

## МЕТОДИКА ВИБОРУ УСТАВКИ ШВИДКОДІЮЧИХ ВИМИКАЧІВ ФІДЕРІВ 3,3 кВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З МІКРОПРОЦЕСОРНИМИ СИСТЕМАМИ ЗАХИСТУ

У статті представлено нову методику вибору уставки швидкодіючих вимикачів 3,3 кВ тягових підстанцій постійного струму, призначену для використання в мікропроцесорній системі захисту фідерів. Дана методика є досконалішою існуючою за приростом струму та використовує результати математичного моделювання системи тягового електропостачання.

В статье описана новая методика выбора уставки быстродействующих выключателей 3,3 кВ тяговых подстанций постоянного тока, предназначенная для использования в микропроцессорной системе защиты фидеров. Данная методика совершеннее существующей по приращению тока и использует результаты математического моделирования системы тягового электроснабжения.

In the article a new procedure of choice of minimum current jump for action of fast-acting switches of 3.3 kV DC traction substations intended for the use in the microprocessor protection system of feeders is described. This procedure is more perfect than existing one on the current increment and uses the results of mathematical simulation of the traction electric supply system.

Систему захисту тягових мереж постійного струму виконують за допомогою швидкодіючих вимикачів (ШВ), які обладнанні індуктивним шунтом чи реле-диференційним шунтом. Однак їх захисні властивості перестали задовольняти сучасним вимогам експлуатації залізниць, особливо зважаючи на: велику кількість помилкових спрацьовувань; недостатню швидкодію; низьку чутливість; пошкодження як самих ШВ, так і іншого обладнання тягових підстанцій. Тому розробка нових засобів захисту та підвищення їх чутливості і селективності є основною вимогою сучасних умов експлуатації електрифікованих залізниць. З цієї точки зору значних результатів можна досягти, доповнюючи ШВ тягових підстанцій пристроями мікропроцесорного захисту (МСЗ). Застосування ШВ у поєднанні з МСЗ дозволяє усунути недоліки, притаманні існуючим системам захисту фідерів.

Нормальна робота існуючої на сьогодні релейно-струмової системи захисту фідерів 3,3 кВ контактної мережі [1] залежить від уставки ШВ, на основі яких побудовані ці системи. На практиці уставки ШВ часто бувають надто занижені, що призводить до значної кількості помилкових та неселективних вимикань ШВ тягових підстанцій. Причинами помилкових спрацьовувань також є стрибкоподібна зміна струму навантаження в тяговій мережі під час перегрупування тягових двигунів електровозів

у їх нормальних режимах роботи, а також у режимах «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі [2]. Неселективні вимикання ШВ відбуваються за рахунок нескоординованої роботи систем захисту тягових підстанцій та електрорухомого складу (ЕРС).

Таким чином, без суттєвих капіталовкладень підвищення ефективності роботи систем захисту може бути здійснено вдосконаленням методів вибору уставок автоматичних ШВ, в яких використовують результати математичного моделювання аварійних та експлуатаційних перехідних режимів із наступним дооснащенням існуючого обладнання тягових підстанцій МСЗ.

Найбільш об'єктивну оцінку властивостей ШВ дають, як це показано в [3], *характеристики спрацьовування (ХС) ШВ*. Ці характеристики – граничні лінії, що поділяють область спрацьовування і неспрацьовування ШВ при певному законі зміни струму.

Під *оптимальною захисною характеристикою (ОЗХ)* будемо розуміти комплекс характеристик спрацьовування, які забезпечують максимальну захищеність фідерної зони при допустимій імовірності хибних спрацьовувань ШВ [4].

Реальна зміна струму фідера 3,3 кВ при навантаженні і короткому замиканні (КЗ) відбувається за законом, що наближено описується виразом:

$$i(t) = I_0 + \Delta I \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}} \right), \quad (1)$$

де  $\Delta I = I_K - I_0$  – приріст струму, який визначається як різниця кінцевого  $I_K$  і початкового  $I_0$  значень перехідного струму фідера (рис. 1);  $\tau_c$  – стала часу зміни струму;  $I_0$  – попереднє значення струму (до початку перехідного процесу).

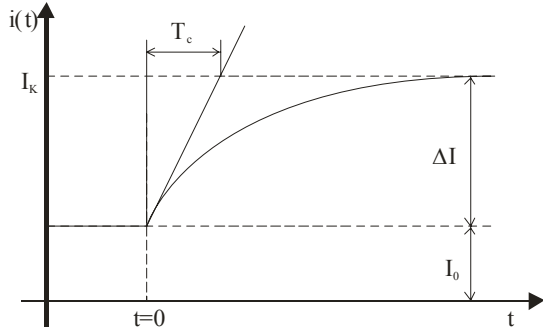


Рис. 1. Перехідний струм фідера при підвищенні навантаження чи КЗ

Вираз (1) може бути представлено і через швидкість зростання струму. Використовуючи залежності

$$\left( \frac{di(t)}{dt} \right)_{\max} = \left( \frac{di(t)}{dt} \right)_{t=0} = v_I = \frac{\Delta I}{\tau_c} \quad [3, 4],$$

отримаємо:

$$i(t) = I_0 + \Delta I \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_I}} \right) \quad (2)$$

Таким чином, згідно (1) і (2), струм фідера є функцією трьох параметрів  $I_0$ ,  $\Delta I$ ,  $\tau_c(v_I)$ . Параметри  $I_0$ ,  $\Delta I$  характеризують усталену величину струму до та після зміни поточного значення перехідного струму  $i(t)$ , а третій –  $\tau_c(v_I)$  – характеризує зміну перехідного струму.

