

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.4.072.5:519.17

Т. В. БУТЬКО<sup>1</sup>, О. М. ГОРОБЧЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (057) 730 10 89, ел. пошта uetmp@ukr.net, ORCID 0000-0003-4027-3030

<sup>2\*</sup>Каф. «Експлуатація і ремонт рухомого складу», Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61000, +38 (063) 580 27 13, ел. пошта superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852

### МОДЕЛЮВАННЯ КЕРУЮЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ МАШИНІСТА ЛОКОМОТИВА ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ ГРАФІВ

**Мета.** Підвищення ефективності та безпеки управління локомотивом є важливою та актуальною науково-прикладною проблемою. Кожен машиніст при веденні поїзда спирається на свій досвід і знання, тому узагальнення та виявлення найбільш раціональних способів управління локомотивом є одним із етапів розробки заходів щодо зниження собівартості перевезень. Метою статті є формалізація опису процесу управління локомотивом та визначення параметрів якості цього процесу. **Методика.** Для досягнення поставленої мети в роботі використана теорія нечітких ймовірнісних графів. Вершини графа відповідають подіям початку та закінчення операцій із управління поїздом. Дуги графа описують операції із управління поїздом. Граф складається з тринадцяти вершин, відповідних основним керуючим діям машиніста. Вагові коефіцієнти переходів між вершинами задані нечіткими числами. Їх значення отримані методом експертних оцінок. Нечіткі значення ймовірності та часу переходу представлені у вигляді чисел із трапецієподібною функцією належності. **Результати.** За допомогою послідовного об'єднання паралельних дуг, усунення петель та вершин отримано еквівалентний нечіткий граф управління поїздом та відповідна йому  $L$ -матриця. Еквівалентний граф окремо враховує діяльність машиніста при нормальній експлуатації та при виникненні нештатних ситуацій. **Наукова новизна.** У роботі розроблені теоретичні основи формалізації опису процесу та отримана модель керуючої діяльності машиніста локомотива за допомогою нечіткого ймовірнісного графа. Отримано параметри, що характеризують процеси прийняття рішень машиністом. У подальшому ця модель може бути використана для оцінки ефективності локомотивних систем підтримки прийнятих рішень. **Практична значимість.** За допомогою отриманої моделі можливо оцінити наявні резерви підвищення якості управління локомотивом. Зниження часу для прийняття рішень наблизить поточний режим управління до раціонального та знизить витрати на тягу поїздів. А зменшення часу на ідентифікацію нештатних ситуацій призведе до підвищення безпеки руху шляхом реалізації заходів раннього реагування на небезпеку.

*Ключові слова:* безпека руху; локомотивна бригада; нечіткий граф; поїзд; прийняття рішень

#### Вступ

*Постановка проблеми.* Керуюча діяльність машиніста під час ведення поїзда є стохастичним процесом. Кожен робітник має своє уявлення про ефективне керування, свій набір по-

слідовних дій, що ґрунтується на його особистому досвіді та баченні поїзних ситуацій. В будь-якому депо є передові машиністи, показники роботи яких відрізняються від основної маси в кращий бік. Однак методи та прийоми

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ведення поїздів і серед них можуть значно відрізнятися, хоча призводять до схожих результатів: економія палива (енергії), тривалий час уникання транспортних подій та інше. У зв'язку з цим постає проблема узагальнення практики раціонального керування поїздом шляхом побудови такої моделі, що враховує досвід роботи локомотивних бригад і дозволить знайти шляхи до підвищення якості їх роботи [13].

*Аналіз досліджень та публікацій.* Підвищення якості керування об'єктами залізничного транспорту є актуальним завданням, на яке постійно звертають увагу вітчизняні [4, 12] та закордонні дослідники [7, 9]. Аналізуючи доступні публікації, можна сказати, що питання моделювання діяльності машиніста локомотива під час ведення поїзда розроблені не достатньо. Для моделювання керуючої діяльності людини-оператора широко використовується теорія графів [2, 11]. Кінцевою метою керуючої діяльності машиніста є отримання корисного результату – спрямування поїзда до пункту призначення з мінімізацією ризику виникнення транспортної події [1]. Мета досягається поетапно, шляхом розв'язання часткових завдань. В нашому дослідженні розглянемо алгоритм діяльності людини-оператора [3].

### Мета

Найважливішим елементом управляючої діяльності машиніста є прийняття рішення. Щоб виконати моделювання цього процесу, потрібно врахувати всі фактори та дії, що передують прийняттю рішень, та визначити логічні зв'язки між ними. Найбільш природно для цієї задачі використати методи теорії графів.

