

## ПЛАНИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**В.Б. Будниченко, доцент, к.т.н., НТУ**

**В.Ф. Далека, профессор, д.т.н.,**

**В.М. Шавкун, ст. преподаватель, к.т.н., ХНУГХ имени А.Н. Бекетова**

***Аннотация.** Рассматриваются вопросы энергосбережения на электрическом транспорте и планирование объемов потребления электроэнергии, а также определения объективных нормативов, в частности значения удельных затрат, для конкретного типа подвижного состава.*

***Ключевые слова:** энергосбережение, электротранспорт, эксплуатация, удельные затраты, электроэнергия, статистические данные.*

## ПЛАНУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ ЗА ДАНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

**В.Б. Будниченко, доцент, к.т.н., НТУ,**

**В.Х. Далека, професор, д.т.н.,**

**В.М. Шавкун, ст. викладач, к.т.н., ХНУМГ імені О.М. Бекетова**

***Анотація.** Розглядаються питання енергозбереження на електричному транспорті та планування об'ємів споживання електроенергії, а також визначення об'єктивних нормативів, зокрема значення питомих витрат, для конкретного типу рухомого складу.*

***Ключові слова:** енергозбереження, електротранспорт, експлуатація, питомі витрати, електроенергія, статистичні дані.*

## PLANNING OF ELECTRICITY CONSUMPTION FOR THE ELECTRIC VEHICLE ACCORDING TO THE OPERATION

**V. Budnichenko, professor, cand. eng. sc., NTU,**

**V. Daleka, professor, dr. eng. sc.,**

**V. Shavkun, senior lecturer, cand. eng. sc., KhNUME named after A.N. Beketov**

***Abstract.** The issues of energy saving in electric transport is the planning of energy consumption, as well as the definition of objective standards, in particular the values of the specific costs for a particular type of rolling stock composition.*

***Keywords:** energy conservation, electric vehicle, operation, unit costs, electricity, statistics.*

Вступ	
Проблема енергозбереження на електричному транспорті, який відноситься до енергомістських споживачів, потребує вирішення ряду актуальних завдань.	Особливо важливо наряду з вирішенням технічних питань приділити значну увагу до планування обсягів споживання електроенергії, тобто встановлення об'єктивних нормативів, зокрема її питомих витрат.

Експериментальне визначення, тобто за даними експлуатації, питомих витрат електроенергії дозволяє встановити значення цього показника для конкретного типу рухомого складу.

### Аналіз публікацій

Проблемі конкурентоспроможності рухомого складу міського електротранспорту за рахунок підвищення рівня енергозбереження присвячені роботи вітчизняних вчених. Зокрема, питанню техніко-експлуатаційних властивостей трамвайних вагонів і тролейбусів, присвячені роботи Р.П. Левковця, В.Х. Далеки, Е.І. Карпушина, В.Б. Будниченка, В.В. Скалозуба, М.В. Хвороста [2-5].

### Мета роботи

Визначення базового значення показника питомих витрат електроенергії для кожного міста України, який потребує додаткового визначення коригувальних коефіцієнтів, та врахування місцевих умов експлуатації рухомого складу.

### Виклад основного матеріалу

Визначення коригувальних коефіцієнтів потребує значного часу і надання об'єктивного статистичного матеріалу, щодо умов руху. Тому для визначення норм витрат електричної енергії на пасажирські перевезення можливо застосувати інший шлях, який базується на статистичному аналізі інформації, що надається у звітах про роботу підприємств міського електротранспорту і накопичується у центральних органах управління.

Як правило усі підприємства міського електротранспорту ведуть облік витрат електроенергії та облік показників виконаної транспортної роботи (пробіг рухомого складу та обсяг перевезених пасажирів). Задача цього дослідження визначити яким методом можливо отримати значення питомих показників витрат електроенергії використовуючи ці статистичні дані.

