

АДЕКВАТНІСТЬ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ СТАНЦІЙ

Розглянуто різні методи оцінки техніко-технологічних параметрів залізничних станцій. Наведено результати порівняння показників, отриманих на підставі добового плану-графіку та імітаційного моделювання з показниками функціонування реальної станції.

Рассмотрены различные методы оценки технико-технологических параметров железнодорожных станций. Приведены результаты сравнения показателей, полученных на основании плана-графика работы станции и имитационного моделирования с показателями функционирования реальной станции.

Different estimation methods of technical and technological parameters of railway stations are considered. Results of the parameters comparison obtained on the basis of the station work graph and simulation with functioning parameters of a real station are presented.

При плануванні реконструктивних та організаційно-технічних заходів, спрямованих на удосконалення технічного забезпечення і технології роботи залізничних станцій, виникає задача отримання достовірної оцінки показників її функціонування після реалізації проекту. Вибір найбільш раціонального варіанту реконструктивних або організаційних заходів для станції являє собою дуже складну задачу внаслідок неможливості проведення експериментів на реальних об'єктах чи їх фізичних моделях. Тому основним засобом аналізу та оцінки показників функціонування станцій, їх техніко-технологічних і економічних параметрів є математичне моделювання станційних процесів. Традиційно розв'язання цієї задачі базуються на використанні аналітичних, графічних та імітаційних моделей. В даній статті наведено результати оцінки адекватності цих моделей.

Перші дослідження з моделювання станційних процесів базувалися на аналітичному моделюванні [1]. При моделюванні використовується стандартний математичний апарат теорії масового обслуговування, в якому залізничні станції чи їх окремі технологічні комплекси розглядаються як системи масового обслуговування (СМО). Визначення характеристик СМО (середня кількість заявок у системі, середня кількість заявок у черзі, середній час перебування заявок у системі, середній час перебування заявок у черзі та ін.) виконується за допомогою аналітичних залежностей теорії масового обслуговування. Так, наприклад, у [2] для основних станційних процесів запропоновано відповідні функції. При цьому якісні особливості внутрішньої структури і вплив випадкових процесів враховують за допомогою коефіцієн-

тів. Основними перевагами аналітичного моделювання є простота, висока швидкість отримання результатів та можливість прямого використання методів дослідження функцій на екстремум для визначення оптимальних параметрів технічного забезпечення. В той же час, використання аналітичних залежностей при оцінці варіантів експлуатаційної роботи не дозволяє достатньою мірою врахувати місцеві особливості технічного забезпечення і технології станцій, що приводить до побудови неадекватних моделей станцій і відповідно до суттєвих похибок при їх оцінці. Тому аналітичні моделі використовуються лише для попередньої оцінки заходів в умовах низької достовірності вихідних даних та невисоких вимогах до точності результатів.

В сучасних умовах основним методом оцінки нормативних параметрів та показників роботи станцій є добовий план-графік [3 – 5]. Добовий план-графік являє собою графічну модель роботи станції, де в символічному вигляді на спеціальному бланку відображуються основні виробничі процеси, що відбуваються у її підсистемах. Врахування в моделі зайнятості основних технічних засобів та елементів станції (локомотивів, стрілочних зон, бригад ПТО) дозволяє оцінити міжопераційні простої. Добовий план-графік дає можливість визначати норми простою вагонів, коефіцієнти завантаження технічних засобів станції, показники надійності роботи станції та ін. В цілому графічна модель має значну інформаційну ємність і забезпечує високу швидкість пошуку та доступу до необхідної інформації, що дозволяє їй дотепер залишатись основною як при проектуванні станцій, так і при розробці та аналізі їх технологіч-

них процесів. В той же час при побудові добового плану-графіка допускається ряд спрощень, таких як усереднення тривалості виконання технологічних операцій, обмеження періоду моделювання однією добою та ін. Тому в даній статті виконана перевірка адекватності графічної моделі. Перевірка адекватності моделі виконана на основі порівняння її показників з показниками роботи реальної станції.