### Методика

Алгоритм дій машиніста локомотива під час керування поїздом подамо у вигляді нечіткого імовірнісного графа [8], що зображений на рис. 1. Специфіка об'єкта моделювання дозволяє визначити основні властивості імовірнісного графа таким чином:

- вершини графа відповідають подіям, що ототожнюються з початком та закінченням операцій з керування поїздом;
- дуги графа ототожнюються операціями з керування поїздом;

– ваги дуг відповідають часу та імовірності виконання операції;

- ваги дуг передбачаються незалежними;
- вершини графа мають вихід типу «АБО»;
- граф може мати петлі і замкнуті контури, що відповідають циклічно повторюваним сукупностям операцій з керування поїздом;
- для будь-якої  $j$ -ї вершини імовірнісного графа виконується умова стохастичності:

$$\sum_{i=1}^n p_{ji} = 1, \quad (1)$$

де  $p_{ji}$  – імовірність переходу з  $j$ -ої вершини в  $i$ -ту;  $n$  – кількість дуг, що виходять з  $j$ -ї вершини.

Завдання аналізу процесу керування поїздом зводиться до укрупнення графа, зображеного на рис. 1, з використанням правил еквівалентних перетворень для послідовних та паралельних дуг, і для дуг-петель.

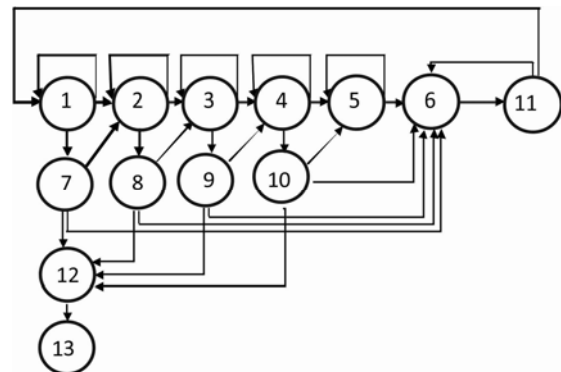


Рис. 1. Нечіткий імовірнісний граф алгоритму діяльності машиніста локомотива під час ведення поїзда

Fig. 1. Fuzzy probabilistic graph of algorithm of engine-driver's activity during the train-handling

Вершинами цього графа є операції, що виконуються машиністом, а логічними умовами – зважені нечіткі імовірнісно-часові характеристики переходу від однієї операції до іншої. Цей граф складається з таких операцій:

- 1 – контроль стану та зайнятості колії попереду;
- 2 – контроль стану сигналів попереду;
- 3 – контроль стану локомотива;
- 4 – контроль стану поїзда;
- 5 – аналіз відповідності режиму керування поточним умовам ведення поїзда (план та про-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

філь колії, швидкісний режим, відстані до сигналів або небезпечних місць, погодні умови та інше);

6 – прийняття керуючого рішення;

7 – оцінка стану колії попереду;

8 – оцінка значення сигналу;

9 – оцінка стану технічного локомотива;

10 – оцінка стану поїзда;

11 – оцінка ефективності прийнятого рішення з керуванням поїздом;

12 – ідентифікація небезпечної ситуації;

13 – перехід керування в режим усунення нештатної ситуації.

Вагові коефіцієнти переходів між вершинами завдані нечіткими числами, значення яких

Таблиця 1

**Вагові коефіцієнти переходів між вершинами графа в  $\alpha$ -рівневому описанні (частина 1)**

Table 1

**Weighting factors of transitions between graphs in  $\alpha$ -level description (part 1)**

Вершини $i/j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,1	0,3					0,6						
2		0,1	0,3					0,6					
3			0,1	0,3					0,6				
4				0,1	0,3					0,6			
5					0,1	0,9							
6											1		
7		0,6				0,39						0,01	
8			0,6			0,39						0,01	
9				0,6		0,39						0,01	
10						0,99						0,01	
11	0,9					0,1							
12													1
13													

Таблиця 2

**Вагові коефіцієнти переходів між вершинами графа в  $\alpha$ -рівневому описанні (частина 2)**

Table 2

**Weighting factors of transitions between graphs in  $\alpha$ -level description (part 2)**

Вершини $i/j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2	0,5					1						
2		0,5	0,5					0,5					
3			2,5	0,5					1,5				
4				4	5					1,5			
5					4	4							
6											8		

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Закінчення табл. 2

End of Table 2

Вершини i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7		0,5				4						3	
8			0,5			4						3	
9				0,5		4						3	
10						4						3	
11	2					4							
12													1
13													

записані в матриці графа (табл. 1 та 2). Значення цих коефіцієнтів отримані методом експертних оцінок: було опитано 43 машиністи електровозів та тепловозів локомотивного депо Ясинувата-Захід.