Згідно статистичних даних центральних органів управління на даний час в Україні функціонують підприємства міського

електротранспорту, які експлуатують один (трамвай або тролейбус), або два види транспорту (трамвай і тролейбус).

Система енергопостачання в містах стосовно тягових підстанцій забезпечує одночасно живлення трамвая і тролейбуса тобто в загальному випадку тягова підстанція забезпечує одночасну подачу електроенергії на тролейбусні та трамвайні маршрути. На підставі цього, виділити окремо електроенергію, яка була використана для перевезення пасажирів трамваем та тролейбусом можливо тільки розрахунковим методом.

В зв'язку з цим, використання статистичних даних про витрати електроенергії окремо трамваем та тролейбусом для міст, які мають два типи транспорту неможливо так, як ці дані не є фактичними, а є розрахунковими, хоч і отримані за показаннями лічильників, встановленими на тягових підстанціях.

Якщо пробіг рухомого складу є завжди об'єктивно визначеною величиною, то загальний обсяг перевезених пасажирів, особливо у випадку даних щодо кількості пасажирів перевезених трамваем та тролейбусом є також розрахунковою величиною, що обумовлена використанням єдиного проїзного квитка на тролейбусному та трамвайному транспорті, а також і єдиного тарифу на разовий проїзний квиток.

Звідки витікає, що для визначення питомих витрат електроенергії можливо застосування тільки наступних статистичних даних [3-5]:

- загальний обсяг спожитої електроенергії;
- пробіг рухомого складу за видами транспорту;
- загальна кількість перевезених пасажирів.

Метод вирішення задачі базується на гіпотезі, що наш об'єкт дослідження є кібернетична система (рис. 1), яку при дослідженнях називають «Чорним ящиком».

Стрілка праворуч означає чисельну характеристику мети дослідження. Позначимо її буквою грек (Y) і назвемо її цільовою функцією, значення якої визначаються факторами, які діють на вході «Чорного ящика». Позначимо ці фактори буквою ікс (X).

Замінімо «Чорний ящик» математичною моделлю об'єкту дослідження. Наша математична модель є рівнянням (1), яке зв'язує цільову функцію з факторами.

Це рівняння в загальному вигляді має вид:

$$A = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

В загальному випадку кількість факторів, яка повинна бути включена в рівняння визначається кількістю типів рухомого складу, який експлуатується на підприємстві міського електротранспорту.



$L_{ТВ}$  – пробіг трамвайних вагонів;  $L_{ТР}$  – пробіг тролейбуса;  $\Pi$  – кількість перевезених пасажирів;  $A$  – витрати електроенергії

Рис.1. Схема «Чорного ящика»

На кожний тип рухомого складу повинні бути визначені пробіг та кількість перевезених пасажирів. Тоді загальна кількість факторів, які повинні бути включені до рівняння (1) визначається за формулою (2):

$$N = 2n + 1, \quad (2)$$

де:  $n$  – кількість типів рухомого складу.

Існуюча на Україні система звітності про роботу підприємств міського електротранспорту не передбачає надання інформації про пробіг рухомого складу та кількість перевезених пасажирів по кожному типу рухомого складу. Надається тільки інформація про пробіг та кількість перевезених пасажирів по видам транспорту (тролейбус та трамвай) та витрати електроенергії за цими видами транспорту. На перший погляд на підставі інформації наданої у звітах до центральних органів управління, можна визначити математичну модель окремо для кожного виду транспорту, але така можливість викликає сумнів у випадку, коли у місті перевезення пасажирів виконується двома видами міського електротранспорту. З чисто технічних міркувань електропостачання рухомого

складу не є окремим для цих видів транспорту, окремі тягові підстанції (не має значення усі чи тільки декілька) одночасно живлять тролейбусні і трамвайні маршрути. Тому, хоч у звітності і виділені витрати електроенергії окремо для видів транспорту, цей розподіл чисто розрахунковий ніж фактичний. Звідки випливає, що для міст України, які мають два види міського електротранспорту повинна бути одна математична модель витрат електроенергії, яка об'єднує ці види транспорту, що дасть можливість виключити помилки її розподілу між двома видами транспорту. Аналогічну картину ми маємо і в частині розподілу обсягів пасажирських перевезень між двома видами транспорту. На даний час, коли вартість разового квитка однакова для трамвая та тролейбуса, крім того існують проїзні квитки, розподіл перевезених пасажирів між видами електричного транспорту виконується розрахунковим методом.

