на ГЕТ и този за j -тия маршрут, бр.;

N , I_{ave} и S_{Σ} – съответно общ брой превозени пътници, средно превозно разстояние на пътник, km и общия пробег на ЕТС, km, за цялата мрежа на ГЕТ;

N_j , $I_{ave j}$ и S_j – съответно общ брой превозени пътници, средно превозно разстояние на пътник, km и общия пробег на ЕТС, km, за j -тия маршрут на ГЕТ.

Удачно е изчисленията по формули (1)-(9) да се проведат отделно за всеки маршрут, съответно за делничен, предпразничен (събота) и празничен ден. При необходимост от почасово планиране, изчисляването на индивидуалните норми трябва да се направи поотделно за върхов, невърхов и нощен график на движение.

Индивидуалните норми могат да бъдат определени и чрез енергийни измервания в подвижния състав с помощта на специализирани електромери за постоянен ток. При прилагане на този способ индивидуалната норма $e_{i,j}$ за i -тия тип ЕТС движещо се по j -тия маршрут става с използване на следната формула:

$$e_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^d (E_{i,j})_k \cdot 10^3}{\sum_{k=1}^d (m_{br i,j} \cdot s_{i,j})_k}, \quad (10)$$

където:

$(E_{i,j})_k$ е абсолютният разход на електроенергия за движение на i -тия тип ЕТС по j -тия маршрут за k -тото измерване, kWh;

$(m_{br i,j} \cdot s_{i,j})_k$ – превозната работа на i -тия тип ЕТС по j -тия маршрут за периода k -тото измерване ($m_{br i,j}$ е средната брутна маса, t; $s_{i,j}$ е пробега, km), t.km;

d – брой на проведените измервания, бр.

Точността на определяне на индивидуалните норми с използване на този метод е по-висока, тъй като изследванията се провеждат в реални експлоатационни условия и практически се отчитат всички влияещи фактори.

3. МЕТОД ЗА ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ОБЩИЯ РАЗХОД НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ ЗА ТЯГОВИ НУЖДИ НА ГРАДСКИЯ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТРАНСПОРТ

Чрез представената методика се изчисляват само индивидуалните норми за специфичен експлоатационен разход на енергия на различните типове ЕТС, обслужващи даден транспортен маршрут. Общият разход на електрическа енергия за тягови нужди E_{Σ} , който се отчита на шини Ср.Н. в ТИС, включва: енергия за маршрутно движение; енергия за нулеви пробежи; енергия за маневрено движение в депо; енергия за служебен пробег; загуби на енергия в тяговата храняща система; собствени нужди на ТИС. Този разход се изчислява по формулата:

$$E_{\Sigma} = \left\{ \sum_{j=1}^m K_{\sigma} \left[\sum_{i=1}^n e_{i,j} \cdot (m_{br i,j} \cdot s_{i,j})_{\Sigma} \right] \right\} \cdot k_{loss} + \sum_{q=1}^{sm} E_{S q} + \sum_{r=1}^{ts} E_{RS r}, \quad (11)$$

където:

K_{σ} е коефициент отчитащ текущи отклоненията от нормите за j -тия маршрут през даден период на планиране (определя се чрез статистико-аналитични методи);

$(m_{br\ i,j} \cdot s_{i,j})_{\Sigma}$ – сумарна превозната работа на i -тия тип ЕТС по j -тия маршрут за плановия период, t.km;

SE_S – сумарен разход на енергия за спомагателно движение на ЕТС, kWh;

SE_{RS} – сумарен разход на енергия за собствени нужди на ТИС, kWh.

Коефициентът k_{loss} се определя на база експериментални измервания за тока и напрежението в токоизправителните станции. Разполагайки с данни за дължините на секциите на контактната мрежа, сечението и дължината на кабелните фидери и технически параметри на тяговите трансформатори и токоизправители, чрез използване на аналитични зависимости се определя средната загуба на енергия ΔE в електроснабдителната система на ГЕТ, а оттам и стойността на $k_{loss} = 1 + \Delta E / E_{\Sigma}$.

Енергията за спомагателно движение (нулеви пробези, маневрено движение, служебен пробег) се изчислява по отделни норми за специфичен разход на ЕТС (определени експериментално) и въз основа на планираните пробези за съответната дейност.

Енергията за собствени нужди на ТИС се определя на база реални измервания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представената методика е разработена за експериментално приложение в „Столичен електротранспорт“ ЕАД. Като цяло предстои тя да бъде алгоритмизирана и разработена като компютърна програма. Ако последната бъде обвързана и с получаване на актуални експлоатационни данни, тя може да се изгради като автоматизирана система за енергийни разчети. Последното е технически реализуемо, тъй като в момента към „Център за градска мобилност“ в гр. София има изграден диспечерски център за събиране на информация в реално време за пробегата, времепътването и престоите на всяка отделна транспортна единица.

Точността на предлаганата методика до голяма степен зависи от коректното определяне на базовите норми, корекционните коефициенти и пътникопотоците, които следва периодично да се актуализират в съответствие с променящите се експлоатационни условия. За тази цел е необходимо в поне една транспортна единица от всеки тип да бъдат инсталирани електромери за постоянен ток.

В заключение може да се отбележи, че методиката е приложима както при оперативно (дневно и почасово) планиране на електроенергийното потребление на ГЕТ, така и за оценка на енергийните разходи при проектиране на нови маршрути. За нейното успешно използване в практиката е необходимо да се проведат необходимите тестови пробези с всички типове трамвайни мотриси и тролейбуси, експлоатирани в гр. София и другите градове с електротранспорт у нас. Получените експериментална база от данни и изчислителни резултати могат да се използват и при извършване на обследвания и планиране на мероприятия за повишаване на енергийната ефективност на наземния градски електрически транспорт.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Българанов Л. Б., Електрически транспорт, София, 2004 г.
- [2] Българанов Л. Б., Т. И. Йонов, Ръководство за проектиране по електрически транспорт, София, 2001 г.
- [3] Минков П. Т., Електрическа тяга, София, 1988 г.
- [4] Методическите указания по планирано, учето разхода електрической енергии трамвайным и троллейбусным транспортом и рекомендации по экономии

электроэнергии Р-29-284702-0365-96, Министерство транспорта Российской Федерации, Федеральная автомобильно-дорожная служба, 1996 г.

[5] Розенфельд В. Е., И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров, Теория электрической тяги, Транспорт, Москва, 1995 г.

[6] Francesco De Gennaro, ATM Milan Trolleybuses – Main Features and Experiences, Azienda Trasporti Milanese S.p.A., 2010

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

Докладът е рецензиран.