Подамо нечіткий імовірнісний граф (НІГ) у вигляді  $L$ -матриці.  $L$ -матрицею називають матрицю розміром  $4 \times N$ , в якій кожен  $i$ -тий рядок ототожнюється з дугою графа та має вигляд [10]:

$$l_i = \{x_i, y_i, \tilde{p}_i, \tilde{t}_i\}, \quad (2)$$

де  $x_i$  – номер вершини, з якої виходить  $i$ -та дуга;  $y_i$  – номер вершини, в яку входить  $i$ -та дуга;

$\tilde{p}_i(\tilde{t}_i)$  – нечітка імовірність (час) переходу

з вершини  $x_i$  у вершину  $y_i$ .

$N$  – кількість дуг імовірнісного графа.

Нечіткі значення імовірності та часу переходу подамо у вигляді чисел з трапецієвидною функцією приналежності [5]:

$$\tilde{p}_i = \left\langle \underline{p}_{i0}, \overline{p}_{i0}, \underline{p}_{i1}, \overline{p}_{i1} \right\rangle$$

$$\tilde{t}_i = \left\langle \underline{t}_{i0}, \overline{t}_{i0}, \underline{t}_{i1}, \overline{t}_{i1} \right\rangle, \quad (3)$$

де  $\underline{t}_{i0}(\overline{t}_{i0})$  – нижня (верхня) межа нечіткого числа «час переходу з вершини  $x_i$  у вершину  $y_i$ » на нульовому б-рівні;  $\underline{t}_{i1}(\overline{t}_{i1})$  – теж на одиничному б-рівні;  $\underline{p}_{i0}(\overline{p}_{i0})$  – нижня (верхня) межа нечіткого числа «імовірність переходу з вершини  $x_i$  у вершину  $y_i$ » на нульовому б-рівні;  $\underline{p}_{i1}(\overline{p}_{i1})$  – теж на одиничному б-рівні.

Функція приналежності такого опису має

вигляд як на рис. 2. Інтервал  $\left[ \underline{p}_{i1}, \overline{p}_{i1} \right]$  є оптимістичною оцінкою імовірності переходу, а  $\left[ \underline{p}_{i0}, \overline{p}_{i0} \right]$  – песимістичною.

$L$ -матриця після наведення даних у вигляді (3) згідно з (2) буде мати вигляд (4):