На цій підставі нема сенсу окремо виділяти фактор «обсяг пасажирських перевезень», зокрема для трамвая та тролейбуса [2].

Таким чином, за кількістю факторів математична модель енерговитрат для кожного міста, яке має два типи електричного транспорту, повинна включати наступні фактори [1-3]:

- пробіг трамвайних вагонів ( $X_1$ );
- пробіг тролейбусів ( $X_2$ );
- загальний обсяг перевезених пасажирів ( $X_3$ ).

Для міста з одним типом електричного транспорту математична модель буде мати меншу кількість факторів:

- пробіг тролейбусів  $X_2$  (або трамвайних вагонів  $X_1$ ), тобто  $X_1=0$ ;
- загальний обсяг перевезених пасажирів ( $X_3$ ).

При розробленні місцевих комунальних норм щодо витрат електроенергії на перевезення пасажирів може бути застосована більша кількість факторів при умові, що об'єктивно визначається пробіг, кількість перевезених пасажирів та витрати електроенергії по кожному типу рухомого складу.

Математична модель витрат електроенергії з

урахуванням типу рухомого складу при необхідності може бути визначена не тільки в цілому для міста, а і по кожному маршруту, як вже було сказано вище, при умові наявності об'єктивних статистичних даних.

Незалежно від виду рівняння (1), яке буде прийнято за математичну модель нашого «Чорного ящика» можна визначити головну вимогу до неї, а саме: модель повинна давати мінімальну різницю між розрахованими по моделі витратами електроенергії і її фактичним значенням для заданих пробігу рухомого складу та кількістю перевезених пасажирів.

Встановлена умова виконується, при застосуванні методу найменших квадратів (надалі – МНК), який широко використовується в статистиці.

МНК дозволяє визначити коефіцієнти математичної моделі таким чином, щоб сума квадратів відхилень розрахункових витрат електроенергії від фактичних була мінімальною, тобто:

$$Z = \sum_n (A_p - A_\phi)^2 \Rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $A_\phi$  – фактичні витрати електроенергії;  $A_p$  – витрати електроенергії визначені за математичною моделлю;  $n$  – кількість даних із значеннями витрат електроенергії.

При наявності масиву даних про витрати електроенергії за декілька років можна висловити гіпотезу, що зв'язок між обсягом використаної електроенергії та пробігом і обсягом перевезених пасажирів є лінійною залежністю. Тоді функція повинна мати вид:

$$A_p = a_0 + \sum_{j=1}^{j=n} a_j X_j, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість факторів на вході «Чорного ящика».

Для підприємств міського електротранспорту, які експлуатують один вид транспорту  $n = 2$  (пробіг трамвая або тролейбуса), а при двох видах транспорту  $n = 3$ .

Мінімальне значення  $Z$  для обох типів підприємств можливо отримати вирішивши системи рівнянь [3-5]:

$$\begin{cases} \frac{dZ}{da_0} = 0 \\ \frac{dZ}{da_1} = 0 \\ \frac{dZ}{da_2} = 0 \\ \frac{dZ}{da_3} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

для підприємств з двома видами транспорту, або

$$\begin{cases} \frac{dZ}{da_0} = 0 \\ \frac{dZ}{da_1} = 0 \\ \frac{dZ}{da_2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

для підприємств з одним видом транспорту.

