

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ УСТАВКИ СПРАЦЬОВУВАННЯ АПАРАТІВ ЗАХИСТУ ВІД КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ У СИЛОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

У статті розглянуто питання визначення мінімального значення уставки спрацьовування по швидкості зростання струму апаратури захисту від коротких замикань у силових колах електрорухомого складу.

Ключові слова: коротке замикання, уставка, апарат захисту, швидкість зростання струму, тяговий електродвигун

В статье рассмотрен вопрос определения минимального значения уставки срабатывания по скорости нарастания тока аппаратуры защиты от коротких замыканий в силовых цепях электроподвижного состава.

Ключевые слова: короткое замыкание, уставка, аппарат защиты, скорость нарастания тока, тяговый электродвигатель

The issue of determination of minimum value of triggering setpoint by the rate of increasing the current for the short-circuit proof equipment in power circuits of the electric-traction rolling stock is considered in the article.

Keywords: short circuit, setpoint, proof equipment, rate of increasing the current, electric-traction motor

Вступ

Одним із аварійних режимів на електрорухомому складі (ЕРС), що може привести до пошкодження електрообладнання, є режим короткого замикання (КЗ). Для запобігання цим пошкодженням на ЕРС застосовується захисна апаратура, яка розпізнає аварійний режим та розмикає коло при досягненні струмом короткого замикання певного значення. При використанні апаратів захисту побудованих на сучасній напівпровідниковій елементній базі, функцією яких буде розпізнавання швидкості зміни струму КЗ та подача сигналу на розмикання кола, загальний час спрацьовування захисту та відповідно розміри пошкоджень електрообладнання можна значно зменшити.

Мета роботи

Розробка методу визначення мінімального значення уставки спрацьовування по швидкості зростання струму для апаратів захисту на новій елементній базі від коротких замикань у силових колах ЕРС.

Матеріал і результати дослідження

Для визначення уставки апаратів захисту використаємо результати розрахунків з допомогою математичної моделі з використанням параметрів кіл тягових електродвигунів (ТЕД) електровозів ДЕ1 при напрузі в контактній мережі 3000 В [1, 2].

Після розрахунку отримали досить велику кількість значень швидкості зміни струму di/dt у колі ТЕД (табл. 1). Однозначне налаштування

захисного пристрою за отриманими даними не можливе через велику розбіжність останніх. Тому для визначення раціональної уставки апаратів захисту за di/dt застосуємо теорію математичного аналізу та статистики.

Спершу встановлюємо закон розподілення швидкості наростання струму за допомогою критерію погодженості. Для цього використаємо критерій Пірсона, що найчастіше застосовується на практиці [3].

Розіб'ємо весь отриманий масив швидкості наростання струму на інтервали однакової довжини (X_i, X_{i+1}), використовуючи метод обчислення теоретичних частот нормального розподілу, та визначимо кількість випадків di/dt на кожному з них.

Знайдемо середини цих інтервалів:

$$X_i^* = \frac{X_i + X_{i+1}}{2}. \quad (1)$$

Відносна кількість випадків di/dt на інтервалі розраховується за приведеною формулою (2):

$$n_i = \frac{n}{\sum n}. \quad (2)$$

Отримані результати занесені до табл. 1, яка буде використовуватись для задання початкових умов подальших розрахунків.

За розрахунками табл. 1 будуємо діаграму (рис. 1), з якої наочно видно, що розподіл від-

носних частот $\frac{di}{dt}$ нагадує майже нормальний закон розподілу.

Таблиця 1

Знаходження кількості випадків швидкості зростання струму та розподілу відносних частот

Інтервали X_i , A/c·10 ³	Кількість випадків $\frac{di}{dt}$, n	Розподіл відносних частот, n_i	X_i^*
[0...100)	8	0,216	50
[100...200)	9	0,243	150
[200...300)	5	0,135	250
[300...400)	4	0,108	350
[400...500)	2	0,054	450
[500...600)	1	0,027	550
[600...700)	0	0,000	650
[700...800)	2	0,054	750
[800...900)	2	0,054	850
[900...1000)	2	0,054	950
[1000...1100)	0	0,000	1050
[1100...1200)	0	0,000	1150
[1200...1300)	0	0,000	1250
[1300...1400)	0	0,000	1350
[1400...1500)	1	0,027	1450
[1500...1600)	0	0,000	1550
[1600...1700)	0	0,000	1650
[1700...1800)	1	0,027	1750
	$\Sigma 37$	$\Sigma 1$	