Для побудови моделі залізничної станції детально проаналізовано функціонування станції Нижньодніпровськ-Вузол. З метою одержання числових характеристик законів розподілу випадкових величин тривалості виконання окремих технологічних операцій було виконано хронометраж процесу обслуговування составів у парку прийому. При цьому для кожного составу фіксувалися наступні данні: інтервали між поїздами, кількість вагонів m у поїзді, маса состава Q_c , кількість відцепів q_c , тривалість закріплення t_3 , тривалість огляду поїзда τ_o , тривалість прибирання гальмівних башмаків $t_{\text{приб}}$ та загальна тривалість простою составу. В результаті статистичної обробки отриманих даних визначено характеристики вхідного потоку поїздів, параметри розподілу випадкових величин тривалості виконання окремих технологічних операцій та простою составів у цілому. В якості основного показника для оцінки роботи станції обрано вагоно-години простою поїздів. При цьому вагоно-години простою поїздів у парку прийому за даними спостереження розраховувались за формулою:

$$r_{p,i} = m_i t_i, \quad (1)$$

де m_i – кількість вагонів в i -му поїзді;

$t_i = t_{ni} - t_{ni}$ – випадкова величина тривалості знаходження поїзда в парку прийому, математичне очікування якої залежить від кількості вагонів у поїзді $M[t_i] = f(m_i)$.

Гістограма розподілу випадкової величини простою поїздів у парку прийому (R_p) наведена на рис. 1.

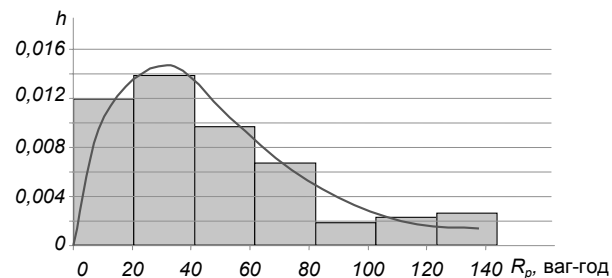


Рис. 1. Гістограма розподілу випадкової величини R_p (дані хронометражних спостережень)

В результаті статистичної обробки вибірки значень $\mathbf{r}_m = (r_{p1}, r_{p2}, \dots, r_{pn})$, $n_p = 131$ встановлено, що випадкова величина R_p розподілена за законом Ерланга з параметрами $M[R_p] = 47,3$ ваг-год. та $k = 2$, критерій згоди Пірсона складає $\chi^2 = 4,19$ при критичному значенні $\chi_{кр}^2 = 9,5$.

Для порівняння побудовано добовий план-графік роботи станції. При побудові графіка кількість вагонів у составі поїзда та тривалість виконання технологічних операцій приймалися рівними їх математичним очікуванням.

Вагоно-години простою поїздів у парку прийому розраховувались за формулою:

$$R_{r,i} = \bar{m} \sum_{j=1}^s \bar{t}_{r,j} + R_{оч,i}, \quad (2)$$

де \bar{m} – математичне очікування кількості вагонів у поїздах, що прибувають в парк прийому, ваг.;

$\bar{t}_{r,j}$ – математичне очікування тривалості виконання j -тої технологічної операції з поїздом у парку прийому, год.;

s – кількість технологічних операцій, що виконуються з поїздом у парку прийому;

$R_{оч,i}$ – випадкова величина простою поїзда в очікуванні виконання технологічних операцій, ваг-год.

Гістограма розподілу випадкової величини простою поїзда в очікуванні виконання технологічних операцій ($R_{оч}$) наведена на рис. 2.

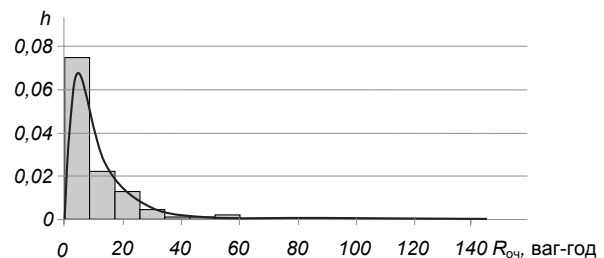


Рис. 2. Гістограма розподілу випадкової величини $R_{оч}$.

