

УДК 629.433

В.Б. Будниченко¹, В.Х. Далека², В.М. Шавкун²¹Національний транспортний університет, Київ²Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПІДХОДУ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГОНОСІЯ ТРАМВАЙНИМ ВАГОНОМ

Спрямованість на підвищення конкурентоспроможності міського електричного транспорту за рахунок якості рухомого складу є пріоритетним шляхом розвитку транспортної системи в містах України. Тому, розробка концептуального підходу до визначення техніко – експлуатаційних властивостей рухомого складу на його життєвому циклі є актуальною і важливою задачею, як для транспортних систем міст так і транспортної системи держави.

Ключові слова: трамвай, енергоносій, перегон, електроенергія, енергозбереження, метод, стандарт, точність, однозначність.

Постановка проблеми

Енергозбереження в Україні визнано одним із пріоритетних напрямків економічного розвитку держави. Особливо це відноситься до електротранспорту, енергоємність якого ще висока. Тому для нормування споживання електроенергії, оцінки режимів руху та окремих типів рухомого складу необхідно мати методи визначення витрат електроенергії транспортними засобами, які забезпечують необхідну точність і однозначність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемі конкурентоспроможності рухомого складу міського електротранспорту за рахунок підвищення рівня енергозбереження присвячені роботи вітчизняних вчених. Зокрема, питанню техніко-експлуатаційних властивостей електричного рушія трамвайних вагонів і тролейбусів, присвячені роботи Л.В. Збарського, В.Х. Далеки, Е.І. Карпушина, В.О. Шматкова, П.М. Пушкова, М.В. Хвороста; гальмівних систем Г.П. Щербини, В.П. Веклича.

Мета роботи

Теоретичне обґрунтування методу визначення витрат енергоносія трамвайним вагоном.

Але на сьогоднішній день повністю не вирішено проблему енергозбереження на електротранспорті, зокрема, концептуальний підхід до визначення витрат енергоносія трамвайним вагоном.

Виклад основного матеріалу

Серед чинних нормативних документів тільки ГОСТ 8802 регламентує метод визначення витрат електроенергії трамвайним вагоном суть якого полягає у виконанні вимірювань на нормованому перегоні довжиною 350 м за умов, що швидкістю

сполучення дорівнюється 25 км/год та наявні 10% запас часу на відновлення графіку руху і 10 с часу перебування на зупинці.

Типова крива руху $V(t)$ наведена на рисунку 1 і передбачає три режими руху:

- рух під тягою до швидкості V_1 ;
- вільний рух без тяги до швидкості V_2 ;
- гальмування транспортного засобу.

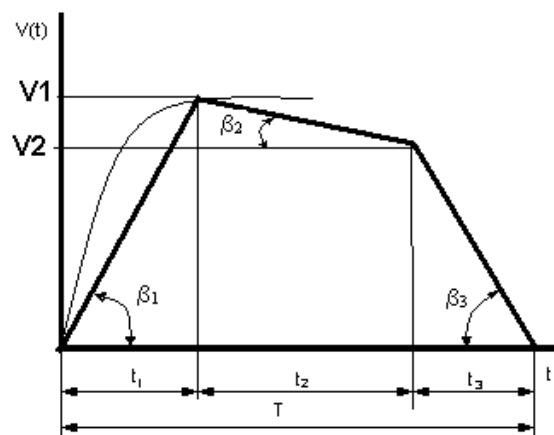


Рис. 1 Типова крива руху

Ряд вимірювань витрат електричної енергії, що виконувалися під час приймальних випробувань вітчизняного рухомого складу засвідчив про наявність проблем в застосуванні регламентованого стандарту методу [1,2]. Однією із проблем було неможливість отримання однозначного результату, хоча умови, визначені стандартом були витримані.

Для визначення причин, що ускладнюють здійснення оцінки енерговитрат трамвайним вагоном теоретично розглянемо деякі аспекти застосування цього методу.