1	1	(0; 0, 2) <sub>0</sub> ∪ (0, 05; 0, 15) <sub>1</sub>	(0, 5; 3, 5) <sub>0</sub> ∪ (1, 5; 2, 5) <sub>1</sub>
1	2	(0, 1; 0, 4) <sub>0</sub> ∪ (0, 25; 0, 35) <sub>1</sub>	(0; 0, 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 03; 0, 07) <sub>1</sub>
1	7	(0, 4; 0, 8) <sub>0</sub> ∪ (0, 55; 0, 65) <sub>1</sub>	(0; 4) <sub>0</sub> ∪ (0; 2) <sub>1</sub>
2	2	(0; 0, 2) <sub>0</sub> ∪ (0, 05; 0, 15) <sub>1</sub>	(0; 0, 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 03; 0, 07) <sub>1</sub>
2	3	(0, 1; 0, 4) <sub>0</sub> ∪ (0, 25; 0, 35) <sub>1</sub>	(0; 0, 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 03; 0, 07) <sub>1</sub>
2	8	(0, 4; 0, 8) <sub>0</sub> ∪ (0, 55; 0, 65) <sub>1</sub>	(0; 0, 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 03; 0, 07) <sub>1</sub>
3	3	(0; 0, 2) <sub>0</sub> ∪ (0, 05; 0, 15) <sub>1</sub>	(1; 4) <sub>0</sub> ∪ (2; 3) <sub>1</sub>
3	4	(0, 1; 0, 4) <sub>0</sub> ∪ (0, 25; 0, 35) <sub>1</sub>	(0; 0, 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 03; 0, 07) <sub>1</sub>
3	9	(0, 4; 0, 8) <sub>0</sub> ∪ (0, 55; 0, 65) <sub>1</sub>	(0, 5; 2, 5) <sub>0</sub> ∪ (1, 2; 1, 8) <sub>1</sub>
4	4	(0; 0, 2) <sub>0</sub> ∪ (0, 05; 0, 15) <sub>1</sub>	(2, 5; 5, 5) <sub>0</sub> ∪ (3, 5; 4, 5) <sub>1</sub>
4	5	(0, 1; 0, 4) <sub>0</sub> ∪ (0, 25; 0, 35) <sub>1</sub>	(3; 7) <sub>0</sub> ∪ (4, 5; 5, 5) <sub>1</sub>
4	10	(0, 4; 0, 8) <sub>0</sub> ∪ (0, 55; 0, 65) <sub>1</sub>	(0, 5; 2, 5) <sub>0</sub> ∪ (1, 2; 1, 8) <sub>1</sub>
5	5	(0; 0, 2) <sub>0</sub> ∪ (0, 05; 0, 15) <sub>1</sub>	(2, 5; 5, 5) <sub>0</sub> ∪ (3, 5; 4, 5) <sub>1</sub>
5	6	(0, 7; 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 85; 0, 95) <sub>1</sub>	(2, 5; 5, 5) <sub>0</sub> ∪ (3, 5; 4, 5) <sub>1</sub>
6	11	(0, 95; 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 99; 1) <sub>1</sub>	(5; 11) <sub>0</sub> ∪ (7; 9) <sub>1</sub>
7	2	(0, 4; 0, 8) <sub>0</sub> ∪ (0, 55; 0, 65) <sub>1</sub>	(0; 0, 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 03; 0, 07) <sub>1</sub>
7	6	(0, 29; 0, 49) <sub>0</sub> ∪ (0, 34; 0, 44) <sub>1</sub>	(2, 5; 5, 5) <sub>0</sub> ∪ (3, 5; 4, 5) <sub>1</sub>
7	12	(0; 0, 05) <sub>0</sub> ∪ (0; 0, 02) <sub>1</sub>	(1; 5) <sub>0</sub> ∪ (2, 5; 3, 5) <sub>1</sub>
8	3	(0, 4; 0, 8) <sub>0</sub> ∪ (0, 55; 0, 65) <sub>1</sub>	(0; 0, 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 03; 0, 07) <sub>1</sub>
8	6	(0, 29; 0, 49) <sub>0</sub> ∪ (0, 34; 0, 44) <sub>1</sub>	(2, 5; 5, 5) <sub>0</sub> ∪ (3, 5; 4, 5) <sub>1</sub>
8	12	(0; 0, 05) <sub>0</sub> ∪ (0; 0, 02) <sub>1</sub>	(1; 5) <sub>0</sub> ∪ (2, 5; 3, 5) <sub>1</sub>
9	4	(0, 4; 0, 8) <sub>0</sub> ∪ (0, 55; 0, 65) <sub>1</sub>	(0; 0, 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 03; 0, 07) <sub>1</sub>
9	6	(0, 29; 0, 49) <sub>0</sub> ∪ (0, 34; 0, 44) <sub>1</sub>	(2, 5; 5, 5) <sub>0</sub> ∪ (3, 5; 4, 5) <sub>1</sub>
9	12	(0; 0, 05) <sub>0</sub> ∪ (0; 0, 02) <sub>1</sub>	(1; 5) <sub>0</sub> ∪ (2, 5; 3, 5) <sub>1</sub>
10	6	(0, 9; 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 98; 1) <sub>1</sub>	(2, 5; 5, 5) <sub>0</sub> ∪ (3, 5; 4, 5) <sub>1</sub>
10	12	(0; 0, 05) <sub>0</sub> ∪ (0; 0, 02) <sub>1</sub>	(1; 5) <sub>0</sub> ∪ (2, 5; 3, 5) <sub>1</sub>
11	6	(0; 0, 2) <sub>0</sub> ∪ (0, 05; 0, 15) <sub>1</sub>	(2, 5; 5, 5) <sub>0</sub> ∪ (3, 5; 4, 5) <sub>1</sub>
11	1	(0, 7; 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 85; 0, 95) <sub>1</sub>	(0, 5; 3, 5) <sub>0</sub> ∪ (1, 5; 2, 5) <sub>1</sub>
12	13	(0, 95; 1) <sub>0</sub> ∪ (0, 99; 1) <sub>1</sub>	(0; 4) <sub>0</sub> ∪ (0; 2) <sub>1</sub>

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Ідея, що лежить в основі алгоритму укрупнення графа, полягає в послідовному використанні правил об'єднання паралельних дуг, усуненні дуги-петлі та вершини без петлі.

Алгоритм укрупнення включає такі кроки.

1. Позбавляємось дуг-петель на вершинах 1, 2, 3, 4, 5, використовуючи для цього вирази, наведені в [6]:

$$\tilde{p}'_{ij} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (p'_{ij\alpha}, \overline{p'_{ij\alpha}}), \tag{5}$$

$$\tilde{t}'_{ij} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (t'_{ij\alpha}, \overline{t'_{ij\alpha}}), \tag{6}$$

де 
$$\underline{p}'_{ij\alpha} = \frac{p_{ij\alpha}}{1 - p_{ii\alpha}}; \overline{p}'_{ij\alpha} = \min\left(1, \frac{\overline{p}_{ij\alpha}}{1 - p_{ii\alpha}}\right);$$

$$\underline{t}'_{ij\alpha} = \underline{t}_{ij\alpha} + \frac{t_{ij\alpha} \cdot p_{ii\alpha}}{1 - p_{ii\alpha}}; \overline{t}'_{ij\alpha} = \overline{t}_{ij\alpha} + \frac{\overline{t}_{ij\alpha} \cdot p_{ii\alpha}}{1 - p_{ii\alpha}}.$$

