

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТРАМВАЯМИ НА МАРШРУТАХ

Мокін Б.І., Розводюк М.П., Дудко В.Б.
Вінницький національний технічний університет

Вступ. Процес електроспоживання тим чи іншим об'єктом завжди цікавий як науковцям, так і працівникам з точки зору мінімізації енерговитрат. Зокрема це стосується і міського електротранспорту, в тому числі й трамваїв, рівень електроспоживання яких досить високий по відношенню до інших споживачів електричної енергії кожного міста. Оскільки дослідженнями в даному напрямку в Україні практично ніхто не займається, то дана тематика, з врахуванням постійного росту цін на електроенергію, є на сьогоднішній день та й майбутньому актуальною й перспективною.

Мета роботи. В роботах [1-3] вже отримані деякі результати щодо характеру електроспоживання трамваями на маршрутах м. Вінниці. Однак вихідними даними для дослідження була статистика, зібрана в той період, коли водіїв трамваїв лише привчали до економії електроенергії шляхом преміювання кращих. Це стало можливим після вдалого впровадження системи обліку електроенергії по кожному вагону й кожному водію трамвайного депо за рахунок розміщення лічильників електроенергії безпосередньо в вагоні та преміювання кращих водіїв (трамваї яких споживали менший рівень електроенергії по відношенню до середнього по депо). За цей період процес електроспоживання суттєво змінився. Це вимагає додаткових досліджень для адекватної ідентифікації даного процесу, що і є метою даної роботи, для вирішення якої потрібно:

- 1) здійснити статистичний аналіз та побудувати емпіричний закон розподілу споживання електроенергії трамваями;
- 2) синтезувати авторегресійні математичні моделі, що адекватно описували б процес електроспоживання трамваями;
- 3) розробити підхід до формалізації та автоматизації процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах, що й буде здійснено в даній роботі.

Матеріал і результати дослідження. Побудова емпіричного закону розподілу споживання електроенергії трамваями за годину. Для аналізу використовувалися усереднені статистичні дані споживання електроенергії трамваями типу КТ-4SU Вінницького трамвайно-тролейбусного управління помісячно (з 01.01.2005 р. по 31.05.2006 р). Середнє споживання електроенергії W трамваями за годину з конкретними значеннями w за вказаний період має такі числові значення:

$$w = \{40,93; 41,87; 38,76; 32,7; 32,89; 32,31; 31,88; 32,34; 32,76; 33,18; 36,78; 40,02; 41,14; 43,11; 36,50; 34,23; 33,94\}, \quad (1)$$

графічна інтерпретація яких приведена на рис. 1.

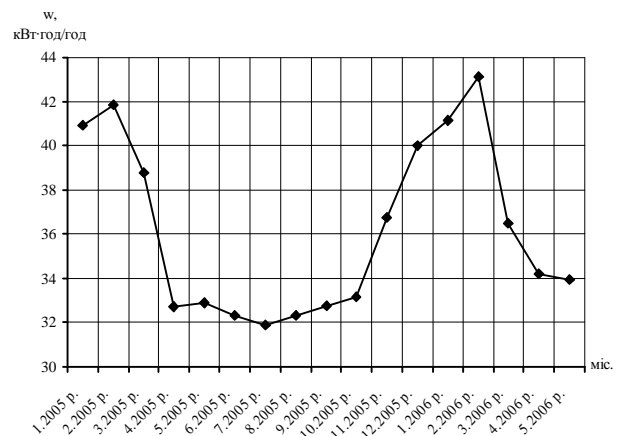


Рисунок 1 - Усереднені значення електроспоживання трамваями за годину по депо

В результаті розбиття ряду (1) на інтервали (табл. 1) та визначення необхідних частот $p_{(w)}$; попадань випадкової величини W в кожний із виділених інтервалів, отримано гістограму (рис. 2), зовнішній вигляд якої дозволив припустити, що процес споживання електроенергії трамваїв за годину підпорядковується логарифмічному нормальному закону розподілу у вигляді

$$f(\tilde{w}) = \frac{1}{s_{\tilde{w}} \sqrt{2p}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{w} - m_{\tilde{w}}}{s_{\tilde{w}}} \right)^2}, \quad (2)$$

$$\tilde{w} = 10 \lg w \quad (3)$$

із статистичними оцінками середнього значення $m_{\tilde{w}} = 15,56$, дисперсії $D_{\tilde{w}} = 0,22$ та середньоквадратичного відхилення $s_{\tilde{w}} = 0,47$.