Вагоно-години простою у парку прийому під виконанням технологічних операцій складають 26,1 ваг-год. В результаті статистичної обробки встановлено, що випадкова величина $R_{оч}$ розподілена за законом Ерланга з параметрами $M[R_{оч}] = 11,6$ ваг-год. та $k = 1$, критерій згоди Пірсона складає $\chi^2 = 5,18$ при критичному значенні $\chi_{кр}^2 = 9,5$. Таким чином, середні вагоно-години простою поїздів у парку прийому за результатами графічного моделювання складають $M[R_r] = 26,1 + 11,6 = 37,7$ ваг-год., що на

25,5 % менше результату, отриманого після статистичної обробки спостережень за роботою реальної станції.

Зниження простою вагонів відбувається з двох причин. По-перше, при побудові добового плану-графіка залізнична станція розглядається як система масового обслуговування з випадковим інтервалом надходження заявок та постійною тривалістю обслуговування, для якої тривалість знаходження заявок у черзі можна приблизно визначити за формулою [6]:

$$\bar{t}_{\text{оч}} = \frac{\rho^2}{2\lambda(1-\rho)}, \quad (3)$$

де ρ – приведена інтенсивність потоку заявок, $\rho = \lambda/\mu$;

λ – інтенсивність потоку подій;

μ – інтенсивність обслуговування.

Фактично станція є системою масового обслуговування з випадковим інтервалом надходження заявок та випадковою тривалістю обслуговування, для якої середні простої в очікуванні визначаються за формулою:

$$\bar{t}_{\text{оч}} = \frac{\rho^2(1+v^2)}{2\lambda(1-\rho)}, \quad (4)$$

де v – коефіцієнт варіації часу обслуговування.

По-друге, зниження простоїв виникає через те, що у виразі (2) не враховується вплив кількості вагонів у поїзді на тривалість виконання технологічних операцій t_r . Розглянемо розрахунок простою при лінійній залежності $t_r = a_0 + a_1(m)$, тут a_0, a_1 – лінійні коефіцієнти. У випадку з двома поїздами різної довжини середні вагоно-години простою, що припадають на один поїзд, складають

$$\begin{aligned} & \frac{m_1(a_0 + a_1 m_1) + m_2(a_0 + a_1 m_2)}{2} = \\ & = a_0 \frac{m_1 + m_2}{2} + a_1 \frac{m_1^2 + m_2^2}{2}, \end{aligned} \quad (5)$$

де m_1, m_2 – відповідно кількість вагонів у складах першого та другого поїзда, причому $m_1 \neq m_2$.

При моделюванні роботи станції з усередненим складом поїзда вагоно-години простою розраховуються за формулою:

$$\frac{m_1 + m_2}{2} \left(a_0 + a_1 \frac{m_1 + m_2}{2} \right) =$$

$$= a_0 \frac{m_1 + m_2}{2} + a_1 \frac{m_1^2 + 2m_1 m_2 + m_2^2}{4}. \quad (6)$$

Враховуючи, що для будь-яких значень $m_1 > 1$ та $m_2 > 1$ справедливою є нерівність $m_1^2 + m_2^2 > 2m_1 m_2$, то заміна виразу (5) на вираз (6) приводить до зниження простоїв. Для непарної системи станції Нижньодніпровськ-Вузол це зниження складає біля 8...10 %.

Необхідно відмітити, що при побудові добових планів-графіків штучно збільшуються обсяги роботи за допомогою різноманітних коефіцієнтів нерівномірності. Це дає можливість перевірити працездатність станції. В той же час, такий підхід призводить до спотворення показників станції, таких, наприклад, як простій вагонів під накопиченням. Таким чином, графічна модель з постійною тривалістю виконання технологічних операцій є неадекватною і не може використовуватися для порівняння варіантів технології роботи залізничних станцій.

