

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО НАПРЯМКУ

Запропоновано імітаційну модель залізничного напрямку, що може бути використана для дослідження організації руху поїздів та впливу параметрів поїздів на показники роботи залізничних напрямків.

Предложена имитационная модель железнодорожного направления, которую можно использовать для исследования организации движения поездов и влияния параметров поездов на показатели работы железнодорожных направлений.

The computer-aided simulation model is offered that can be used for the research of the railway traffic organization and also for the estimation of influence of the train parameters on the operation indices of railway lines and directions.

В сучасних ринкових умовах важливим чинником підвищення якості та ефективності перевезень є науковий пошук вирішення проблеми надійного й економічного функціонування системи управління перевізним процесом і впровадження цих рішень на мережі залізниць. Для дослідження впливу параметрів поїздів, що рухаються по залізничних ділянках, на показники роботи залізничних напрямків та технічних станцій, з метою знаходження оптимальних параметрів поїздів для мінімізації експлуатаційних витрат, пов'язаних з організацією руху існуючого вагонопотоку, та прискорення пропуску вагонопотоків по напрямках залізниць, була поставлена задача побудови імітаційної моделі руху поїздів на залізничному напрямку. Це обумовлено відсутністю можливості проведення вищезазначених досліджень на існуючих залізничних напрямках.

Така модель повинна відобразити роботу перегонів, ділянок, ліній, напрямків та може бути використана з метою дослідження, аналізу, прогнозування та управління рухом поїздів. Модель може допомогти з'ясувати, яким чином параметри поїздів та залізничних дільниць впливають на швидкість руху поїздів, міжпоїзний інтервал, пропускну спроможність. Схожа задача вирішувалась у наукових працях [1 – 3], але побудовані моделі не давали можливості проаналізувати системно організацію руху поїздів на залізничному напрямку з урахуванням особливості роботи як роздільних пунктів, так і залізничних ліній.

Об'єктом дослідження обрано двоколіїний електрифікований залізничний напрямок, що складається з 31 перегону загальною довжиною 241 км. В межах напрямку знаходяться дві залізничні ділянки, сортувальна та дві дільничні станції.

В якості вихідних даних використовувались графік руху пасажирських і вантажних поїздів, статистична дані випадкової величини кількості вагонів у складі вантажного поїзда, їх маси та призначення, відстань між сусідніми станціями напрямку, профіль та план колії перегонів та головних колій станцій, колійний розвиток роздільних пунктів, існуючі тягові засоби та їх характеристика. Дана модель розглядає залізничну напрямку як СМО з випадковим вхідним потоком поїздів. Потік поїздів неоднорідний і поділяється на дві категорії однорідних потоків – пасажирських та вантажних поїздів. Характеристика випадкової величини інтервалів між вантажними поїздами потоку була визначена на існуючому напрямку (рис. 1) з параметрами – математичне очікування інтервалу $M[t] = 32$ хв, коефіцієнт варіації $\mathcal{D}[t] = 0,92$. Тому при моделюванні інтервалів між вантажними поїздами в потоці використовується показниковий закон розподілу. Потік пасажирських поїздів у моделі розглядався однорідним і прямував по напрямку згідно встановленого графіку руху поїздів.

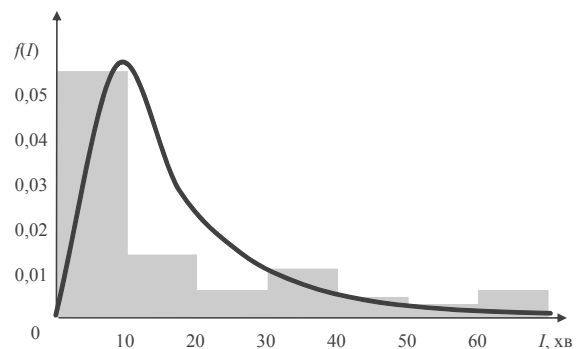


Рис. 1. Розподіл випадкової величини міжпоїзного інтервалу

Маса поїздів значно впливає на енергетичні витрати, які витрачаються при русі поїздів. Тому було проведено аналіз виконаних мас поїздів на напрямку (рис. 2). Він показав, що має місце два окремих масиви значень мас – для порожнього та вантажного потоку. Їх співвідношення складає 45 та 55 %, відповідно.