З метою спрощення викладок заміномо типову криву руху на діаграмі у вигляді трапеції. Тоді час руху на нормованому перегоні з урахуванням 10%

запасу часу на відновлення графіку руху можна визначити із системи рівнянь 1

$$\begin{cases} T + \frac{k \times T}{100} + t_c = T_c \\ \frac{3,6 \times L}{Vc} = T_c \end{cases} \quad (1)$$

де L – довжина нормованої ділянки перегону, м;
 Vc – середня швидкість сполучення, км/год;
 T – час руху по перегону, с;
 k – нормативне значення запасу часу на відновлення графіку руху, %;
 t_c – тривалість перебування на зупинці, с;
 T_c – час сполучення, с.

Звідки, час руху безпосередньо на перегоні буде дорівнювати:

$$T = \frac{3,6 \times L - t_c \times Vc}{\left(1 + \frac{k}{100}\right) \times Vc} = 35,45 \text{ с} \quad (2)$$

З іншого боку, при відомих значеннях прискорення за час руху під тягою β_1 , сповільнення β_2 , β_3 під час вільного руху та гальмування значення часу рух буде дорівнюватися:

$$T = \frac{V_1}{\beta_1} + \frac{V_1 - V_2}{\beta_2} + \frac{V_2}{\beta_3} \quad (3)$$

де V_1 , V_2 – швидкості переходу з одного режиму на інший, м/с.

Рівняння 3 має дві невідомі складові V_1 , V_2 , що потребує додаткового рівняння, яке отримуємо із умови, що за цей час трамвайний вагон подолає відстань, яка дорівнюється нормованій дожині перегону:

$$L = 0,5 \times \left(\frac{V_1^2}{\beta_1} + \frac{V_2^2}{\beta_3} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{\beta_2} \right) \quad (4)$$

Тоді значення швидкостей трамвайного вагону при яких здійснюється перехід з одного режиму руху на інший можна знайти із системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{V_1}{\beta_1} + \frac{V_1 - V_2}{\beta_2} + \frac{V_2}{\beta_3} = T \\ 0,5 \times \left(\frac{V_1^2}{\beta_1} + \frac{V_2^2}{\beta_3} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{\beta_2} \right) = L \end{cases} \quad (5)$$

Для спрощення рішення системи рівнянь 5 розглянемо складову $\frac{V_1 - V_2}{\beta_2}$, що є часом вільного

руху і сповільнення вагона за цей період можна визначити відповідно до формули:

$$\beta_2 = \frac{9,8w_0}{1000} = (42,14 + 0,03528V^2) / 1000 \quad (6)$$

де w_0 – питомий опір руху, кг/т.

В діапазоні швидкостей від 35 км/год до 45 км/год середнє значення сповільнення трамвайного вагона буде дорівнюватися $0,099 \text{ м/с}^2$, а зменшення швидкості за час період руху буде складати всього 1,6 км/год, або 4,1% від середньої швидкості руху вагона.

При наявності засобів вимірювальної техніки з похибкою вимірювання 5 % можна вважати, що отримана різниця швидкостей для трамвайного вагона не перевищує похибку вимірювання, тобто можна вважати, що $V_1 \cong V_2 = V$.

Для трамвайного вагона сповільнення прямо пропорційні величині струму тягового двигуна при цьому струм двигуна при гальмування електродинамічним гальмом завжди менше пускового струму із за обмеження по комутації. Тоді $\beta_3 = k\beta_1$, де $k < 1$.

На підставі вищезазначений міркувань, систему рівнянь 5 можна записати у спрощеному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{1+k}{k\beta_1} V + tv = T \\ \frac{0,5(1+k)}{k\beta_1} V^2 + tvV = L \end{cases} \quad (7)$$

де: tv – час перебування трамвайного вагону в режимі вільного руху, с.