Далі розрахуємо зведені характеристики вибірки – вибіркові варіанти X_i і відносні частоти n_i . Скористаємося методом добутків. Спершу перейдемо від вибірових варіант X_i до умовних n_i , використавши наступний вираз:

$$u_i = \frac{X_i - C}{h}, \quad (3)$$

де $h = X_{i+1} - X_i$ – крок зміни варіант

($h = 150 - 50 = 100$);

C – удаваний нуль, за який можна приймати значення будь-якої з варіант X_i .

У цьому виразі в якості удаваного нуля приймемо $X_i = 150$.

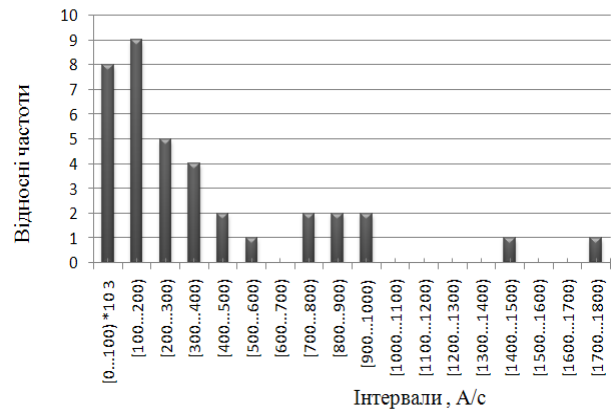


Рис. 1. Розподіл відносних частот за інтервалами швидкості наростання струму

Подальші розрахунки параметрів, необхідних для здобуття характеристик вибірки, проводимо відповідно до розрахункової табл. 2:

Таблиця 2

Розрахунок характеристик вибірки

X_i^*	n_i	u_i	$n_i u_i$	$n_i u_i^2$	$n_i \cdot (u_i + 1)^2$
50	0,216	-1	-0,216	0,216	0,000
150	0,243	0	0,000	0,000	0,243
250	0,135	1	0,135	0,135	0,541
350	0,108	2	0,216	0,432	0,973
450	0,054	3	0,162	0,486	0,865
550	0,027	4	0,108	0,432	0,676
650	0,000	5	0,000	0,000	0,000
750	0,054	6	0,324	1,946	2,649
850	0,054	7	0,378	2,649	3,459
950	0,054	8	0,432	3,459	4,378
1050	0,000	9	0,000	0,000	0,000
1150	0,000	10	0,000	0,000	0,000
1250	0,000	11	0,000	0,000	0,000
1350	0,000	12	0,000	0,000	0,000
1450	0,027	13	0,351	4,568	5,297
1550	0,000	14	0,000	0,000	0,000
1650	0,000	15	0,000	0,000	0,000
1750	0,027	16	0,432	6,919	7,811
	$\Sigma 1$		$\Sigma 2,32$	$\Sigma 21,24$	$\Sigma 26,9$

Перевіримо правильність розрахунку табл. 2:

$$\sum n_i \cdot (u_i + 1)^2 = \sum n_i u_i^2 + 2 \sum n_i u_i + n;$$

$$26,9 = 21,24 + 2 \cdot 2,32 + 1 = 26,9. \quad (4)$$

Збіг знайдених сум свідчить про те, що обчислення проведені вірно.