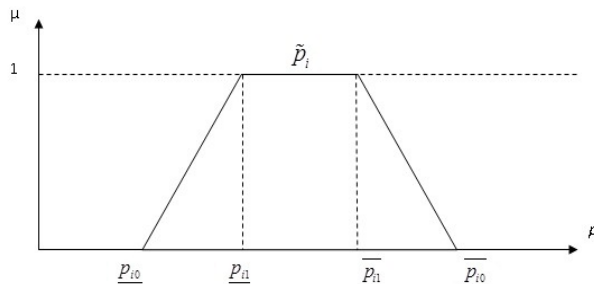


Рис. 2. Нечітке число з трапецієвидною функцією приналежності

Fig. 2. Fuzzy number with trapezoidal membership function

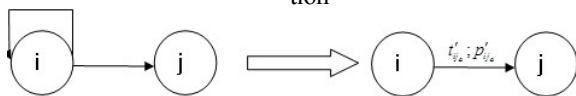


Рис. 3. Усунення дуги петлі

Fig. 3. Elimination of arc loops

2. Далі потрібно усунути вершини 7, 8, 9, 10. Для цього по кожній вершині виконаємо такий алгоритм:

1 – виділити множину дуг, що входять у вершину;

2 – виділити множину дуг, що виходять з вершини;

3 – видалити з *L*-матриці ці множини і перемножити їх, використовуючи визначені пра-

doi 10.15802/stp2015/42164

вила;

4 – додати до *L*-матриці отримані результати.

3. На рис. 4 видно, що виникли паралельні шляхи від вершин графа 1, 2, 3. Їх також потрібно видалити.

Граф після названих перетворень має такий вигляд:

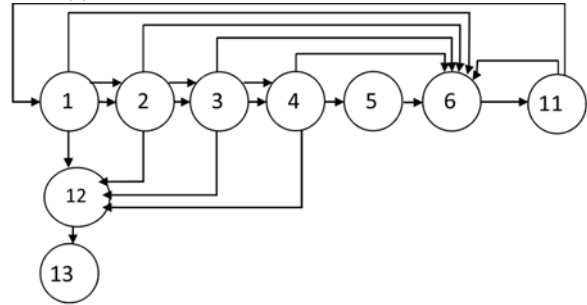


Рис. 4. Результат видалення дуг-петель та вершин графа 7, 8, 9, 10

Fig. 4. The result of the removal of arches, loops and vertices 7, 8, 9, 10

4. Видаляємо вершину 2 та паралельні дуги, що утворились після цього (1-12) та (1-6).

5. Видаляємо вершину 3 та паралельні дуги, що утворились після цього (1-12) та (1-6).

6. Видаляємо вершину 4 та паралельні дуги, що утворились після цього (1-12) та (1-6).

7. Видаляємо вершину 5 та паралельні дуги (1-6).

8. Видаляємо вершину 1 та паралельні дуги (11-6).

**Результати**

В результаті перетворень остаточний вид *L*-матриці представлений виразом (7):

$$L = \begin{pmatrix} 12 & 13 & (0,95;1)_0 \cup (0,99;1)_1 & (0;4)_0 \cup (0;2)_1 \\ 6 & 11 & (0,95;1)_0 \cup (0,99;1)_1 & (5;11)_0 \cup (7;9)_1 \\ 11 & 6 & (0,1124;1)_0 \cup (0,47;1)_1 & (0,67;15,09)_0 \cup (5,66;13,75)_1 \\ 11 & 12 & (0;0,016)_0 \cup (0;0,0387)_1 & (1,5;14,75)_0 \cup (4;9,38)_1 \end{pmatrix}$$

Нечіткий імовірнісний граф після алгоритму укрупнення, що відповідає *L*-матриці (7), наведений на рис. 5.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

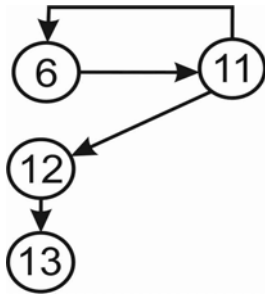


Рис. 5. Еквівалентний нечіткий імовірнісний граф керування поїздом

Fig. 5. Equivalent fuzzy probabilistic graph of train-handling

Еквівалентний НІГ має чотири вершини, основні з яких 6 та 11 описують роботу машиніста під час нормальної експлуатації. Вершини 12 та 13 характеризують показники роботи в небезпечних ситуаціях.