Виконуючи заміну  $A_\phi$  на  $Y_i$ , тобто  $Y_i$  це значення витрат електроенергії для конкретних значень  $X_{1i}$ ,  $X_{2i}$ ,  $X_{3i}$  (значення пробігу, перевезених пасажирів) та взявши частинні похідні за коефіцієнтами математичної моделі маємо наступні системи рівнянь:

$$\begin{cases} ma_0 + a_1 \sum_{i=1}^m X_{1i} + a_2 \sum_{i=1}^m X_{2i} = \sum_{i=1}^m Y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^m X_{1i} + a_1 \sum_{i=1}^m (X_{1i})^2 + a_2 \sum_{i=1}^m X_{2i} X_{1i} = \sum_{i=1}^m Y_i X_{1i} \\ a_0 \sum_{i=1}^m X_{2i} + a_1 \sum_{i=1}^m X_{1i} X_{2i} + a_2 \sum_{i=1}^m (X_{2i})^2 = \sum_{i=1}^m Y_i X_{2i} \end{cases} \quad (7)$$

для підприємств з одним типом транспорту:

$$\left\{ \begin{array}{l} ma_0 + a_1 \sum_{i=1}^m X_{1i} + a_2 \sum_{i=1}^m X_{2i} + \sum_{i=1}^m X_{3i} = \sum_{i=1}^m Y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^m X_{1i} + a_1 \sum_{i=1}^m (X_{1i})^2 + a_2 \sum_{i=1}^m X_{2i} X_{1i} + \sum_{i=1}^m X_{3i} X_{1i} = \sum_{i=1}^m Y_i X_{1i} \\ a_0 \sum_{i=1}^m X_{2i} + a_1 \sum_{i=1}^m X_{1i} X_{2i} + a_2 \sum_{i=1}^m (X_{2i})^2 + \sum_{i=1}^m X_{3i} X_{2i} = \sum_{i=1}^m Y_i X_{2i} \\ a_0 \sum_{i=1}^m X_{3i} + a_1 \sum_{i=1}^m X_{1i} X_{3i} + a_2 \sum_{i=1}^m X_{2i} X_{3i} + \sum_{i=1}^m (X_{3i})^2 = \sum_{i=1}^m Y_i X_{3i} \end{array} \right. \quad (8)$$

Вирішити системи рівнянь (7) та (8) можливо якщо усі елементи, які є значеннями витрат електроенергії та невизначених коефіцієнтів математичної моделі значень пробігу і обсягу пасажирських перевезень надати у вигляді матриць [3-5]:

$$Y = \begin{bmatrix} \sum Y - \sum X_3 \\ \sum YX_1 - \sum X_3 X_1 \\ \sum YX_2 - \sum X_3 X_2 \\ \sum YX_3 - \sum X_3^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

для підприємства з двома типами електротранспорту і

$$Y = \begin{bmatrix} \sum Y - \sum X_2 \\ \sum YX_1 - \sum X_2 X_1 \\ \sum YX_2 - \sum X_2^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

для підприємств з одним типом електротранспорту,

$$B = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

для підприємства з двома типами електротранспорту і

$$B = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

для підприємств з одним типом електротранспорту,

$$X = \begin{bmatrix} m & \sum X_1 & \sum X_2 \\ \sum X_1 & \sum (X_1)^2 & \sum X_2 X_1 \\ \sum X_2 & \sum X_1 X_2 & \sum (X_2)^2 \\ \sum X_3 & \sum X_1 X_3 & \sum X_2 X_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Тоді система рівнянь у матричному вигляді буде мати вид:

$$B \cdot X = Y, \quad (14)$$

а матриця коефіцієнтів може бути визначена:

$$B = Y \cdot B^{-1}, \quad (15)$$

де:  $B^{-1}$  обернена матриця до матриці  $B$

$$B \cdot B^{-1} = 1. \quad (16)$$

Таким чином визначення коефіцієнтів математичної моделі виконується шляхом вирішення матричного рівняння, при цьому математична модель буде задовольняти умові мінімальних відхилень розрахункових значень від фактичних.