**Таблиця 1 -
Варіаційний ряд вибірки електроспоживання
трамваями за годину**

i	σ_i	$n_{(w)i}$	$p_{(w)i}$
1	[31 – 33)	6	0,352
2	[33 – 35)	3	0,176
3	[35 – 37)	2	0,118
4	[37 – 39)	1	0,059
5	[39 – 41)	2	0,118
6	[41 – 43)	2	0,118
7	[43 – 45)	1	0,059
Сума		17	1

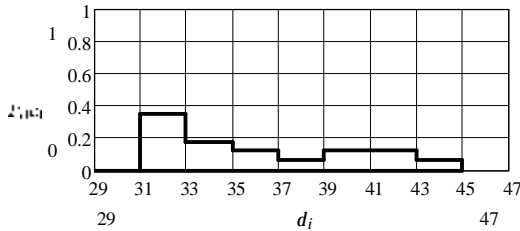


Рисунок 2 - Гістограма варіаційного ряду вибірки електроспоживання трамваями за годину

Для перевірки гіпотези за χ^2 -критерієм Пірсона розраховано статистику [4]

$$Q_{(\tilde{w})}^2 = \sum_{i=1}^{h(\tilde{w})} \frac{(n_{(\tilde{w})i}^* - m_{(\tilde{w})i})^2}{m_{(\tilde{w})i}}, \quad (4)$$

де $h(\tilde{w})$ – кількість інтервалів для випадкової величини \tilde{W} з ненульовим значенням частоти попадання в ці інтервали;

$n_{(\tilde{w})i}^*$ – i -те значення величини \tilde{W} ($i = 1, 17$)

з використанням функції нормального розподілу $\Phi(\tilde{w}_i)$ [4], де теоретична частота попадання значень \tilde{W} в кожен i -ий інтервал визначалася як

$$m_{(\tilde{w})i} = n_{(\tilde{w})i}^* \cdot P_{(\tilde{w})i}^*. \quad (5)$$

В результаті розрахунків отримано $Q_{(\tilde{w})}^2 = 2,43$, а кількість степенів свободи $g_{(\xi)}$ для неї (при кількості незалежних параметрів $r = 2$ і $h(\tilde{w}) = 5$) – $g_{(\xi)} = 2$. Задавшись рівнем значимості $\alpha = 0,1$ по таблиці χ^2 -розподілу Пірсона [4] знайдено критичну область для статистики $Q_{(\tilde{w})\text{кр}}^2 > 4,605$, що підтвердило гіпотезу про нормальний логарифмічний розподіл споживання електроенергії трамваями за годину.

Визначено і довірчі інтервали для статистичних оцінок нормального логарифмічного закону розпо-

ділу з довірчою імовірністю $g = 0,98$ з величиною $t_g = 2,58$ (відповідно до таблиці розподілу Стюдента [4]) і парою чисел $u_1 = 5,812$; $u_2 = 32,0$ (відповідно до таблиці χ^2 -розподілу Пірсона [4]):

$$\begin{aligned} 15,27 &\leq m_{\tilde{w}} \leq 15,85; \\ 0,11 &\leq D_{\tilde{w}} \leq 0,61; \\ 0,33 &\leq s_{\tilde{w}} \leq 0,78. \end{aligned} \quad (6)$$

Синтез авторегресійних математичних моделей процесу споживання електроенергії трамваями на маршрутах. Професійність водіїв суттєво сприяє зменшенню загального рівня електроспоживання трамваями на маршрутах, про що і свідчать реальні дані по Вінницькому трамвайному депо, ілюстровані рис. 3, на якому показано рівні електроспоживання $W_t^{(K)}$ трамвая, водій якого є одним з найкращих по депо, та середньостатистичний $W_t^{(C)}$ по депо за період із жовтня 2005 р. по травень 2006 р.