**Наукова новизна та практична значимість**

В результаті аналізу еквівалентного графа отримані такі параметри:

1. Характеристики дуги (11-6):

$$\tilde{p}_{11-6} = (0, 1124; 1)_0 \cup (0, 47; 1)_1;$$

$$\tilde{t}_{11-6} = (0, 67; 15, 09)_0 \cup (5, 66; 13, 75)_1$$

вказують (з імовірністю більше 0,5) мінімальний час, який проходить від аналізу ситуації та оцінки ефективності попереднього керуючого рішення до прийняття наступного керуючого рішення (включаючи рішення не виконувати ніяких дій) знаходиться в інтервалі [5, 66; 13, 75] с;

2. Характеристики дуги (11-12):

$$\tilde{p}_{11-12} = (0; 0, 016)_0 \cup (0; 0, 0387)_1;$$

$$\tilde{t}_{11-12} = (1, 5; 14, 75)_0 \cup (4; 9, 38)_1$$

вказують, що машиністу після оцінки ефективності прийнятого керуючого рішення приблизно в 1–2 % випадків доводиться ідентифікувати небезпечну ситуацію. Час, що потрібний для цього, знаходиться в інтервалі [4, 9; 9, 38] с.

Ці параметри свідчать про те, що швидкість прийняття рішень машиністом можливо і потрібно підвищувати. Зменшення часу прийняття керуючого рішення дасть ефект у вигляді підвищення ефективності використання рухо-

мого складу шляхом зменшення відхилення поточного режиму керування від раціонального, що розрахований та наведений в режимних картах. Зменшення часу на ідентифікацію нештатних ситуацій прямо впливає на безпеку руху, і чим більше поточна швидкість, тим важливіше мати можливість в найкоротший термін виявити небезпеку та приступити до її зниження.

**Висновки**

В роботі розроблені теоретичні основи формалізації процесу та отримана модель керуючої діяльності машиніста локомотива за допомогою нечіткого імовірнісного графа. Для цього визначений перелік операцій, що виконуються машиністом під час руху, та виявлені логічні зв'язки між ними. Шляхом використання алгоритму укрупнення отриманий еквівалентний НІГ, за допомогою якого можливо оцінити час, що потрібний людині для оцінки поточної поїзної обстановки та прийняття керуючого рішення як в нормальних умовах експлуатації, так і в умовах небезпечної ситуації. В подальшому ця модель може бути використана для оцінки ефективності локомотивних систем підтримки прийняття рішень шляхом порівняння показників роботи людини та системи, що проектується.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Горобченко, О. М. Визначення імовірності виникнення транспортної події в локомотивному господарстві / О. М. Горобченко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 35. – С. 48–51.
2. Ільман, В. М. Відтворення графів за технологічними шляхами / В. М. Ільман, В. В. Скалозуб, В. І. Шинкаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 18. – С. 85–94.
3. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: теория, синтез, эффективность / В. А. Тарасов, Б. М. Герасимов, И. А. Левин, В. А. Корнейчук. – Киев : МАКНС, 2007. – 336 с.
4. Моделирование процесса оперативного планирования работы локомотивного парка і локомотивних бригад / І. В. Жуковицький, В. В. Скалозуб, О. В. Ветрова, О. Л. Зіненко // Вісн.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 75–78.
5. Раскин, Л. Г. Нечеткая математика : моногр. / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Харьков : Парус, 2008. – 352 с.
  6. Ротштейн, А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба. – Винница : Континент, 1997. – 142 с.
  7. Advanced technologies and energy efficiency: fuel economy program maintained jointly by the US Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and the US Environmental Protection Agency [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fueleconomy.gov/FEG/atv.shtml>. – Назва з екрана. – Перевірено : 29.11.2014.
  8. Applications of Probabilistic Graphical Models to Diagnosis and Control of Autonomous Vehicles / A. L. Madsen, U. B. Kjærulff, J. Kalwa [et al.] // The Second Bayesian Modeling Applications Workshop. – Aalborg : Aalborg Universitet, 2005. – 12 p.
  9. Bower, E. GB Rail Powertrain Efficiency Improvements. Delivering Value through Innovation & Technology [Електронний ресурс] / E. Bower, A. Skipton-Carter, J. Buchanan. – Режим доступу: [http://www.ricardo.com/Documents/PRs%20pdf/PRs%202012/Q57475\\_DfT\\_G\\_B\\_Rail\\_Diesel\\_Powertrain\\_Efficiency\\_Improvements\\_Word\\_FINAL\\_14Mar12.pdf](http://www.ricardo.com/Documents/PRs%20pdf/PRs%202012/Q57475_DfT_G_B_Rail_Diesel_Powertrain_Efficiency_Improvements_Word_FINAL_14Mar12.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено : 27.11.2014).
  10. Gentle, J. E. Matrix Algebra: Theory, Computations, and Applications in Statistics / J. E. Gentle. – New York : Springer Science & Business Media, 2007. – 552 p. doi: 10.1007/978-0-387-70873-7.
  11. Naumann, U. Combinatorial Scientific Computing / U. Naumann, O. Schenk. – London : CRC Press, 2012. – 600 p.
  12. Okorokov, A. M. Strategic management of transport cargo complex / A. M. Okorokov // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 4 (52). – С. 101–110. doi: 10.15802/stp2014/27320.
  13. Wang, Z. The Theory and Methods of Design and Optimization for Railway Intelligent Transportation Systems (RITS) / Z. Wang, J. Limin. – Beijing, China : Bentham Science Publishers Ltd., 2011. – 149 p. doi: 10.2174/97816080513801110101.