Звідки:

$$V = \frac{k \div \beta_1 \times T \pm \sqrt{k^2 \times \beta_1^2 \times T^2 - 2k \times (1+k) \times \beta_1 \times L}}{2} \quad (8)$$

$$tv = T - \frac{1+k}{k \times \beta_1} \times V \quad (9)$$

Упевнимся, що підкореневий вираз не є від'ємним, шляхом вирішення наступної нерівності:

$$\beta_1^2 - \beta_1 \times \frac{2 \times (1+k) \times L}{k \times T^2} \geq 0 \quad (10)$$

Параметри T та L є константами які не залежать від конструктивних особливостей трамвайного вагона, в той час як β_1 залежить від його конструкції, тобто нерівність 10 необхідно вирішувати відносно показника β_1 . Рішення нерівності 10 має вигляд:

$$\beta_1 \geq 0,557013 \times \frac{(1+k)}{k} \quad (11)$$

Невиконання умови 11 означає, що неможливо забезпечити виконання вимог стандарту щодо швидкості сполучення та 10% запасу на відновлення графіку руху бо система рівнянь 7 не буде мати рішення.

Мінімальні значення прискорення для яких можливо забезпечити вимоги до умов руху при $k \in \{0,7-0,9\}$ лежать в межах від $1,2 \text{ м/с}^2$ до $1,8 \text{ м/с}^2$. Одночасно визначимо, що максимальне значення прискорення також має обмеження, яке визначається коефіцієнтом зчеплення колеса з рейкою і відповідно до норм проектування дорівнюється $1,8 \text{ м/с}^2$.

Вирішуючи рівняння 9 при певних значеннях швидкості можна отримати від'ємне значення часу вільного руху, що є недопустимим. Для уникнення цього визначимо умови, коли час вільного руху буде мати позитивне рішення, шляхом перетворення рівняння 9 в нерівність при $k=1$, тоді:

$$V < \frac{T\beta}{2} \quad (12)$$

З урахуванням рівняння 8, нерівність 12 буде мати вигляд:

$$\pm \sqrt{\beta^2 \times T^2 - 4\beta \times L} < 0, \quad (13)$$

що можливо тільки при від'ємному знаку перед коренем, тоді рівняння 8 треба записати так:

$$V = \frac{k \times \beta_1 \times T - \sqrt{k^2 \times \beta_1^2 \times T^2 - 2k \times (1+k) \times \beta_1 \times L}}{2} \quad (14)$$

На рисунках 2, 3 показані криві залежності часу вільного руху та швидкості переходу з одного режиму на інший в залежності від сповільнення для різних співвідношень гальмівного та пускового струмів тягового двигуна, які розраховані за формулами 14 та 9.

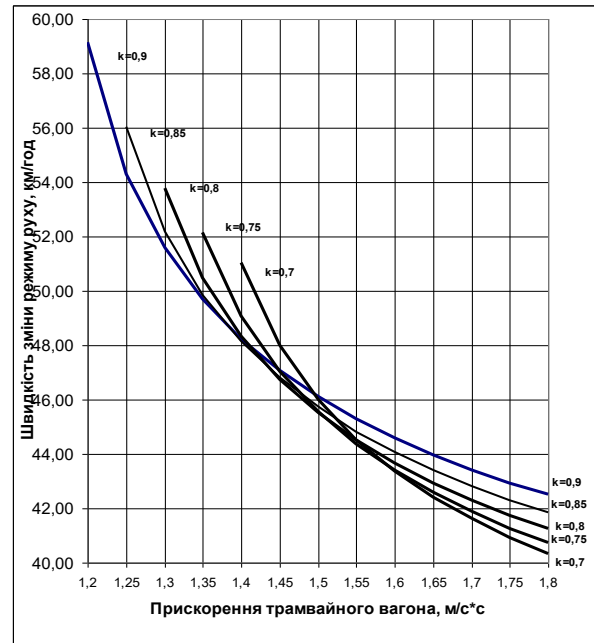


Рис.2. Залежність швидкості зміни режиму руху від сповільнення трамвайного вагона