За отриманими даними визначаємо шукані зведені характеристики вибірки, починаючи з умовних емпіричних моментів першого і другого порядків M_1^* , M_2^* відповідно:

$$M_1^* = \frac{\sum n_i u_i}{n};$$

$$M_1^* = \frac{2,32}{1} = 2,32. \quad (5)$$

$$M_2^* = \frac{\sum n_i u_i^2}{n};$$

$$M_2^* = \frac{21,24}{1} = 21,24. \quad (6)$$

Далі визначаємо шукану вибірккову середню та дисперсію випадкової величини di/dt :

$$\bar{X}_B = M_1^* h + C;$$

$$\bar{X}_B = 2,32 \cdot 100 + 150 = 382. \quad (7)$$

$$D_B = [M_2^* - (M_1^*)^2] \cdot h^2;$$

$$D_B = [21,24 - (2,32)^2] \cdot 100^2 = 158576. \quad (8)$$

За отриманим значенням дисперсії визначаємо середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_B = \sqrt{D_B};$$

$$\sigma_B = \sqrt{158576} = 398,2. \quad (9)$$

Використовуючи знайдені раніше вибірккову середню і середнє квадратичне відхилення, перейдемо до нормованих значень випадкової величини di/dt , внаслідок чого проведемо перехід від часткових інтервалів вигляду (X_i, X_{i+1}) до інтервалів нормованої величини вигляду (Z_i, Z_{i+1}) за допомогою наступних залежностей [3]:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_B}{\sigma_B}; \quad (10)$$

$$Z_{i+1} = \frac{X_{i+1} - \bar{X}_B}{\sigma_B}. \quad (11)$$

Здійснене вище перетворення дає можливість обчислити теоретичну ймовірність n_i'

потрапляння шуканого параметра di/dt при різних варіантах КЗ в інтервали (X_i, X_{i+1}) за наступним виразом:

$$n_i' = \Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i), \quad (12)$$

де $\Phi(Z_i)$, $\Phi(Z_{i+1})$ – функції Лапласа, що знаходяться за допомогою таблиць.

В результаті визначимо шукані теоретичні частоти.

Отримані значення частот, необхідні для обчислення умовно прийнятої випадкової величини $\chi_{\text{сп}}^2$ («хі»-квадрат), дозволяють перейти безпосередньо до перевірки закону нормального розподілу шуканого параметру di/dt . Для цього визначимо спостережуване значення критерію $\chi_{\text{сп}}^2$ при всіх інтервалах.

$$\chi_{\text{сп}}^2 = \frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'};$$

$$\chi_{\text{сп}}^2 = 1,753. \quad (13)$$

Далі, для перевірки гіпотези про нормальний розподіл, необхідно визначити критичне значення критерію $\chi_{\text{кр}}^2$, для чого попередньо визначимо кількість ступенів свободи k .

$$k = s - 1 - r, \quad (14)$$

де r – число параметрів, що оцінюються.

Нормальне розподілення оцінюється двома параметрами: математичним очікуванням та середньоквадратичним відхиленням (в якості математичного очікування приймемо вибірккову середню \bar{X}_B , в якості середньоквадратичного відхилення – вибірккове σ_B).

Враховуючи, що число можливих варіант, тобто інтервалів значень di/dt , дорівнює $s = 18$, отримаємо:

$$k = 18 - 1 - 2 = 15.$$

Використовуючи таблицю критичних точок розподілу $\chi_{\text{кр}}^2$, по заданому рівню значущості $\alpha = 0,05$ та числу ступенів свободи k маємо [3]:

$$\chi_{\text{кр}}^2 = f(\alpha; k);$$

$$\chi_{\text{кр}}^2 = f(0,05; 15) = 25. \quad (15)$$

Оскільки $\chi_{сп}^2 < \chi_{кр}^2$, то відповідно до цього можна зробити висновок, що дана випадкова величина розподілена за нормальним законом.

Далі визначимо межу спрацьовування захисної апаратури за допомогою довірчого інтервалу, в який параметр попадає з заданою імовірністю γ [3].

Для розрахунку прийемо імовірність $\gamma = 0,95$.

$$\bar{X}_B - t \frac{\sigma_B}{\sqrt{S}} < a < \bar{X}_B + t \frac{\sigma_B}{\sqrt{S}}, \quad (16)$$

де t – значення аргументу функції Лапласа, при якому $\Phi(t) = \frac{\gamma}{2}$;

a – математичне очікування.

