

УДК 621.331

Т. І. КИРИЛЮК

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В.А. Лазаряна, м. Дніпропетровськ

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВТРАТ НА ОСНОВІ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ**

*На основе имитационного моделирования определены средние значения потерь и коэффициентов потерь электроэнергии для опытных участков. Получены уравнения регрессии позволяющие определять коэффициенты потерь для участков постоянного и переменного токов.*

*На основі імітаційного моделювання визначені середні значення втрат та коефіцієнтів втрат електроенергії для дослідних ділянок. Отримані рівняння регресії, що дозволяють визначення коефіцієнти втрат для ділянок постійного та змінного струмів.*

**Вступ**

Постановка експериментальних досліджень на залізниці – складна задача. Такі дослідження вимагають довгострокової зміни графіка руху та режиму ведення поїзду [1]. Тому вивчення втрат електроенергії в контактній мережі доцільно виконувати методами імітаційного моделювання. Найпростішим планом першого порядку є план повного факторного експерименту вигляду 2<sup>n</sup>.

**Метою досліджень** є побудова математичної моделі для визначення коефіцієнту втрат. В процесі експерименту, обробки даних та формалізації результатів у виді моделі виникають похибки та втрачається частина інформації. Застосування методів планування експерименту дозволяє визначити похибки математичної моделі та судити про її адекватність.

**Основна частина**

Процес визначення коефіцієнта втрат в загальному вигляді описується наступною функцією:

$$k_B = f(DS\%; n; V_{cp}; I; t_{н.с.}^0), \tag{1}$$

де DS% – знос контактних проводів у відсотках;

n – кількість поїздів на розрахунковій зоні;

V<sub>cp</sub> – середня швидкість електровозу на ділянці;

I – струм електровозу;

t<sub>н.с.}^0 – температура навколишнього середовища.</sub>

Проведено дослідження для ділянки постійного (рис. 1 а) та змінного (рис. 1 б) струмів.

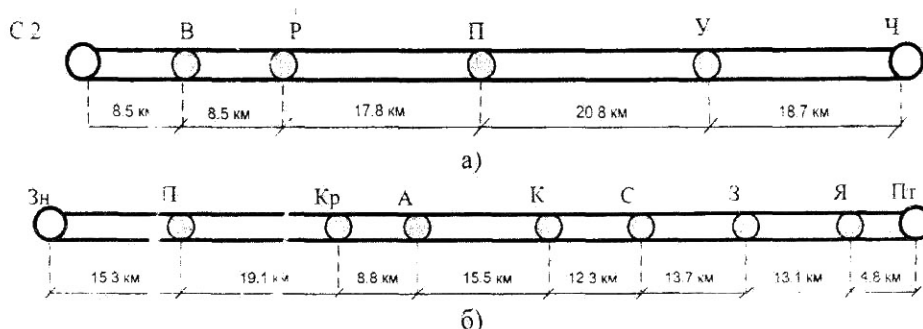


Рис. 1. Схема дослідної ділянки:

а – Ч-С2 Придніпровської залізниці, б – З-П Одеської залізниці.

Для експерименту створена модель з наступними вихідними даними (табл. 1)

Таблиця 1

Параметри дослідних ділянок

Параметр	Схема живлення	Довжина ділянки, км	Підіска	Мінімальний міжпоїзний інтервал, хв
Ділянка				
Ч-С2 Придніпровської залізниці	двостороння	18	М-12(+2МФ-100+А-185	6
З-П Одеської залізниці	двостороння роздільна	50	М-95+МФ-100	10

На основі статистичних досліджень отримані межі зміни вихідних параметрів для визначення коефіцієнту налаштування лічильника втрат (знос контактних проводів у відсотках, кількість поїздів на розрахунковій зоні, середня швидкість електровозу на ділянці, струм електровозу, температура навколишнього середовища) (табл. 2).

Таблиця 2

Межі зміни вихідних параметрів

Параметр	DS%	n. пар	$V_{cp}$ , км/год.	I, А	$t_{н.с.}^o$ , °C
Верхня межа	30*	3*	60	900*	30
	25**	8**		120**	
Середина	15*	2*	55	850*	5
	12,5**	5**		110**	
Нижня межа	0	1*	50	800*	-20
		2**		100**	

\* для ділянки постійного струму, \*\* для ділянки змінного струму.

Імітаційне моделювання проведено в спеціалізованому програмному комплексі Matrix (табл. 3).

Таблиця 3

Фрагмент результатів моделювання для ділянки постійного струму

№ експер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
втрати, кВт·год.	433.9	77.2	92.657	114.78	299.3	500.03	492.2	88.9	87.5	133	328.7
втрати, %	19.02	9.75	9.75	12.1	17.7	19.5	21.6	10	11.1	12.5	19.5
квадрат струму, тис. А <sup>2</sup> ·год	455,0	64	76.832	76.83	346.55	575.87	455.01	81	64	97.24	346.55

Розглянемо більш докладно повний факторний експеримент для ділянки постійного струму.