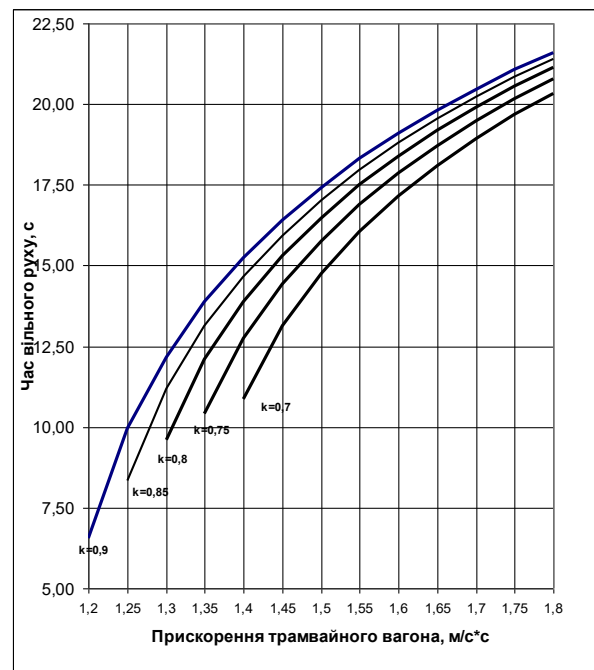


Рис. 3. Залежність часу вільного руху від сповільнення трамвайного вагона

Як видно із наведених рисунків існує безліч варіантів руху на нормованому перегоні за яких забезпечується середня швидкість сполучення та 10% запас часу на відновлення графіку руху. Єдиною умовою, коли не можливо забезпечити нормований режим руху на перегоні це неможливість забезпечити прискорення вагону більше ніж $1,2 \text{ м/с}^2$.

Розглянемо витрати енергії під час руху на нормованому перегоні за нормованих умов руху. В загальному випадку, витрати енергії під час руху на перегоні дорівнюють:

$$A = \frac{r \times m \times V^2}{2} + N \times T \quad (15)$$

де: r – коефіцієнт, що враховує втрати енергії в приводі трамвайного вагону у тому числі і в контактні колеса з рейкою, $r > 1$;

m – маса трамвайного вагону, кг;

N – потужність споживачів власних потреб, Вт.

Мінімальні витрати енергії під час руху на перегоні можна винайти шляхом рішення наступного рівняння, до якого входять усі складові, що характеризують конструкцію трамвайного вагону.

$$d \left(\frac{r \times m \times \left(k \times T \times \beta_1 - \sqrt{k^2 \times T^2 \times \beta_1^2 - 2k \times (1+k) \times \beta_1 \times L} \right)^2}{2} + N \times T \right)_{d\beta_1} = 0 \quad (16)$$

або :

$$d \left(k \times T \times \beta_1 - \sqrt{k^2 \times T^2 \times \beta_1^2 - 2k \times (1+k) \times \beta_1 \times L} \right)_{d\beta_1} = 0 \quad (17)$$

Рішення цього рівняння для різних значень (див. рисунок 5) свідчить, що мінімальні витрати енергії очікуються при максимальному значенні прискорення трамвайного вагону при будь яких значеннях k .

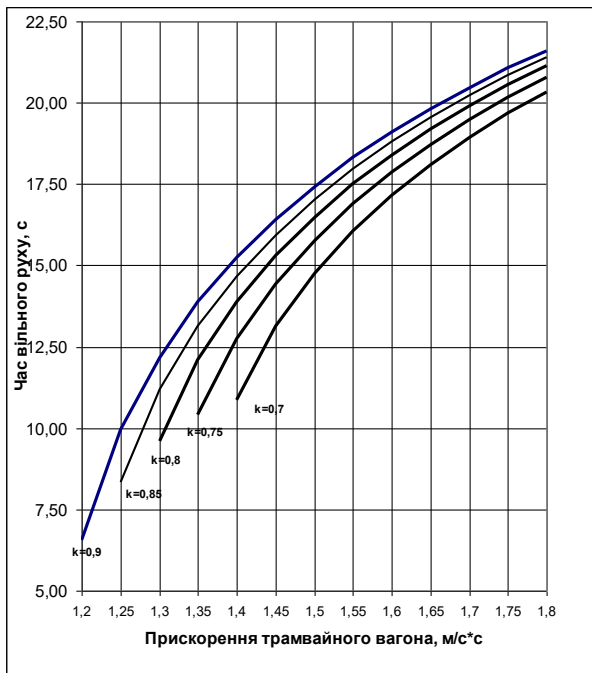


Рис. 4. Час вільного руху в залежності від значення сповільнення (прискорення) для різних співвідношень пускового та гальмівного струмів.