Т. В. БУТЬКО<sup>1</sup>, А. Н. ГОРОБЧЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, площадь Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61000, тел. + 38 (057) 730 10 89, эл. почта uermp@ukr.net, ORCID 0000-0003-4027-3030

<sup>2\*</sup>Каф. «Эксплуатация и ремонт подвижного состава», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, площадь Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61000, тел. + 38 (063) 580 27 13, эл. почта superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТА ЛОКОМОТИВА С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ ГРАФОВ

**Цель.** Повышение эффективности и безопасности управления локомотивом является важной и актуальной научно-прикладной проблемой. Каждый машинист при ведении поезда опирается на свой опыт и знания, поэтому обобщение и выявление наиболее рациональных способов управления локомотивом является одним из этапов разработки мероприятий по снижению себестоимости перевозок. Целью статьи является формализация описания процесса управления локомотивом и определение параметров качества этого процесса. **Методика.** Для достижения поставленной цели в работе использована теория нечетких вероятностных графов. Вершины графа соответствуют событиям начала и окончания операций по управлению поездом. Дуги графа описывают операции по управлению поездом. Граф состоит из тринадцати вершин, соответствующих основным управляющим действиям машиниста. Весовые коэффициенты переходов между вершинами заданы нечеткими числами. Их значения получены методом экспертных оценок. Нечеткие значения вероятности и времени перехода представлены в виде чисел с трапециевидной функцией принадлежности. **Результаты.** С помощью последовательного объединения параллельных дуг, устранения петель и вершин получены эквивалентный нечеткий граф управления поездом и соответствующая ему  $L$ -матрица. Эквивалентный граф отдельно учитывает деятельность машиниста при нормальной эксплуатации и при воз-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

никновених нештатних ситуацій. **Научна новизна.** Розроблені теоретичні основи формалізації описання процесу управляючої діяльності машиніста локомотива з допомогою нечіткого вероятнісного графа. Отримані параметри, що характеризують процеси прийняття рішень машиністом. В подальшому ця модель може бути використана для оцінки ефективності локомотивних систем підтримки прийнятих рішень. **Практична значимість.** З допомогою отриманої моделі можливо оцінити існуючі резерви підвищення якості управління локомотивом. Зниження часу для прийняття рішень приблизити поточний режим управління до раціонального і знизити витрати на тягу поїздів. А зменшення часу на ідентифікацію нештатних ситуацій приведе до підвищення безпеки руху шляхом реалізації заходів раннього реагування на небезпеку.

*Ключові слова:* безпека руху; локомотивна бригада; нечіткий граф; поїзд; прийняття рішення

T. V. BUTKO<sup>1</sup>, O. M. HOROBCHENKO<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Деп. «Management of Operational Work», Ukrainian State University of Railway Transport, Feiierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61000, tel. +38 (057) 730 10 89, e-mail uermp@ukr.net, ORCID 0000-0003-4027-3030

<sup>2\*</sup>Деп. «Operation and Maintenance of Rolling Stock», Ukrainian State University of Railway Transport, Feiierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61000, tel. +38 (063) 580 27 13, e-mail superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852