Підвищення якості техніко-експлуатаційної оцінки станцій може бути досягнуте за рахунок використання ЕОМ для моделювання їх технологічних процесів.

Перші дослідження з імітаційного моделювання транспортних систем на ЕОМ виконані у 60-тих роках ХХ сторіччя [7]. Надалі на основі цих досліджень у [8] були сформульовані загальні принципи формалізації станцій і вузлів, методології їхнього функціонального моделювання. В теперішній час розроблено значну кількість програм для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій [9 – 12]. Однак, переважно програмне описання технологічних процесів ускладнює побудову моделей конкретних станцій і обмежує їх використання науковими задачами. Для подолання цієї проблеми у ДПТі розроблено програмний комплекс для ергатичного моделювання роботи станції, в якій дані відділені від програми [13, 14]. Така організація моделі дозволяє імітувати роботу будь-яких станцій з будь-якою деталізацією технологічного процесу. Підготовка вихідних даних для моделювання виконується в автоматизованому режимі за допомогою редактора моделі технологічного процесу та редактора інформаційної моделі станції (рис. 3,а та 3,б відповідно). Процес моделювання роботи станції зображено на рис. 4.

Моделювання роботи станції може виконуватись як автоматично, під управлінням моделі системи оперативного управління роботою станції згідно з заданою системою пріоритетів, так і в інтерактивному режимі, коли порядок об-

слуговування об'єктів визначає особа, яка приймає рішення. Керування процесом моделювання

виконується за допомогою спеціальних елементів управління.

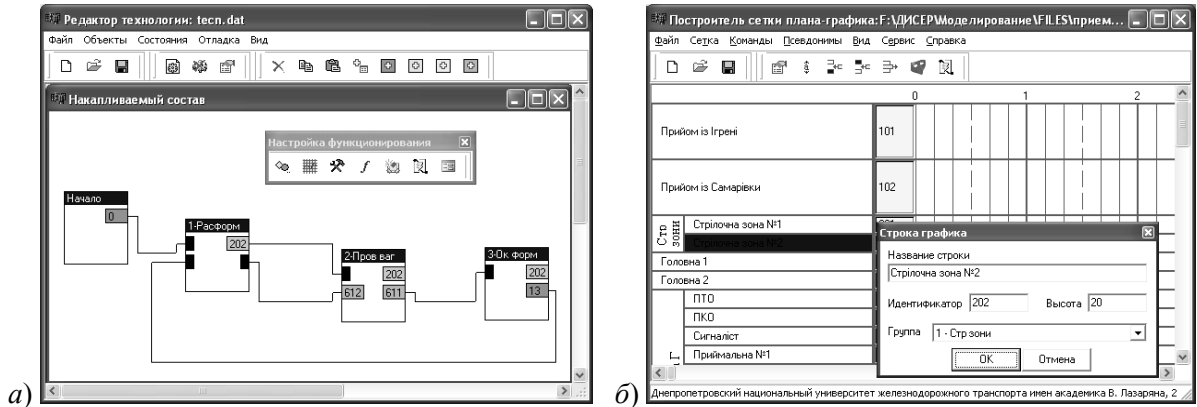


Рис. 3. Програмні засоби для автоматизованої підготовки даних для моделювання: а – редактор моделі технологічного процесу; б – редактор інформаційної моделі станції