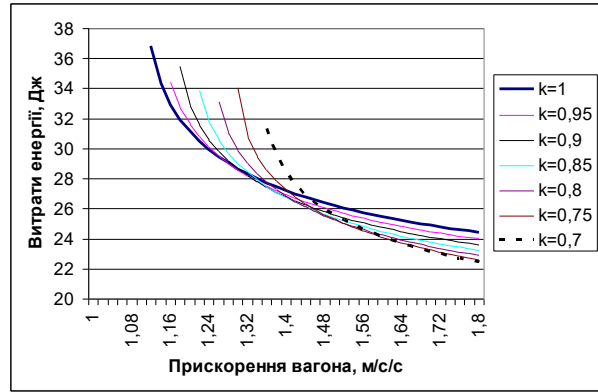


Рис. 5. Залежність витрат енергії від прискорення трамвайного вагону

Таким чином, при використанні методу, що регламентований ГОСТ 8802 завжди необхідно робити розгін трамвайного вагону на максимальний уставці струму, і за визначеною граничною швидкістю на підставі експериментального підтвердження тягових швидкісних характеристик трамвайного вагону.

Отримане таким чином значення витрат енергії буде характеризувати досконалість конструкції трамвайного вагону в частини витрат енергії.

Для перевірки можливості застосування визначеної за вимогами ГОСТ 8802 питомої норми витрат для цілей планування виконаємо теоретичний розрахунок питомих витрат для трамвайного вагону типу КТМ 5МЗ та на підставі, що наведені в його технічній документації [3-5]:

- прискорення вагону під час розгону від 1,2 м/с² – до 1,4 м/с²;
- співвідношення гальмівного та тягового струмів – 1;
- кількість крісел пасажирів – 35;
- кількість пасажирів, що стоять при номінальному навантаженні – 88;
- споряджена маса трамвайного вагону – 18,65 т;
- потужність двигуна приводу генератора власних потреб – 2,8 кВт.

Визначаємо швидкість до якої повинен бути розігнаний вагон:

$$V = \frac{1 \times 1,3 \times 35,45 - \sqrt{1,3^2 \times 35,45^2 - 4 \times 1,3 \times 350}}{2} = 14,32 \text{ м/с} = 51,5 \text{ км/ч}$$

Для розрахунку питомих витрат енергії приймаємо, що коефіцієнт її втрат дорівнюється 1, а потужність власних потреб дорівнюється 0.

$$a = \frac{A}{M \times L \times 3600} = \frac{r \times m \times V^2}{2M \times L \times 3600} + \frac{N \times T}{M \times L \times 3600} = 84,4 \text{ Вт} \times \text{час/т} \times \text{км},$$

де M – маса вагону, т.

Порівняємо отримане значення питомих витрат з фактичними даними, що отримані на підставі статистичних даних по містах України, які мають трамвайний транспорт (Єнакієве, Дружківка, Конотоп, Євпаторія), і в яких, як правило, знаходяться в експлуатації вагони типу КТМ 5МЗ.

Питомі витрати електричної енергії за кожний рік були розраховані відповідно до формули:

$$a_i = \frac{A_i}{L_i \times M} \times l_n \quad (18)$$

де A_i – статистичні данні щодо витрат електричної енергії на пасажирські перевезення, Вт×год;

L_i – транспортна робота, км;

l_n – нормативне значення довжини перегону, 0,35 км;

M – маса трамвайного вагона при номінальному навантаженні, кг.

На підставі отриманих даних розраховувалося середнє значення питомих витрат:

$$a_{cp} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z a_i \quad (19)$$

де z – кількість років за які надані статистичні данні.

Як видно із рисунка 6 фактичні значення питомих витрат електричної енергії значно відрізняються від нормативного значення, встановленого стандартом і складають від 18% до 39% нормативного значення. Причинами такого відхилення може бути значно менші швидкість сполучення, навантаження вагону та середня довжина перегону [6-10].