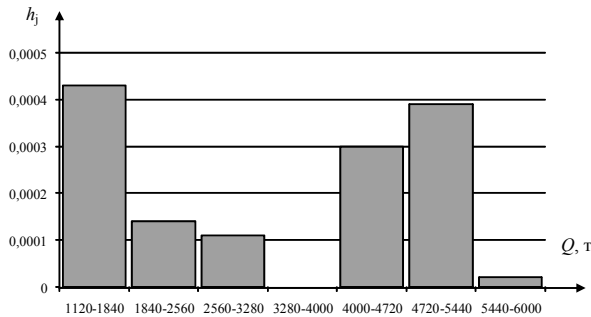
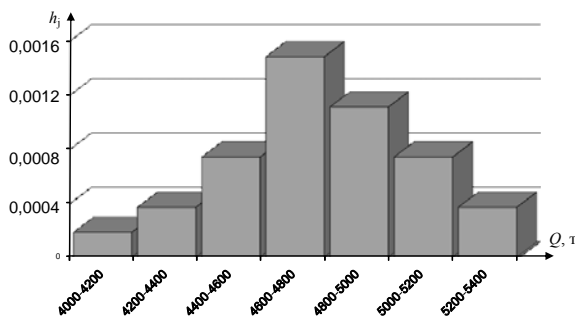
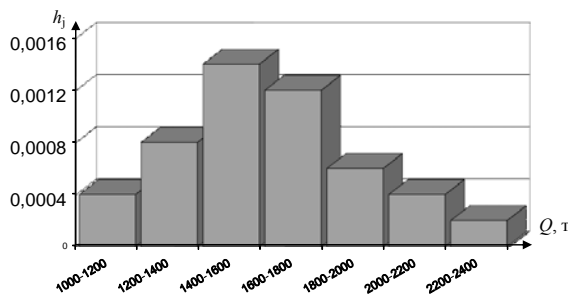


Рис. 2. Розподіл випадкової величини маси поїздів

В результаті статистичної обробки випадкової величини маси поїздів для вантажного та порожнього потоку встановлено нормальні закони розподілення (рис. 3) із математичним очікуванням та середньоквадратичним відхиленням у вантажному потоці 4770 та 290 т та в порожньому – 1610 та 300 т, відповідно.



а)



б)

Рис. 3. Розподіл випадкової величини маси поїздів:
а – переважно завантажених;
б – переважно порожніх составів

Для дослідження процесу руху поїздів використано метод тягових розрахунків. Було проведено ряд експериментів з масою поїздів у

межах 1000...8500 т та отримано енергетичні витрати і час руху поїздів на перегонах дільниць. Окремо для вантажного та порожнього потоків переглянуто 58 різних залежностей часу ходу вантажного поїзда по перегону від маси составу і довжини перегону $T_x = f(Q, L)$ на основі методу мінімальних квадратів. Варіант з найменшою залишковою дисперсією 0,69 досягається лінійною залежністю:

$$T_x = 0,859 + 1,27 \cdot 10^{-4} Q_j + 8,7 \cdot 10^{-4} L_i \text{ хв, (1)}$$

де Q_j – маса составу j -го поїзда, т

L_i – довжина i -го перегону, м.

Для перевірки адекватності залежності (1) був проведений повний факторний експеримент.