На першому етапі складена таблиця, в якій значення факторів знаходяться у всіх можливих поєднаннях. Прийняті припущення, що модель коефіцієнту затрат лінійна.

Надалі, на підставі отриманих результатів, складена система з тридцятьма двома рівнянь ( $2^5 = 32$ ) з п'ятьма змінними. Матрицю даного виду наведемо матрицею експерименту.

Фрагмент матриці повного факторного експерименту

$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	30	3	50	800	-20	0.955	0.953	0.956
1	30	1	60	800	-20	1.201	1.199	1.219
1	30	1	50	800	-20	1.212	1.211	1.215
1	30	1	50	800	30	1.501	1.496	1.506

У матриці експерименту другий, третій, четвертий, п'ятий і шостий стовпці представляють собою значення факторів, сьомий, восьмий і дев'ятий стовпці – значення відгуку системи, а перший стовпець містить одиниці, відповідні одиничним коефіцієнтам вільного члена моделі. Будемо вважати цей стовпець деяким віртуальним фактором, який завжди приймає одиничні значення.

На наступному етапі для спрощення рішення системи проведено нормування факторів. Верхнім значенням факторів присвоєні нормовані значення +1, нижнім значенням – -1, середньому значенню –0.

Фрагмент нормалізованої матриці повного факторного експерименту

№ рядка матриці	$\tilde{x}_0$	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	1	1	1	-1	-1	-1	0.955	0.953	0.956
2	1	1	-1	1	-1	-1	1.201	1.199	1.219
3	1	1	-1	-1	-1	-1	1.212	1.211	1.215
4	1	1	-1	-1	-1	1	1.501	1.496	1.506

Визначена дисперсія для кожного експерименту [2] і проведена перевірка відтворюваності експериментальних даних за допомогою критерію Кохрена.

Для нашого випадку розрахункове значення  $\sigma_{\text{розрах}} = 0.162$ . [3], а табличне

$\sigma_{\text{табл}} = 0.198$  [4]. Оскільки  $\sigma_{\text{розрах}} < \sigma_{\text{табл}}$ , то ряд дисперсій однорідний.

Модель коефіцієнта витрат представимо у вигляді загального рівняння

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_1x_2 + b_7x_1x_3 + b_8x_1x_4 + b_9x_1x_5 + b_{10}x_2x_3 + b_{11}x_2x_4 + b_{12}x_2x_5 + b_{13}x_3x_4 + b_{14}x_3x_5 + b_{15}x_4x_5 + b_{16}x_1x_2x_3 + b_{17}x_1x_2x_4 + b_{18}x_1x_2x_5 + b_{19}x_1x_3x_4 + b_{20}x_1x_3x_5 + b_{21}x_2x_3x_4 + b_{22}x_2x_4x_5 + b_{23}x_3x_4x_5 + b_{24}x_1x_3x_5 + b_{25}x_2x_3x_5 + b_{26}x_1x_2x_3x_4 + b_{27}x_1x_2x_3x_5 + b_{28}x_1x_3x_4x_5 + b_{29}x_1x_2x_4x_5 + b_{30}x_2x_3x_4x_5 + b_{30}x_1x_2x_3x_4x_5. \quad (2)$$

Для розрахунку коефіцієнтів регресії побудована розширена матриця, яка враховує взаємодію факторів, на основі якої знайдені всі коефіцієнти.

Фрагмент розширеної матриці повного факторного експерименту

x0	x1	x2	x3	x4	x5	x1x2	x1x3	x1x4	x1x5	x2x3	x2x4	x2x5	x3x4	x3x5	x4x5	x1x2x3	x1x2x4	x1x2x5	x1x3x4	x1x4x5	x2x3x4	x2x4x5	x3x4x5	x1x3x5	x2x3x5	x1x2x3x4	x1x2x3x5	x1x3x4x5	x1x2x4x5	x2x3x4x5	x1x2x3x4x5	y	
1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.494
1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.206
1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.206
1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.954

Перехід від нормованих до ненормованих факторів здійснено зворотним перетворенням [5]. Визначені коефіцієнти моделі в дійсних координатах (табл. 4)