Для побудови математичної моделі споживання електроенергії трамваем, що характеризувала б кваліфікацію водія, використана авторегресія порядку p , яка для центрованого часового ряду \tilde{W}_t має вигляд:

$$\tilde{W}_t = f_1 \tilde{W}_{t-1} + f_2 \tilde{W}_{t-2} + \mathbf{K} + f_p \tilde{W}_{t-p} + a_t, \quad (7)$$

де $f_1, f_2, \mathbf{K}, f_p$ – коефіцієнти авторегресії порядку p ;
 a_t – імпульс білого шуму [5, 6].

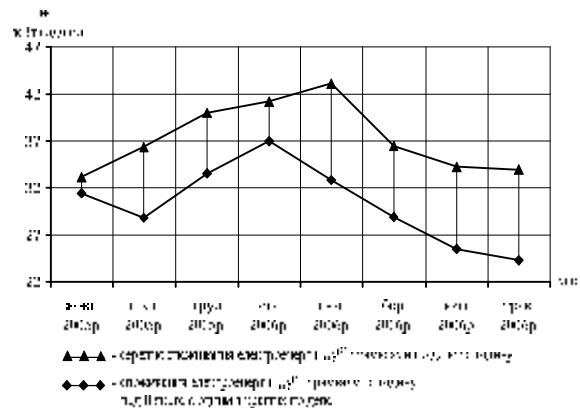


Рисунок 3 – Електроспоживання трамваями на протязі досліджуваного періоду

Коефіцієнти авторегресії f_1, f_2, \dots, f_p визначались за допомогою матричних рівнянь Юла-Уокера [5, 6]:

$$M_k \cdot \Phi_k = r_k, \quad (8)$$

де M_k – квадратна матриця розміром $(p \times p)$ значень коефіцієнтів автокореляції для часового ряду \tilde{W}_t ; Φ_k – матриця-стовпчик розміром $(p \times 1)$ коефіцієнтів f_k для рівняння авторегресії (7); r_k – матриця-стовпчик розміром $(p \times 1)$ коефіцієнтів автокореляції часового ряду \tilde{W}_t , які визначались як

$$r_k = \frac{g_k}{g_0}, \quad (9)$$

де g_k – коефіцієнти автоковаріації:

$$g_k = \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} \tilde{W}_t \tilde{W}_{t+k}, \quad (10)$$

де \tilde{W}_t – центрований часовий ряд:

$$\tilde{W}_t = W_t - m_t, \quad (11)$$

де m_t – тренд часового ряду W_t :

$$m_t = A_0 + A \sin(w(t-1) + y), \quad (12)$$

де A_0, A – середні значення й амплітуда синусоїди відповідно;
 w – частота:

$$w = \frac{2p}{T}, \quad (13)$$

де T – період ($T = 12$ місяців);

y – фаза (для вибраного ряду $y = 0$).

У виразі (12) параметр t зсунуто на одну одиницю назад через те, що відлік місяцям взято не з величини 0, а з 1. Коефіцієнти синусоїди A_0 й A можна знайти за стандартною процедурою методу найменших квадратів, закладеною в кожній версії Mathcad.

Дисперсія часового ряду W_t та дисперсія гаусового білого шуму a з нульовим середнім значенням визначались відповідно як

$$s_W^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (W_t - m_t)^2, \quad (14)$$

$$s_a^2 = s_W^2 - f_1 g_1 - f_2 g_2 - \mathbf{K} - f_p g_p, \quad (15)$$

а розв'язок рівнянь (8) Юла-Уокера [6] –

$$\Phi_p = M_p^{-1} r_p. \quad (16)$$

Використовуючи вище викладений алгоритм, синтезовано авторегресійні моделі для вибраного часового ряду у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{W}_t^{(C)} = & -0,3\tilde{W}_{t-1}^{(C)} - 0,13\tilde{W}_{t-2}^{(C)} + 0,04\tilde{W}_{t-3}^{(C)} - \\ & - 0,02\tilde{W}_{t-4}^{(C)} + 0,2\tilde{W}_{t-5}^{(C)} - 0,32\tilde{W}_{t-6}^{(C)} + a_t^{(C)} \end{aligned} \quad (17)$$