Визначимо довірчий інтервал для швидкості наростання струму силового кола ТЕД ЕД-141У за (16) при напрузі контактної мережі 3000 В:

$$382 - 1,96 \frac{398,2}{\sqrt{18}} < a < 382 + 1,96 \frac{398,2}{\sqrt{18}};$$

$$198 \cdot 10^3 < a < 566 \cdot 10^3.$$

Для значень di/dt при напрузі контактної мережі 2200 В та 3850 В розрахунки проводяться аналогічно.

Покажемо графічно визначення довірчого інтервалу для трьох випадків напруги контактної мережі (рис. 2) за формулою:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_B \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{X}_B)^2}{2\sigma_B^2}}. \quad (19)$$

На рис. 2:

1 – крива нормального розподілу і довірчий інтервал значень di/dt при напрузі контактної мережі 2200 В;

2 – крива нормального розподілу і довірчий інтервал значень di/dt при напрузі контактної мережі 3000 В;

3 – крива нормального розподілу і довірчий інтервал значень di/dt при напрузі контактної мережі 3850 В.

З рис. 2 видно, що довірчі інтервали трьох випадків напруги контактної мережі (3; 2,2; 3,85 кВ) накладаються один на одного. Тому

найбільш імовірним проміжком виникнення di/dt є інтервал від $282,6 \cdot 10^3$ до $438 \cdot 10^3$ А/с.

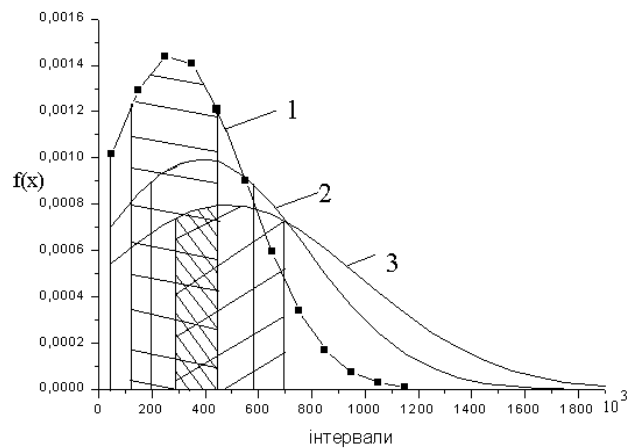


Рис. 2. Визначення довірчого інтервалу швидкості зростання аварійного струму силового кола ТЕД ЕД-141У

Для налагодження уставки спрацьовування апаратури захисту від коротких замикань силового кола електровозу ДЕ1 потрібно брати мінімальну межу $127 \cdot 10^3$ А/с, яка відповідає мінімальній напрузі контактної мережі. Це на порядок більше ніж швидкість зростання струму при пуску тягових електродвигунів.

Висновки

1. Проведене дослідження з пошуку найбільш імовірних інтервалів швидкості зміни струму при коротких замиканнях в силових колах ЕРС постійного струму дозволяє використовувати отримані результати для налаштування сучасної апаратури захисту тягових електродвигунів на базі мікропроцесорної техніки.

2. Отриманий за допомогою теорії математичного аналізу та статистики метод розрахунку інтервалів зміни di/dt для напруги 3000 В є універсальним для пошуку останніх при інших напругах контактної мережі.

3. З досліджень знайдено найбільш імовірний для електровоза ДЕ1 проміжок виникнення di/dt : від $282,6 \cdot 10^3$ до $438 \cdot 10^3$ А/с.

4. Уставку датчика контролю значень di/dt доцільно встановити по мініальному значенню $di/dt = 127 \cdot 10^3$ А/с, що відповідає мінімальній напрузі контактної мережі 2200 В.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Дубинець, Л. В. Швидкість зміни струму при короткому замиканні в силових колах електро рухомого складу з урахуванням вихрових стру мів [Текст] / Л. В. Дубинець, О. О. Карзова, Ю. С. Бондаренко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 69-72.
2. Электровоз магистральный ДЭ1. Техническое описание. ЗТП.000.020-03 ТО. [Текст] – 1999. – 188 с.
3. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2005. – 479 с.
4. Карзова, О. О. Визначення швидкості зміни струму у колах тягових двигунів електрорухомого складу при різних режимах роботи [Текст] / О. О. Карзова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 57-60.

Надійшла до редколегії 30.03.2011.

Прийнята до друку 04.04.2011.