Таблиця 4

Коефіцієнти рівняння регресії в дійсних координатах

b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>	b <sub>8</sub>	b <sub>9</sub>	b <sub>10</sub>	b <sub>11</sub>	b <sub>12</sub>	b <sub>13</sub>	b <sub>14</sub>	b <sub>15</sub>	b <sub>16</sub>
0.002	-0.176	0.005	0.001	0.003	-0.001	23.342·10 <sup>-5</sup>	1.283·10 <sup>-5</sup>	-2.714·10 <sup>-5</sup>	0.002	40.948·10 <sup>-5</sup>	-0.001	-5.755·10 <sup>-5</sup>	9.314·10 <sup>-5</sup>	1.636·10 <sup>-5</sup>	13.165·10 <sup>-5</sup>
b <sub>17</sub>	b <sub>18</sub>	b <sub>19</sub>	b <sub>20</sub>	b <sub>21</sub>	b <sub>22</sub>	b <sub>23</sub>	b <sub>24</sub>	b <sub>25</sub>	b <sub>26</sub>	b <sub>27</sub>	b <sub>28</sub>	b <sub>29</sub>	b <sub>30</sub>	b <sub>31</sub>	
0.701·10 <sup>-5</sup>	-1.106·10 <sup>-5</sup>	-0.229·10 <sup>-5</sup>	0.028·10 <sup>-5</sup>	-2.222·10 <sup>-5</sup>	0.874·10 <sup>-5</sup>	-0.091·10 <sup>-5</sup>	0.405·10 <sup>-5</sup>	3.653·10 <sup>-5</sup>	-0.138·10 <sup>-5</sup>	0.239·10 <sup>-5</sup>	-0.515·10 <sup>-5</sup>	0.014·10 <sup>-5</sup>	-0.056·10 <sup>-5</sup>	-0.002·10 <sup>-5</sup>	

Коливання значень функції відгуку при дублюванні експерименту в кожному досліді вносить похибку при визначенні коефіцієнтів регресії. При достатньо малих значеннях коефіцієнтів b<sub>i</sub> абсолютна похибка їх визначення, обумовлена похибкою визначення значень функції відгуку, може виявитись недопустимо великою.

Коефіцієнти рівняння регресії, абсолютна величина яких дорівнює довірчому інтервалу або більше його, були визнані статистично значимими і включені до кінцевого рівняння [5].

Із табл. 4 вибрані статистично значимі коефіцієнти рівняння регресії, а саме b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, b<sub>5</sub>, b<sub>10</sub>.

З огляду на наведені вище судження остаточно отримана модель в дійсних координатах. Рівняння регресії має наступний вигляд

$$k_B = 0.748 + 0.002DS\% - 0.176n - 0.005V_{cp} + 0.003t_{н.с.}^0 + 0.002nV_{cp} \quad (3)$$



Отримане рівняння регресії має наступний вигляд

$$k_B = 9.022 + 0.056n^2 - 0.72n - 0.024DS\% + 0.933I_{н.с.}^0 \quad (5)$$

Проведено перевірку моделі (5) на адекватність. Розрахунок значення критерію Фішера  $F_{\text{розрах}} = 1.192$ . Для заданих параметрів  $F_{\text{табл}} = 1.6$  [4]. Умова  $F_{\text{розрах}} < F_{\text{табл}}$  виконується, отже модель адекватна.

#### Висновки

1. Математичне моделювання для ділянок Придніпровської (постійного струму) та Одеської (змінного струму) залізниць показало, що середні втрати електроенергії в контактній мережі на представлених ділянках складають 12,4 % та 6,3 % відповідно.

2. На основі повного факторного експерименту отримані рівняння регресії для визначення коефіцієнту втрат для ділянок постійного та змінного струмів. На основі імітаційного моделювання визначено, що середній коефіцієнт втрат для ділянки постійного струму 1,16 Ом, а для ділянки змінного струму 5,58 Ом для прийнятих схем живлення.

#### Список літератури

1. Кузнецов В. Г. Экспериментальное дослідження «умовних втрат» електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Ю. М. Сергатов, Т. І. Кирилюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/8. – С. 29–33.
2. Бродский В. З. Введение в факторное планирование эксперимента / В. З. Бродский – М. : Наука, 1976. – 223 с.
3. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. / Д. К. Монтгомери – Л. : Судостроение, 1980. – 384 с.
4. Табличные значения критериев / Режим доступа: [www.chem.ssti.ru/files/subjects/OMS/tablichnye\\_znacheniya\\_kriteriev.pdf](http://www.chem.ssti.ru/files/subjects/OMS/tablichnye_znacheniya_kriteriev.pdf); 2012.
5. Налимов В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова – М.: Наука, 1965. – 340 с.

#### METHOD FOR DETERMINATION OF LOSS COEFFICIENT USING COMPLETE FACTORIAL EXPERIMENT

T. I. Kirilyuk, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport

*Average values of electric power losses and the loss coefficient for trial areas were determined using simulation modeling. Regression equations that allow determining loss coefficients were received for the areas of direct and alternating current.*

Поступила в редакцию 26.08 2013 г.