Загальний вид функції відгуку, що залежить від двох факторів, має вигляд

$$\hat{t} = b_0 + b_1 \cdot \tilde{X}_1 + b_2 \cdot \tilde{X}_2 + b_{12} \cdot \tilde{X}_1 \cdot \tilde{X}_2, \quad (2)$$

де \tilde{X}_1 та \tilde{X}_2 – рівні першого та другого факторів – маси та довжини перегону, при нижньому рівні значення фактора $\tilde{X} = -1$, при верхньому рівні $+1$;

b_0, b_1, b_2, b_{12} – невідомі коефіцієнти, що розраховуються за формулою

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{X}_{ji} t_i}{N}, \quad (3)$$

N – кількість дослідів, для двофакторного експерименту $N = 4$.

Результати розрахунків для верхніх рівнів факторів – 19940 м, 8500 т, та нижніх – 3550 м, 4000 т, відповідно, наведено в табл. 1.

Коефіцієнти функції відгуку та сама функція мають наступний вигляд:

$$b_0 = 11,86; b_1 = 0,285; b_2 = 7,13; b_{12} = 5 \cdot 10^{-4},$$

$$\hat{t} = 11,86 + 0,285 \cdot \tilde{X}_1 + 7,13 \cdot \tilde{X}_2 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot \tilde{X}_1 \cdot \tilde{X}_2. \quad (4)$$

Адекватність отриманої залежності для середнього рівня факторів $Q_{\text{сер}} = 6250$ т, $L_{\text{сер}} = 11743$ м відповідає функції відгуку при нульових рівнях факторів:

$$T_x = 0,859 + 1,27 \cdot 10^{-4} \cdot 6250 + 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot 11743 = 11,86 \text{ хв};$$

$$\hat{t} = 11,86 + 0,285 \cdot 0 + 7,13 \cdot 0 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot 0 \cdot 0 = 11,86 \text{ хв.}$$

Розрахунок коефіцієнтів функції відгуку

№ дослідів	t	\tilde{X}_0	\tilde{X}_1	\tilde{X}_2	$\tilde{X}_1 \tilde{X}_2$	$\tilde{X}_0 t$	$\tilde{X}_1 t$	$\tilde{X}_2 t$	$\tilde{X}_1 \tilde{X}_2 t$
1	4,45	+1	-1	-1	+1	+4,45	-4,45	-4,45	+4,45
2	5,02	+1	+1	-1	-1	+5,02	+5,02	-5,02	-5,02
3	18,71	+1	-1	+1	-1	+18,71	-18,71	+18,71	-18,71
4	19,29	+1	+1	+1	+1	+19,29	+19,29	+19,29	+19,29
Σ						47,47	1,14	28,53	0,002

Порівнюючи отримані результати (11,86 = 11,86), робимо висновок про адекватність залежності (4). Оскільки коефіцієнти b_1 і b_2 додатні, то між функцією відгуку та двома факторами прямо пропорційний зв'язок, тобто збільшення будь-якого з факторів призведе до збільшення й функції відгуку $\hat{t} = f(Q, l)$. Порівнюючи розраховані коефіцієнти b_1 і b_2 між собою, можна відзначити, що значно більший вплив на функцію відгуку має другий фактор, тобто довжина перегону. Треба зазначити також, що збільшення маси поїздів, наприклад, у 3 рази з 2000 т до 6000 т призводить до збільшення тривалості руху поїзда на перегоні всього на 3...5 %.

Отримані закони розподілу маси поїздів, параметрів потоку, залежності тривалості руху поїздів по перегону від його довжини та маси поїздів використовуються для побудови імітаційної моделі залізничної дільниці. До її складу входять модель технологічного процесу обслуговування об'єктів (МТП) та інформаційна модель (ІМ). Синхронізація МТП та ІМ виконується за командами системного таймера у відповідності з системним часом t_c . Загальний алгоритм моделі зображено на рис. 4.

Основою МТП є модель, в якій залізничний напрямок розглядається як багатоканальна багатофазна система масового обслуговування СМО. Вхідний потік утворюють парні та непарні поїзди, що вимагають пропуску по дільницям напрямку. Фазами обслуговування поїздів є залізничні перегони та станції, що здійснюють технологічні процеси відповідно до технології роботи дирекції залізничних перевезень та технологічних процесів роботи станцій напрямку. Тривалості обслуговування моделюються як випадкові величини, параметри яких залежать від характеристик заявок на обслуговування та об'єктів обслуговування.