з дисперсією білого шуму $s_a^{(C)2} = 2,11$ та трендом

$$m_t^{(C)} = 34,82 + 6,18 \cdot \sin(0,524 \cdot (t-1)). \quad (18)$$

Автоматизація процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах. Розробка підходу до формалізації і автоматизації процесу. Для розв'язання поставленої задачі прийнято такі положення щодо формалізації вхідних даних:

- дані повинні фіксуватись за кожен місяць експлуатації по окремо взятому трамваю;
- дані, за якими має будуватись регресійна математична модель, повинні утворювати повний динамічний ряд;
- значення варіант динамічного ряду, що характеризують відповідні часові інтервали, повинні бути представлені у вигляді "01.ММ.YYYY", де ММ – порядковий номер місяця, YYYY – рік.

З оглядом на виконання вимог формалізації даних та відповідно до розробленої математичної моделі, підхід до автоматизації зазначеного процесу можна виразити такою послідовністю:

- 1) введення і верифікація даних;
- 2) вибір масиву даних для обробки;
- 3) проведення розрахунку тренду для вибраного масиву динамічних даних;
- 4) визначення значень центрованого ряду та побудова відповідного графіка;
- 5) розрахунок значення дисперсії даних;
- 6) визначення коефіцієнтів автоковаріації, автокореляції, та імпульсу білого шуму;
- 7) побудова авторегресійних математичних моделей та ідентифікація оптимальної.

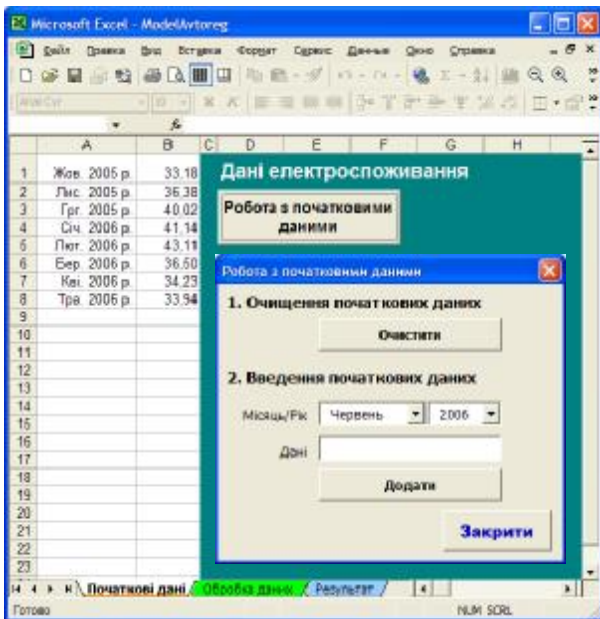


Рисунок 4 - Вигляд листа "Початкові дані"

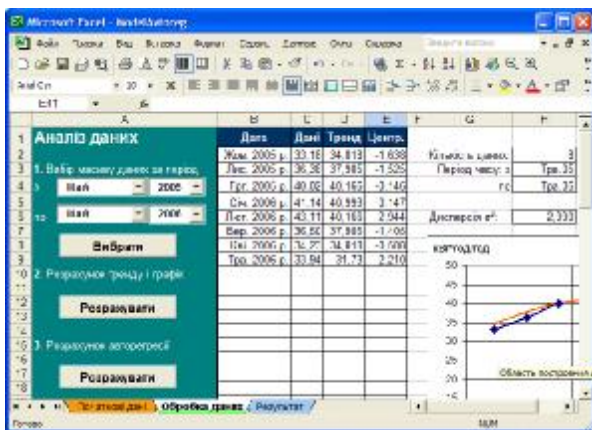


Рисунок 5 - Вигляд листа "Обробка даних"