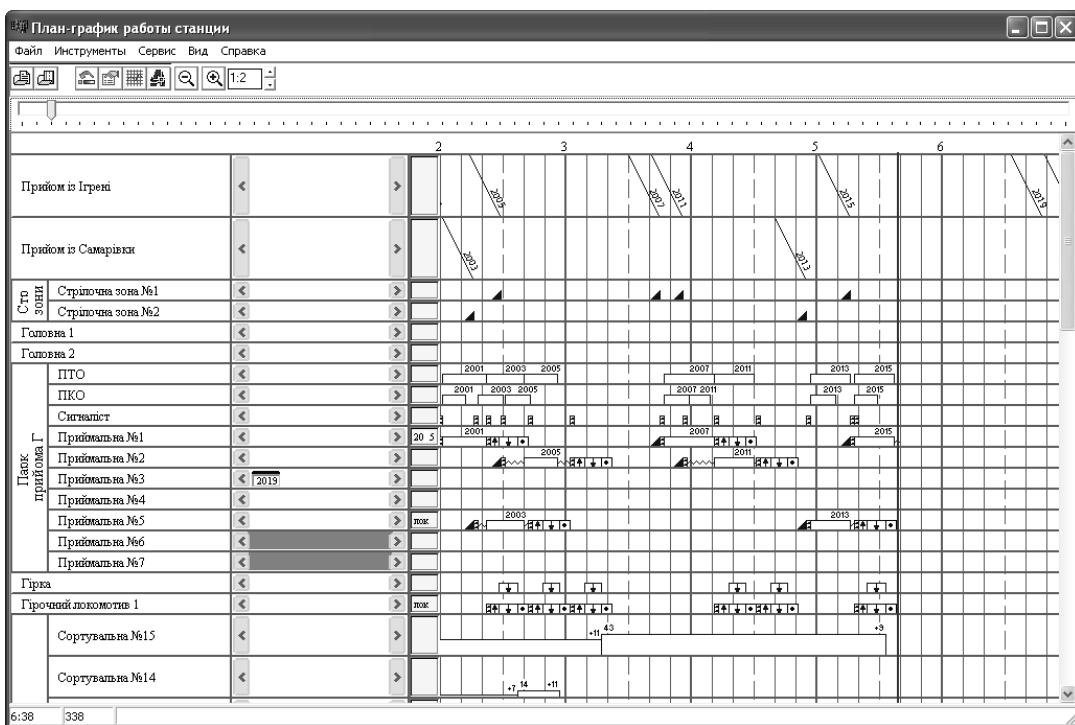


Рис. 4. Імітаційна модель роботи станції

З метою оцінки адекватності імітаційної моделі виконано моделювання роботи парку прийому станції Нижньодніпровськ-Вузол та отримано вибірку простоїв поїздів у ньому $r_m = (r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{mn})$, $n_m = 150$.

В результаті обробки статистичних даних вибірки значень r_m , отриманих в результаті моделювання добової роботи парку прибуття встановлено, що випадкова величина часу знаходження составів в парку прибуття R_m , яка отримана за результатами моделювання, розподілена по закону Ерланга з параметрами $M[R_p] = 45,5$ ваг-год. та $k = 2$ (рис. 5).

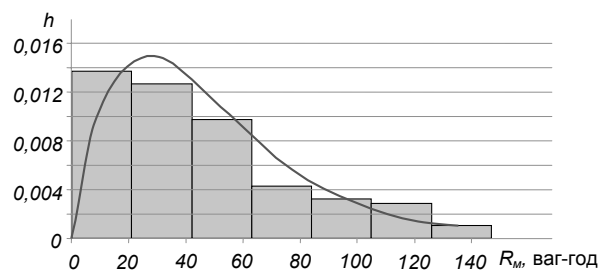


Рис. 5. Гістограма розподілу випадкової величини простою поїздів в парку (дані імітаційного моделювання)

Порівняння випадкових величин R_p та R_m показує, що вони підпорядковуються закону Ерланга з дуже близькими параметрами: для

реальної станції та для імітаційної моделі оцінки математичного очікування, відповідно, складають $\bar{r}_p = 47,3$ і $\bar{r}_m = 45,5$ ваг-год.; оцінки середнього квадратичного відхилення – $\sigma_p = 34,15$ ваг-год., $\sigma_m = 33,50$ ваг-год. Отримані статистичні параметри свідчать про близькість результатів моделювання результатам спостереження.