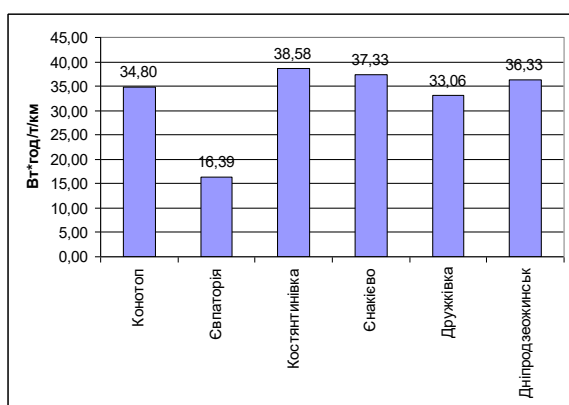


Рис. 6. Середнє значення питомих витрат енергії

Висновки

Таким чином, значення витрат електричної енергії визначене за методом встановленим ГОСТ 8802:

- не можливе для прямого використання з метою визначення витрат електричної енергії в експлуатації і потребує виконання додаткових досліджень з метою додаткових корегувальних коефіцієнтів, що враховують умови експлуатації в кожному місті України.

- призначено для вирішення задачі порівняння різних конструкцій трамвайних вагонів.

Основним недоліком регламентованого ГОСТ 8802 методу визначення витрат електричної енергії трамвайним вагоном є відсутність умови або умов які дозволяють реалізувати один режим руху на перегоні, за яким витрати енергії будуть мінімальні.

Таким чином, для забезпечення об'єктивних умов оцінки витрат електроенергії трамвайним вагоном необхідно виконати наукове обґрунтування раціонального режиму руху на нормованому перегоні.

Література

1. Карпушин Е. І. Енергозберігаюче керування рухомою одиницею міського електротранспорту на простому перегоні [Текст] / Е. І. Карпушин // Сб. Коммунальное хозяйство городов. – К. : Техніка. – 2003. – № 53 С. 142-146.
2. Карпушин Е. І. Застосування моделювання руху для визначення мінімуму механічної роботи про проходженні заданого перегоні [Текст] / Е. І. Карпушин // Вести Нац. техн. ун-та «ХПИ» Вип. 14. – Харків. «ХПИ», 2001. – С. 305 – 307.
3. Вагон трамвайный модели 71-605. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Ордена трудового красного знамени и «Знак почета» Усть – Катавский вагоностроительный завод им. Кирова, Челябинск, 1986, 80 с.
4. Нормы проектирования трамвайных вагонів.
5. ГОСТ 8802-78 Вагоны пассажирские. Технические условия. Введ.01.01.79 [Текст] – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 10 с.
6. Далека В.Х. Наукові основи ресурсозбереження при експлуатації міського електричного транспорту. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 07.02.05/НТУ. –К. : 2005. – 35 с.
7. Далека В.Х., Левковець П.Р., Будниченко В.Б. Концептуальний підхід до формування системної моделі функціонування міського електротранспорту//Вісник національного технічного університету «ХПИ» вип 10.–Харків.: «ХПИ», 2006, С.97-104
8. Концепція керування гальмами трамвайного вагона /В.Б.Будниченко //Сб.научн.трудов ДНУЖТ.–2004.–С .
- 9.Liu, R. Modelling Urban Bus Service and Passenger Reliability / R. Liu, S. Sinha [Electronic resource] // Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK.– www.its.leeds.ac.uk/software/dracula/downloads/– P.2.
10. Gaignon H. Statistical Analysis of Management Data [Text] / H. Gaignon. – Springer Science & Business Media. – 2010.– 388 p.