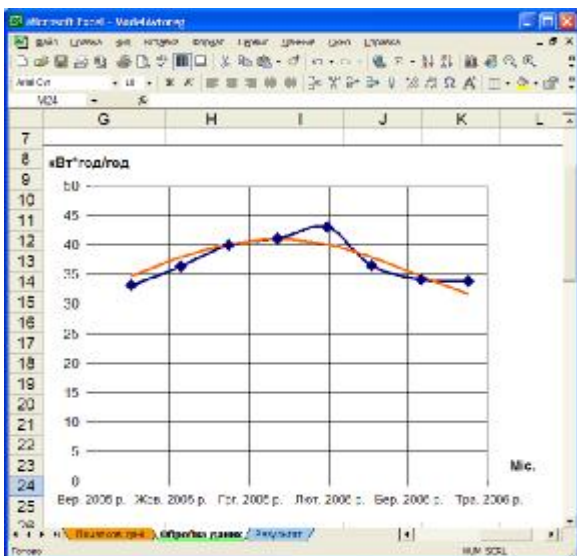


Рисунок 6 - Графік, що відображає тенденцію споживання електроенергії трамваєм протягом заданого часового діапазону

Для практичної реалізації вказаного підходу потрібно використати програмний продукт, який має відповідати таким основним вимогам:

- низька вартість і широка розповсюдженість;
- простота у використанні, що не потребує глибоких знань в даному середовищі;
- зручність в обробці даних як для поставленої задачі, так і для допоміжних розрахунків, потреба у яких може виникнути, наприклад, для досліджень наукового характеру;
- можливість легкого виводу потрібної інформації на друк;
- візуалізація отриманих результатів;
- конвертація як вхідних, так і розрахункових даних.

Звичайно, практично кожен сучасний математичний пакет прикладних програм в якійсь мірі підходить для даної мети, за винятком, можливо, перших двох пунктів, причому для більшості підприємств визначною є перша вимога.

Для розробки програмного пакету за основу запропоновано використати редактор електронних таблиць Microsoft Excel, його математичні можливості і можливості створення автоматизованого інтерфейсу користувача на базі інтеграції цього середовища з середовищем програмування Microsoft Visual Basic for Application. Головною перевагою даного пакету є те, що на його придбання не потрібно витратити додаткові кошти, адже кожне підприємство його вже має, оскільки свою документацію веде саме в пакеті програм Microsoft Office, до складу якого входять вище вказані середовища.

Практична реалізація запропонованого підходу. Виходячи із розроблених регресійних математичних моделей, створено програму "ModelAvtoereg", що дозволяє розв'язати поставлену задачу. Файл програми містить три листи в Microsoft Excel: "Початкові дані"; "Обробка даних"; "Результат".

Перший лист "Початкові дані" (рис. 4) призначено для введення, накопичення і впорядкування даних спостережень. Елементи листа дозволяють виконувати такі операції: вводити дані про кількість спожитої електроенергії трамваєм як за попередні місяці, так і за поточний місяць; за необхідністю корегувати введені дані.

Елементи другого листа "Обробка даних" (рис. 5) виконують функції підготовки набору даних до моделювання, обчислення параметрів математичної моделі і відображення вибраних даних та результатів попередньої обробки з побудовою відповідного графіку (рис. 6).

Третій лист "Результат" (рис. 7) призначено для автоматичної ідентифікації оптимальної регресійної моделі та прогнозування рівня електроспоживання на заданий користувачем термін.

При натисканні на кнопку "Визначити" (рис. 7) програма виконує пошук оптимальної регресійної моделі з виданням результату у вигляді повідомлення (рис. 8) та його внесення в відповідну комірку (№ моделі) й виділяє жовтим кольором саму оптимальну регресійну математичну модель (рис. 7). Крім того, програма дозволяє оператору самостійно вибрати

ти стартовий порядок моделі, який в процесі оптимізації уточнюється.