Принциповим питанням при визначенні коефіцієнтів математичної моделі є кількість років за які використовується статистична інформація для побудови математичної моделі.

Мінімальна кількість років визначається кількістю коефіцієнтів, які входять у математичну модель, але для зменшення похибок, та забезпечення адекватності математичної моделі доцільно для розрахунків використовувати кількість років, яка не менша за подвійну кількість коефіцієнтів математичної моделі.

Згідно статистичних даних наданих органами центрального управління України був виконаний розрахунок коефіцієнтів математичної моделі витрат електроенергії для кожного міста України.

Оскільки точність прогнозування витрат електричної енергії залежить від значень діапазону зміни факторів, які входять у

рівняння, то додатково було визначено діапазон зміни факторів. При визначенні діапазону зміни факторів було прийнято, що мінімальне та максимальне значення фактора, при якому гарантується похибка визначення витрат електроенергії повинна бути в межах:

$$X_{\min} - 0,1X_{\min} < X < X_{\max} + 0,2X_{\max}$$

Похибка визначення витрат електроенергії також була розрахована за допомогою програми Microsoft Excel. Значення похибки розрахунку витрат електроенергії було розраховано для 95% рівня ймовірності за рівнянням:

$$\Delta_y = t_f S_y, \quad (17)$$

де  $t_f$  – значення критерію Стюдента для  $f$  ступенів свободи і 95% рівня ймовірності, яке визначалось за таблицею 1;

$S_y$  – стандартна похибка для оцінки значення витрат.

Таблиця 1 Критичне значення t – статистики для 5% рівня значимості

Число ступені в свободи, $f=m-k$	Значення t - критерію	Число ступені в свободи, $f=m-k$	Значення t - критерію
1	6.314	11	1.796
2	2.92	12	1.782
3	2.353	13	1.771
4	2.132	14	1.761
5	2.015	15	1.753
6	1.943	16	1.746
7	1.895	17	1.740
8	1.86	18	1.734
9	1.833	19	1.729
10	1.812	20	1.725

### Висновки

Отже, МНК в першу чергу дає можливість вирішувати питання мінімізації відхилень розрахункових значень від фактичних і якщо для цього необхідно мати від’ємне значення коефіцієнту впливу, то воно буде від’ємне.

Від’ємні значення коефіцієнтів математичної моделі свідчить про наявність значних похибок у визначенні значень, як правило, кількості перевезених пасажирів, а по деяким містам України і похибок у визначенні пробігу трамвайних вагонів та з меншою частотою і пробігу тролейбусів.

### Література

1. Ковалко М. П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк / Відпов. ред. Шидловський А. К. – К.: УЕЗ, 1998. – 503 с.
2. Скалозуб В. В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкції рухомого складу. Автореф. дис... д-ра тех. наук: 05.22.07/ДНУЗТ. – Дніпропетровськ. – 2003. –35 с.
3. Левковець П. Р. Системна ефективність на транспорті. Моделі і стратегії / П. Р. Левковець, Ю. П. Гедз, О. В. Канарчук, Г. Л. Кришан, М. Д. Сендак / Під редакцією П. Р. Левковця. – К.: НТУ, ІЕБТР. – 2002. – 216 с.
4. Будниченко В. Б. Планування потреби в електроенергії на експлуатацію міського електротранспорту за узагальненими статистичними даними / В.Б. Будниченко, В.Х. Далека, Е.І. Карпушин, М.В. Хворост // Сб. Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка. – 2001.– Вып. 30. – С. 249 – 254.
5. Далека В. Х. Наукові основи ресурсозбереження при експлуатації міського електричного транспорту: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.22 / Нац. транс. унів-т .–К. – 2005.-36с.

Рецензент: А.В. Гнатов, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла в редакцію 11.10.2015