Для підвищення достовірності твердження про адекватність моделі за даними наведених вибірок було виконано перевірку гіпотези про їх приналежність до однієї і тієї ж генеральної сукупності. З цією метою був використано χ -критерій ван-дер-Вардена [15]. Виконані розрахунки показали, що вибірки r_p та r_m належать до однієї генеральної сукупності. Тому було зроблено висновок, що модель адекватна реальній станції і може бути використана для вирішення практичних задач.

Розроблений програмний продукт дозволяє в автоматизованому режимі готувати інформацію про технічне забезпечення та технологію роботи станцій, будувати добові плани-графіки для різних умов роботи з можливістю формування графічних файлів у форматах **dx**f і **em**f та отримувати їх показники. Використання програмного комплексу є доцільним при розробці технологічних процесів залізничних станцій, а також при техніко-економічному аналізі заходів по удосконаленню їх технічного забезпечення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Образцов, В. Н. К вопросу о проектировании станций и их расчете [Текст] / В. Н. Образцов // Избр. тр. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. – Т. 1. – С. 77-121.
2. Сотников, И. Б. Взаимодействие станций и участков железных дорог. (Исследование операций на станциях) [Текст] / И. Б. Сотников. – М.: Транспорт, 1976. – 268 с.
3. Типовий технологічний процес роботи сортувальної станції [Текст]. ЦД-0017: Затв. наказом Укрзалізниці від 23.12.98 № 324-Ц. – К.: 1998. – 243 с.
4. Типовий технологічний процес роботи дільничної станції [Текст]. ЦД-0018: Затв.: Наказ

- Укрзалізниці від 23.12.98 № 324-Ц. – К.: 1998. – 243 с.
5. Рекомендований технологічний процес роботи вантажної станції [Текст] : Затв. наказом Укрзалізниці від 17.12.2004 № 249-Ц. – К.: НВП «Поліграфсервіс», 2005. – 224 с.
 6. Кунда, Н. Т. Дослідження операцій у транспортних системах [Текст] : навч. посіб. для студ. напряму «Транспортні технології» вищ. навч. закл. / Н. Т., Кунда. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2008. – 400 с.
 7. Персианов, В. А. Расчет железнодорожных узлов методом моделирования их работы на ЭЦВМ [Текст] / В. А. Персианов, Н. С. Усков, И. Е. Четыркина // Транспортные узлы. – М.: Транспорт, 1966. – С. 420-446.
 8. Персианов, В. А. Моделирование транспортных систем [Текст] / В. А. Персианов, К. Ю. Скалов, Н. С. Усков. – М.: Транспорт, 1972. – 208 с.
 9. Мацкель, С. С. Расчет элементов станций на ЭВМ [Текст] / С. С. Мацкель. – М.: Транспорт, 1980. – 176 с.
 10. König, H. VirtuOS® – Simulieren von Bahnbetrieben [Текст] / H. König // ETR: Eisenbahntechn. Rdsch. – 2001. – 50, № 1-2. – S. 44-47.
 11. Yan, X. Zhongguo kuangye daxue [Текст] / X. Yan, C. Zhang // J. China Univ. Mining and Technol. – 2000. – 29, № 1. – P. 97-101.
 12. Лещинский, Е. Имитационное моделирование на железнодорожном транспорте [Текст] / Е. Лещинский [пер. с польск.]. – М.: Транспорт, 1977. – 176 с.
 13. Бобровский, В. И. Эргатические модели железнодорожных станций [Текст] / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // 36. наук. пр. КУЕТТ: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 5. – К.: КУЕТТ, 2004. – С. 80-86.
 14. Козаченко, Д. М. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіку [Текст] / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, Р. Г. Коробйова // Залізн. трансп. України. – 2008. – № 4. – С. 18-20.
 15. Мюллер, П. Таблицы по математической статистике [Текст] / П. Мюллер, П. Норман, Р. Шторм Р. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.

Надійшла до редколегії 24.03.2009.

Прийнята до друку 09.04.2009.