## SIMULATION OF DRIVER'S LOCOMOTIVE-HANDLING ACTIVITY USING THE THEORY OF FUZZY GRAPHS

**Purpose.** The efficiency and safety of locomotive control improving is important and relevant scientific and practical problem. Every driver during the trains-handling bases on his experience and knowledge, that is why the compilation and detection the most efficient ways to control the locomotive-handling is one of the stages of measures development to reduce transportation costs. The purpose of this paper is a formalization process description of locomotive-handling and quality parameters determination of this process. **Methodology.** In order to achieve this goal the theory of fuzzy probabilistic graphs was used. Vertices of the graph correspond to the events start and end operations at train-handling. The graph arcs describe operations on train-handling. Graph consists of thirteen peaks corresponding to the main control actions of the engine-driver. The weighting factors of transitions between vertices are assigned by fuzzy numbers. Their values were obtained by expert estimates. Fuzzy probabilities and transition time are presented as numbers with trapezoidal membership function. **Findings.** Using successive merging of parallel arcs, loops and vertices elimination, the equivalent fuzzy graph of train-handling and the corresponding *L*-matrix were obtained. Equivalent graph takes into account separately activity of the driver during normal operation and during emergency situations. **Originality.** The theoretical foundations of describing process formalization in driver's locomotive-handling activity were developed using the fuzzy probabilistic graph. The parameters characterizing the decision-making process of engineer were obtained. **Practical value.** With the resulting model it is possible to estimate the available reserves for the quality improvement of locomotive-handling. Reduction in the time for decision-making will lead to the approximation the current mode of control to the rational one and decrease costs of hauling operations. And reduction in the time for the emergency situations identifying will lead to the traffic safety increasing through the implementation of measures of early response to danger.

*Keywords:* safety movement; the locomotive crew; fuzzy graph; train, decision-making

### REFERENCES

1. Horobchenko O.M. Vyznachennia imovirnosti vynyknennia transportnoi podii v lokomotyvnomu hospodarstvi [The probability of traffic accidents determination in the locomotive facilities]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 35, pp. 48-51.
2. Ilman V.M., Skalozub V.V., Shynkarenko V.I. Vidtvorennia hrafiv za tekhnolohichnymy shliakhamy [The graphs reconstruction with technological ways]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 18, pp. 85-94.



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

3. Tarasov V.A., Gerasimov B.M., Levin I.A., Korneychuk V.A. *Intellektualnyye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: teoriya, sintez, effektivnost* [Intelligent systems of decision support. Theory, synthesis, efficiency]. Kyiv, MAKNS Publ., 2007. 336 p.
4. Zhukovytskyi I.V., Skalozub V.V., Vietrova O.V., Zinenko O.L. Modeliuvannia protsesu operatyvnoho planuvannia roboty lokomotyvnoho parku i lokomotyvnykh bryhad [Modeling of the operational planning process of working locomotives and locomotive crews]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2006, issue 12, pp. 75-78.
5. Raskin L.G., Seraya O.V. *Nechetkaya matematika* [Fuzzy mathematics]. Kharkov, Parus Publ., 2008. 352 p.
6. Rotshteyn A.P., Shtovba S.D. *Nechetkaya nadezhnost algoritmicheskikh protsessov* [Fuzzy reliability of algorithmic processes]. Vinnitsa, Kontinent Publ., 1997. 142 p.
7. Advanced technologies and energy efficiency: fuel economy program maintained jointly by the US Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and the US Environmental Protection Agency. – Available at: <http://www.fueleconomy.gov/FEG/atv.shtml> (Accessed 29 November 2014).
8. Madsen A.L., Kjærulff U.B., Kalwa J., Perrier M., Sotelo M.A. Applications of Probabilistic Graphical Models to Diagnosis and Control of Autonomous Vehicles. The Second Bayesian Modeling Applications Workshop. Aalborg, Aalborg Universitet Publ., 2005. 12 p.
9. Bower E., Skipton-Carter A., Buchanan J. GB Rail Powertrain Efficiency Improvements. Delivering Value Through Innovation & Technology, 2012. – Available at: [http://www.ricardo.com/Documents/PRs%20pdf/PRs%202012/Q57475\\_DfT\\_GB\\_Rail\\_Diesel\\_Powertrain\\_Efficiency\\_Improvements\\_Word\\_FINAL\\_14Mar12.pdf](http://www.ricardo.com/Documents/PRs%20pdf/PRs%202012/Q57475_DfT_GB_Rail_Diesel_Powertrain_Efficiency_Improvements_Word_FINAL_14Mar12.pdf) (Accessed 27 November 2014).
10. Gentle J.E. *Matrix Algebra: Theory, Computations, and Applications in Statistics*. New York, Springer Science & Business Media Publ., 2007. 552 p.
11. Naumann U., Schenk O. *Combinatorial Scientific Computing*. London, CRC Press Publ., 2012. 600 p.
12. Okorokov A.M. Strategic management of transport cargo complex. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 4 (52), pp. 101-110.
13. Wang Z., Li-min J. *The Theory and Methods of Design and Optimization for Railway Intelligent Transportation Systems (RITS)*. Beijing, China, Bentham Science Publishers Ltd. Publ., 2011. 149 p.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О. Б. Бабаніним (Україна); д.т.н., проф. Б. Є. Боднарем (Україна)*

Надійшла до редколегії 9.01.2015

Прийнята до друку 20.03.2015