References

1. Karpushyn E. I. energy Saving control of the movable unit of the city electric transport on a simple stage [Text] / E. I. Karpushin, in proc. Communal services of cities. – K. : Technique. – 2003. – No. 53 Seconds. 142 to 146.
2. The Karpushin, E. I. Use motion simulation to determine the minimum mechanical work on passing the stretch specified [Text] / E. I. Karpushin // Vesti NAT. tech. University "KHPI" Vol. 14. – Kharkov. "KPI", 2001. – S. 305 – 307.
3. The car tram model 71-605. Technical description and operating instructions. The order of the red banner and "Badge of honor" Ust – Katavsky railcar plant. Kirov, Chelyabinsk , 1986, 80s.
4. The design standards of tram cars.
5. GOST 8802-78 passenger Cars. Specifications. Enter.01.01.79 [Text] – M. : Publishing house of standards, 1978. 10 С.
6. Distant W. H. Scientific basis of resource-saving in urban electric transport. Author. dis. ... d-RA tekhn. Sciences: 07.02.05/STS. –K. : 2005. – 35 S.
7. Far B. H., Levkovets P. G., V. Budnichenko. Conceptual approach to formation of system models of the functioning of city electric transport//Bulletin of national technical University "KHPI" No. 10. – Kharkov.: "KHPI", 2006, Pp. 97-104
8. The concept of managing the brakes of a tram car /V.A.Budnichenko //Proc.sci.works of DOIT.–2004.–With .
9. Liu, R. Modelling Urban Bus Service and Passenger Reliability / R. Liu, S. Sinha [Electronic resource] // Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK.– www.its.leeds.ac.uk/software/dracula/downloads /– P. 2.
10. Gatignon H. Statistical Analysis of Management Data [Text] / H. Gatignon. – Springer Science & Business Media. – 2010. – 388 p.

Автор: БУДНИЧЕНКО Валерій Борисович
кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, м. Київ
E-mail – budnv@bigmir.ru

Автор: ДАЛЕКА Василь Хомич
доктор технічних наук, професор кафедри, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – dalekavf@ukr.net

Автор: ШАВКУН Вячеслав Михайлович
кандидат технічних наук, старший викладач кафедри, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова.
E-mail – shavkun1977@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАТРАТ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ ТРАМВАЙНЫМ ВАГОНОМ

В. Б. Будниченко, В. Ф. Далека, В. М. Шавкун

Направленность на повышение конкурентоспособности городского электрического транспорта за счет качества подвижного состава является приоритетным путем развития транспортной системы в городах Украины. Поэтому, разработка концептуального подхода к определению технико – эксплуатационных свойств подвижного состава на его жизненном цикле является актуальной и важной задачей, как для транспортных систем городов так и транспортной системы государства.

Ключевые слова: трамвай, энергоноситель, перегон, электроэнергия, энергосбережение, метод, стандарт, точность, однозначность.

RATIONALE FOR A CONCEPTUAL APPROACH TO DETERMINATION OF COSTS ANARGNOSTES TRAM CAR

V. Budnichenko, V. Daleka, V. Shavkun

Transport is one of the most important branches of social production and is designed to meet the needs of the population and social production in transportation. The urban electric transport is part of the unified transport system of Ukraine and according to the Law of Ukraine "On transport" shall meet the requirements of the public production and national security, have extensive infrastructure to provide all transport services. Especially important is the problem of priority development of urban electric transport becomes in the new economic conditions, which are determined by the market environment, where there is rapid growth in the use of road transport for passenger services in the cities of Ukraine, while oil reserves are limited not only in Ukraine but all over the World. Road transport is one of the largest polluters and consumers of energy resources, while the urban electric transport remains the most effective, economical, environmentally friendly and affordable means of transport, its services are used by most of the population of any city. However, the status of urban electric transport, especially in terms of rolling stock, is defined as a crisis. The objective necessity of overcoming of the crisis phenomena in the provision of urban electric transport rolling stock require new approaches to determine their technical and performance properties at all stages of their life cycle, thereby increasing the competitiveness of urban electric transport in market conditions. Focus on improving the competitiveness of the city electric transport at the expense of quality of rolling stock is a priority through the development of the transport system in the cities of Ukraine. Failure, and in many cases and the lack of scientific study of these issues is one of the main factors of backwardness of the quality of domestic rolling stock from world class. Therefore, the development of a conceptual approach to the definition of technical and operational properties of the rolling stock on its life cycle is a relevant and important task for urban transportation systems and transport systems of the state.

Keywords: tram, energy, distillation, electricity, energy, method, standard, precision, unambiguity.