Технологічні процеси обробки об'єктів на напрямку представляє комплекс технологічних операцій g_i , кожна з яких повинна бути виконана в певному порядку перед тим, як об'єкт залишить систему.

В якості об'єктів, що обслуговуються на дільницях, розглядаються поїзди та поїзні локомотиви. Кожен об'єкт в моделі представляється структурою

$$O_j = \{I_o, a_o, P, s, n_o\}, j = 1, 2, \dots, n_o, \quad (5)$$

де I_o – ідентифікатор об'єкту;

a_o – тип об'єкту;

P – множина параметрів об'єкту;

s – поточний стан об'єкту, який визначає фазу технологічного процесу його обслуговування;

n_o – загальна кількість об'єктів, що обслуговуються в парку.

Згідно технологічного процесу в моделі передбачено можливість поділу поїздів на состави та поїзні локомотиви, що мають різну технологію обслуговування на технічних станціях, де відбувається зміна локомотивів.

Моделювання вхідного потоку заявок виконується у декілька етапів. Спочатку для конкретних умов моделювання у файлі вихідних даних вказується інформація про кількість поїздів різних категорій a_o . Далі – відповідно до категорії моделюються параметри об'єкту (кількість вагонів у составі, довжина поїздів, маса). Пасажирські поїзди надходять у модель згідно масиву моментів часу, що задається. Вантажні поїзди надходять у модель з інтервалами, що розподілені за законом Ерланга відповідно до аналізу статистичних даних. Ці інтервали визначаються за допомогою виразу

