

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 621.331

Т. И. 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^n .

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:

$$k_B = f(DS\%; n; V_{cp}; I; t_{H.c.}^0), \quad (1)$$

де $DS\%$ – знос контактних проводів у відсотках;

n – кількість поїздів на розрахунковій зоні;

V_{cp} – середня швидкість електровозу на ділянці;

I – струм електровозу;

$t_{H.c.}^0$ – температура навколошнього середовища.

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

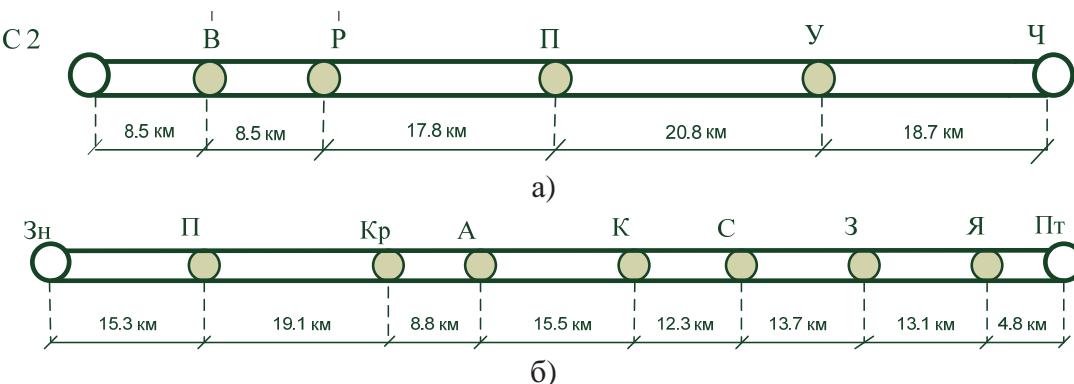


Рис. 1. Схема дослідної ділянки:

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	Підвіска	Мінімальний міжпоїзний інтервал, хв
Ділянка				
Ч-С2 Придніпровськ ої залізниці	двостороння	18	М-120+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 відсotках, кількість поїздів на розрахунковій зоні, середня швидкість електровозу на ділянці, струм електровозу, температура навколошнього середовища) (табл. 2).

Таблиця 2

Межі зміни вихідних параметрів

Параметр	DS %	n , пар	V _{cp} , км/год.	I , A	t _{H.C.} ^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 ² · 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 втрат лінійна.

Надалі, на підставі отриманих результатів, складена система з тридцяти двох рівнянь ($2^5 = 32$) з п'ятьма змінними. Матрицю даного виду назовемо 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 $\sigma_{\text{розр}} = 0.162$. [3], а табличне

$\sigma_{\text{табл}} = 0.198$ [4].

Оскільки $\sigma_{\text{розр}} < \sigma_{\text{табл}}$, то ряд дисперсій однорідний.

Модель коефіцієнта втрат представимо у вигляді загального рівняння

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_1x_2 + b_7x_1x_3 + b_8x_1x_4 + b_9x_1x_5 + b_{10}x_2x_3 + b_{11}x_2x_4 + b_{12}x_2x_5 + b_{13}x_3x_4 + b_{14}x_3x_5 + b_{15}x_4x_5 + b_{16}x_1x_2x_3 + b_{17}x_1x_2x_4 + b_{18}x_1x_2x_5 + b_{19}x_1x_3x_4 + b_{20}x_1x_4x_5 + b_{21}x_2x_3x_4 + b_{22}x_2x_4x_5 + b_{23}x_3x_4x_5 + b_{24}x_1x_3x_5 + b_{25}x_2x_3x_5 + b_{26}x_1x_2x_3x_4 + b_{27}x_1x_2x_3x_5 + b_{28}x_1x_3x_4x_5 + b_{29}x_1x_2x_4x_5 + b_{30}x_2x_3x_4x_5 + b_{31}x_1x_2x_3x_4x_5. \quad (2)$$