Наступним кроком є процес прогнозування кількості спожитої електроенергії на наступні місяці. Для цього необхідно лише внести потрібне число в комірку з назвою "На скільки місяців виконати прогноз?" (на рис. 7 це "3") та натиснути на кнопку "Побудувати графік". В результаті відбувається процес прогнозування споживання кількості електроенергії на вибраній період з побудовою відповідного графіку та ідентифікацією числових значень, які вносяться автоматично в комірки колонок AA-AD нижче вибраних даних із заливкою в кольорі (рис. 7).

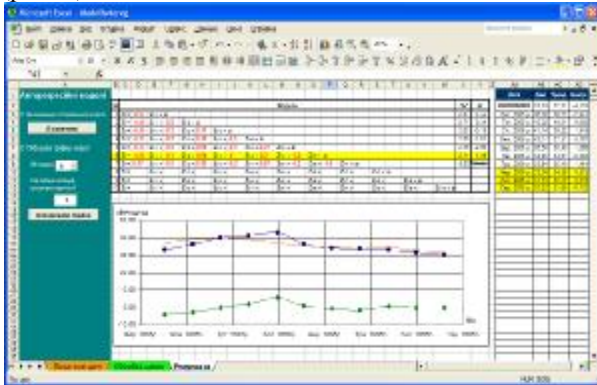


Рисунок 7 - Вигляд листа "Результат"

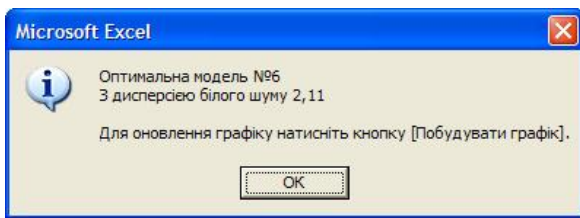


Рис. 8. Результат пошуку оптимальної моделі

Висновки. 1. Підтверджено, що незважаючи на плинність часу та суттєві зміни в організації роботи трамвайного парку, зокрема водіїв вагонів, споживання електроенергії трамваями залишається підпорядкованим нормальному логарифмічному закону розподілу, а різниця рівнів електроспоживання трамваями між водіями з кращою кваліфікацією та середньостатистичною по депо залишається суттєвою, хоча вона дещо зменшилася. 2. В роботі отримано статистичні оцінки процесу електроспоживання трамваями на маршрутах, визначені їхні довірчі інтервали, синтезовані авторегресійні математичні моделі даного процесу для усередненого трамвая депо. 3. Запропоновані підходи до формалізації та автоматизації процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах. 4. Для практичної реалізації вибрано програмне середовище на базі Microsoft Excel та Microsoft Visual Basic, що задовольняє ряду критеріям для розв'язання поставленої задачі. 5. Розроблено програму "ModelAvtoreg", що дозволяє отримати: а) оптимальні регресійні математичні моделі процесу споживання електроенергії трамваем на маршруті з порядком авторегресії, не вищим де-

сяти; б) прогноз рівня споживання електроенергії трамваем на маршруті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дудко В.Б., Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математичні моделі емпіричних законів розподілу споживання електроенергії трамваями // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. - № 5. – С. 42–46.
2. Дудко В.Б., Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математичні моделі прогнозу споживання електроенергії трамваями на маршрутах // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 6. – С. 38–44.
3. Дудко В.Б., Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математичні моделі споживання електроенергії трамваями // Коммунальное хозяйство городов (Харьковская государственная академия городского хозяйства): Науч.-техн. сб. Вып. 49. – К.: "Техніка", 2003. – С. 184–189.
4. Колде Я. К. Практикум по теории вероятностей и математической статистике. – М.: "Высшая школа", 1991. – 157 с.
5. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – Вып. 1. – М.: "Мир", 1974. – 408 с.
6. Мокін Б. І., Мокін В.Б. Математичні моделі ідентифікації електромеханічних процесів. Частина II. Ідентифікація ЕМП у лінійних стохастичних системах із зосередженими параметрами. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 99 с.

Стаття надійшла 27.07.2006 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Кухарчук В.В.