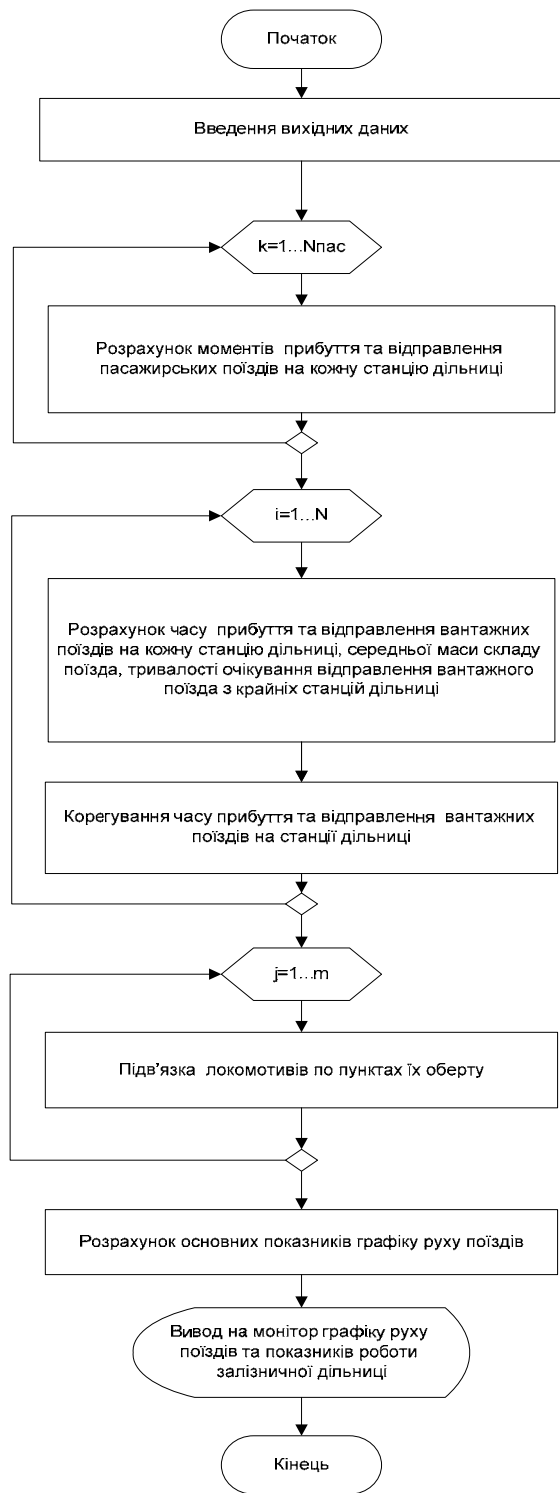


Рис. 4. Загальний алгоритм імітаційної моделі залізничного напрямку

$$t_i = \frac{I_{\min} - M[t]}{k} \ln r + I_{\min}, \quad (6)$$

де I_{\min} – мінімальний інтервал між поїздами, що встановлюється вимогами автоблокування;
 r – випадкове число, що рівномірно розподілене в інтервалі $[0, 1]$.

В МТП технологія пропуску поїздів по перегонах представляється структурою:

$$q_j = \{I_w, I_0, p, U_q, F_q, t_q\}, i = 1, 2, \dots, n_q, \quad (7)$$

де I_w – ідентифікатор шаблону технологічної операції;

I_0 – об'єкт, з яким виконується операція;

U_q – список перегонів;

F_q – список умов закінчення технологічної операції;

t_q – момент закінчення виконання технологічної операції.

Шаблони w_i містять інформацію, яка необхідна для параметризації окремих технологічних операцій q :

$$w_i = \{I_w, f_t, \zeta\}, i = 1, 2, \dots, n_w, \quad (8)$$

f_t – функція, що визначає тривалість руху поїзда по перегону, визначається за формулою (1);

ζ – параметр, що вказує на порядок відправлення поїздів на перегін ($\zeta = 1$ – поїзд займає перегін, $\zeta = 0$ – поїзд зупиняється для обгону поїздом іншої категорії).

Момент готовності до відправлення вантажного поїзда з сортувальної станції може співпадати з відправленням з цієї ж станції пасажирського поїзда, або різниця часу від моменту відправлення пасажирського поїзда до моменту відправлення вантажного поїзда може бути меншою за можливо допустиму. В таких випадках вантажних поїзд затримується на станції на мінімально необхідний час для забезпечення безпеки руху поїздів.

В пунктах оберту локомотивів їх підв'язка здійснюється на основі пошуку мінімальних простоїв в очікуванні поїздів з урахуванням необхідності виконання ТО-2 та технологій роботи станцій. Цей пошук виконується за допомогою алгоритму метода Мака [4].

Інформаційна модель являє собою зображення графіку руху поїздів напрямку на часовій сітці. Вона призначена для надання інформації про поїзний стан та для відображення показників роботи напрямку (рис. 5).

Технологічний процес роботи станції зображується у вигляді набору значків S , які відповідають виконаним технологічним операціям з об'єктами. Кожен значок $s \in S$ в пам'яті ЕОМ представляється структурою:

$$s = \{q, c, E_r, t_n, t_k, h, f_{ц}, Y_d\}, \quad (9)$$

де q – ідентифікатор зображення значка;

t_n, t_k – відповідно час початку та закінчення технологічної операції, яку зображує значок;

h – висота значка;

$f_{ц}$ – колір значка;

Y_d – вектор додаткових параметрів.