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

Фрагмент розширеної матриці повного факторного експерименту

	x0	x1	x2	x3	x4	x5	
0.701·10 ⁻⁵	1	1	1	1	1	1	x1x2
-1.106·10 ⁻⁵	1	1	1	-1	-1	-1	x1x3
-0.229·10 ⁻⁵	1	1	-1	-1	-1	-1	x1x4
0.028·10 ⁻⁵	1	-1	-1	-1	-1	-1	x1x5
-2.222·10 ⁻⁵	-1	1	1	1	1	1	x2x3
0.874·10 ⁻⁵	1	1	1	1	1	1	x2x4
-0.091·10 ⁻⁵	-1	1	1	1	1	1	x2x5
0.405·10 ⁻⁵	-1	1	1	1	1	1	x3x4
3.653·10 ⁻⁵	1	1	1	1	1	1	x3x5
-0.138·10 ⁻⁵	-1	1	1	1	1	1	x4x5
0.239·10 ⁻⁵	40.948·10 ⁻⁵	0.002	-2.714·10 ⁻⁵	1.283·10 ⁻⁵	23.342·10 ⁻⁵	-0.001	0.002·10 ⁻⁵
-0.515·10 ⁻⁵	-1	1	1	1	1	1	x1x3x4
0.014·10 ⁻⁵	-1	1	1	1	1	1	x1x3x5
-0.056·10 ⁻⁵	-5.755·10 ⁻⁵	9.314·10 ⁻⁵	-0.001	-0.755·10 ⁻⁵	0.948·10 ⁻⁵	0.002	-0.001·10 ⁻⁵
-0.002·10 ⁻⁵	1.636·10 ⁻⁵	b ₃₀	b ₂₉	b ₂₈	b ₂₇	b ₂₆	b ₂₅
	13.165·10 ⁻⁵						
							1.494 1.206 1.206 0.954
							y

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 ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	b ₉	b ₁₀	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₁₅	b ₁₆
b ₁₇	b ₁₈	b ₁₉	b ₂₀	b ₂₁	b ₂₂	b ₂₃	b ₂₄	b ₂₅	b ₂₆	b ₂₇	b ₂₈	b ₂₉	b ₃₀	b ₃₁	

Коливання значень функції відгуку при дублюванні експерименту в кожному досліді вносить похибку при визначенні коефіцієнтів регресії. При достатньо малих значеннях коефіцієнтів b_i 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 значими і включені до кінцевого рівняння [5].

Із табл. 4 вибрані статистично значими коефіцієнти рівняння регресії, а саме b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_5 , b_{10} .

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

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

Модель (3) перевірена на адекватність за критерієм Фішера.

Розрахункове значення критерію Фішера $F_{\text{роздах}} = 938.431$, табличне – $F_{\text{табл}} = 1.68$ [4]. Оскільки умова $F_{\text{роздах}} < F_{\text{табл}}$ не виконується, отже модель не може бути визнана адекватною.

З огляду на отримані результати план експерименту був добудований до плану другого порядку (композиційний план) та сформована функція відгуку у вигляді повного квадратичного поліному, без втрати інформації про попередньо зроблені досліди.

Фрагмент матриці ортогонального центрально-композиційного плану

Додаткове моделювання показало, що середні втрати для ділянки Придніпровської залізниці за результатами експерименту склали 12,4 %, а середній коефіцієнт втрат – 1,16 Ом.

Аналогічні перетворення проведені з утвореною матрицею ортогонального центрально-композиційного плану другого порядку та отримано рівняння (4)

$$k_B = 1.439 + 0.021n^2 - 0.378n + 0.003nV_{\text{cp}} + 0.004DS\% + 0.005t_{\text{H.c.}}^o \quad (4)$$

Проведено перевірку моделі (4) на адекватність. Розрахункове значення критерію Фішера $F_{\text{розрах}} = 1.091$. Для заданих параметрів $F_{\text{табл}} = 1.6$ [4]. Оскільки умова $F_{\text{розрах}} < F_{\text{табл}}$ виконується, отже модель адекватна.

За таким же алгоритмом проведено дослідження для ділянки змінного струму (табл. 5).

Таблиця 5

Фрагмент результатів моделювання для ділянки змінного струму

№ експер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
втрати, кВт·год.	997.7	110.5	137.8	172.3	675.9	1341.2	1165.8	147.8	128.4
втрати, %	8.3	2.49	2.6	3.25	7.34	9.29	9.7	2.77	2.89
квадрат струму, тыс. А ² ·год	154.9	14.9	18.4	18.4	113	223	154.9	21.5	14.9

Середні втрати для заданої ділянки за результатами моделювання склали 6,3 %, а середній коефіцієнт втрат – 5,58 Ом.

Отримане рівняння регресії має наступний вигляд

$$k_B = 9.022 + 0.056n^2 - 0.72n + 0.024DS\% + 0.033t_{H.c.}^0. \quad (5)$$

Проведено перевірку моделі (5) на адекватність. Розрахункове 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. Експериментальное дослідження «умовних втрат» електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Ю. М. Сергатий, 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/tblichnye_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.