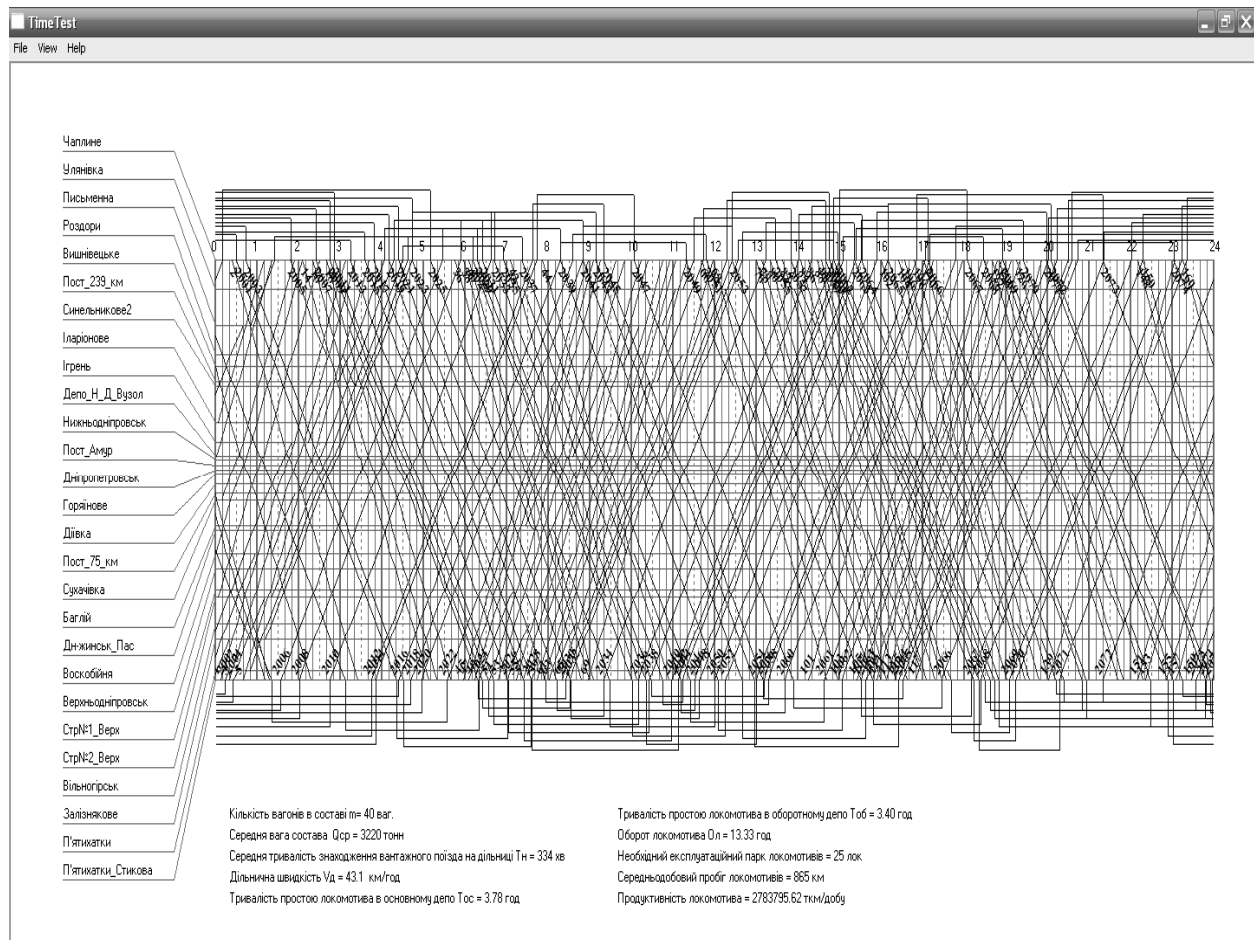


Рис. 5. Зовнішній вигляд інтерфейсу імітаційної моделі залізничного напрямку

МТП за результатами моделювання розраховує основні показники роботи напрямку.

Середня вага поїзда брутто (т) розраховується за формулою

$$Q_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N}, \quad (10)$$

де Q_i – маса i -го поїзду, т;

N – загальна кількість вантажних поїздів.

Середня тривалість знаходження поїзда на напрямку

$$T_n = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{вихi} - T_{вхi})}{N}, \text{ хв} \quad (11)$$

де $T_{вх}$ та $T_{вих}$ – моменти входу та виходу поїздів на напрямок.

Дільнична швидкість

$$V_d = \frac{\sum NL}{60T_n}, \quad (12)$$

де $\sum NL$ – сумарні поїздо-години.

Середній простій локомотива в основному депо

$$T_{ос} = \frac{\sum_{j=1}^m (T_{відj} - T_{прj})}{M_e}, \quad (13)$$

Середній простій локомотива в оборотному депо

$$T_{об} = \frac{\sum_{j=1}^m (T_{відj} - T_{прj})}{M_e}, \quad (14)$$

де $T_{\text{від},j}$ – момент відправлення j -го локомотива із пункту оборту;

$T_{\text{пр},j}$ – момент прибуття j -го локомотива в пункт оборту;

M_e – кількість локомотивів.

Оберт локомотива

$$O_{\text{л}} = \frac{2L}{V_{\text{д}}} + T_{\text{ос}} + T_{\text{об}} \quad (15)$$

Необхідний експлуатаційний парк локомотивів

$$M_e = \frac{O_{\text{л}} N}{24} \quad (16)$$

Середньодобовий пробіг локомотива

$$S_{\text{л}} = \frac{2LN}{M_e} \quad (17)$$

Продуктивність локомотива

$$W_{\text{л}} = S_{\text{л}} Q_{\text{сер}} \quad (18)$$

Отже, запропонована імітаційна модель дозволить визначити вплив організації руху поїздів на показники роботи залізничних напрямків, знайти оптимальний графік підв'язки локомотивних бригад при кільцевому способі обслуговування поїздів локомотивами.

Проведені дослідження показали, що кількість вагонів і маса поїздів практично не впливають на тривалість знаходження поїздів на напрямку без врахування простоїв на технічних станціях та на дільничну швидкість руху поїздів. Коефіцієнти кореляції цих залежностей становлять $r_{\text{мТн}} = 0,09$ та $r_{\text{мVд}} = 0,06$, відповідно. На ці показники значно впливають ступінь виконання міністерського графіку руху поїздів та нерівномірність поїздопотоків.

Інша тенденція спостерігається на пасажиронапружених і одночасно завантажених напрямках. Тривалість пропуску вагонопотоку значно збільшується із зростанням кількості вагонів у складах поїздів та їх маси.

Використовуючи запропоновану модель, а також моделі роботи технічних станцій [5] можна визначити вплив параметрів поїздів та ор-

ганізації руху поїздопотоків на залізничному напрямку на його показники і, в першу чергу, на експлуатаційні витрати.

Дослідження показали, що для прискорення пропуску вагонопотоків на залізничних напрямках із нормальною завантаженістю дільниць необхідно формувати поїзди довжиною 48...52 вагони масою 3500...3800 т. Для зменшення експлуатаційних витрат за рахунок зменшення швидкості просування вагонопотоку по напрямку необхідно формувати довгосоставні поїзди підвищеної маси (58...65 ваг., 4300...4800 т).

При значній завантаженості дільниць напрямку, наприклад, при літньому розкладі графіку руху пасажирських поїздів, доцільним стає формування неповносоставних неповновантажних поїздів для прискорення пропуску вагонопотоків на напрямку. При цьому мінімум експлуатаційних витрат також має місце при формуванні довгосоставних поїздів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Левин, Д. Ю. Оптимизация потоков поездов [Текст] / Д. Ю. Левин. – М.: Транспорт, 1998. – 175 с.
2. Угрюмов, А. К. Вопросы автоматизации эксплуатационной работы железных дорог [Текст] / А. К. Угрюмов. – Л., 1976.
3. Персианов, В. А. Моделирование транспортных систем [Текст] / В. А. Персианов, К. Ю. Скалов, Н. С. Усков. – М.: Транспорт, 1972.
4. Зайченко, Ю. П. Исследование операций [Текст]: учеб. пособие для студ. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1979. – 392 с.
5. Банди, Б. Основы линейного программирования [Текст] / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
6. Козаченко, Д. М. Програмный комплекс для имитационного моделирования работы залізничних станцій на основі добового плану-графіку [Текст] / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, Р. Г. Коробйова // Заліз. трансп. України. – 2008. – № 4. – с. 18-20.

Надійшла до редколегії 07.07.2009.

Прийнята до друку 18.07.2009.