У відповідності з [3], ХС є залежність стрибка струму  $\Delta I$ , що викликає спрацювання ШВ, від величини попереднього струму навантаження  $I_0$  при  $\tau_c = \text{const}$ , тобто це є залежність  $\Delta I = f(I_0)$ . Двома граничними значеннями цієї ХС є статична і динамічна уставка ШВ.

Статичну уставку  $I_y$  визначають спрацюванням ШВ при повільній зміні струму за виразом (1).

Динамічна уставка  $\Delta I_y$  визначає мінімальний стрибок струму, який викликає спрацювання ШВ при  $\tau_c = \text{const}$  і  $I_0 = 0$ , тобто вона визначає спрацювання від зміни струму.

Як показано в роботі [3], ХС є прямою лінією, що з'єднує відрізки  $\Delta I_y$  і  $I_y$ , відкладені відповідно по осі ординат і абсцис (рис. 2).

Таким чином, довільна проміжна точка ХС при відомих  $\Delta I_y$  і  $I_y$ , а також відомому  $I_0$  визначається виразом [4]:

$$\Delta I = \Delta I_y \frac{I_y - I_0}{I_y}. \quad (3)$$

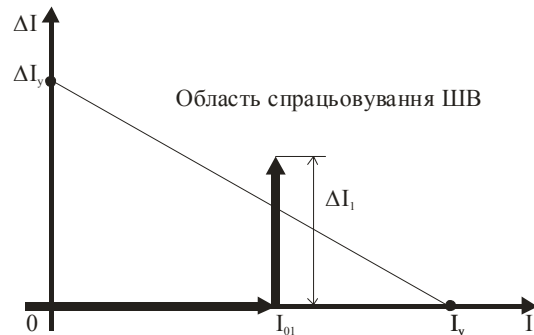


Рис. 2. Характеристика спрацювання ШВ

Область спрацювання вимикача лежить вище ХС. Визначаючи  $\Delta I_y$  для всіх можливих значень  $\tau_c$ , яке змінюється у межах  $0 \leq \tau_c \leq \infty$  при одному й тому ж значенні  $I_y$ , можемо побудувати сімейство ХС ШВ. За допомогою сімейства ХС легко встановити поведінку ШВ при стрибкові струму величиною  $\Delta I_1$ , якщо відома стала часу  $\tau_{c1}$  і значення попереднього струму навантаження  $I_{01}$ . Відклаємо спочатку по осі абсцис величину  $I_{01}$  і проводимо з цієї точки перпендикуляр величиною  $\Delta I_1$ . Якщо кінець відрізка  $\Delta I_1$  знаходиться в області над характеристикою, то ШВ від розглядуваного стрибка спрацює, якщо ж нижче характеристики – не спрацює.

Слід зауважити, що навіть для одного й того ж фідера параметри  $I_0$ ,  $\Delta I$ ,  $\tau_c(v_I)$  є величинами змінними, які залежать від конкретної ситуації в момент зміни струму навантаження чи КЗ. Параметр  $I_0$  залежить від кількості електровозів, що знаходяться на фідерній зоні та режимів їх ведення до моменту перехідного процесу,  $\Delta I$  – від виду перехідного режиму: пуск електровоза; перехід електровоза на іншу позицію; відрив-торкання струмоприймача; КЗ на

електровозі; КЗ поза електровозом; прохід струмоприймача ізольованої вставки. Параметри  $\tau_c(v_I)$  залежать від параметрів тягової мережі та електрорухомого складу (ЕРС) в момент короткого замикання.

Аналіз зміни струму фідерів тягової мережі 3,3 кВ дозволяє встановити, що [4, 5]: величина стрибків струму навантаження мало змінюється в залежності від попереднього струму навантаження  $I_0$ ; величина стрибків струму КЗ знаходиться в зворотній залежності від величини попереднього струму навантаження  $I_0$ , тобто зменшується зі збільшенням  $I_0$ ; стала часу  $\tau_c$  і швидкість зміни  $v_I$  струму навантаження і КЗ залежать від величини попереднього струму навантаження і діапазони їх зміни спільномірні, достатньо вузькі і знаходяться у межах:  $\tau_c \approx 0,01 \dots 0,05$  с;  $v_I \approx 30 \dots 120$  кА/с. Тобто відрізнити зміну струму навантаження фідерів 3,3 кВ від зміни струму КЗ за швидкістю зростання струму неможливо.

У роботах [3, 4] було зазначено, що у тих випадках, коли максимальні стрибки пускового струму менше мінімальних стрибків струму КЗ, ця залежність дуже корисна, оскільки при відповідних характеристиках ШВ дає можливість селективно вимикатися при струмах КЗ, величина яких менше  $I_y$ .

На фідерах 3,3 кВ постійного струму імовірна ситуація показана на рис. 3, де показана усереднена ХС ШВ і стрибкоподібна зміна навантаження від нуля до  $I_{H,max}$ . Статичну уставку ШВ при цьому обирають у відповідності з діючими нормами, тобто [1]:

$$I_y \leq I_{Kmin} - 300.$$

Таким чином, значення мінімального струму КЗ лежать справа від  $I_y$ .



Рис. 3. Характеристики спрацювання при тяговому навантаженні

Для кожного стрибка усталений струм спрощено зображено рівним сумі приросту струму від усіх попередніх стрибків. Останній третій стрибок викликає хибне спрацювання ШВ. Якщо аналогічна ситуація на фідері повторюється часто, то експлуатація ШВ при такому його налаштуванні стає неможливою, тобто така ХС ШВ є далекою до ОЗХ. Крім того, з метою досягнення ОЗХ, зміна навантаження вимагає зміни ХС.

Розглядаючи попередню ХС, можна визначити вимоги до ОЗХ: ОЗХ повинна мінімально, але з достатньою надійністю охоплювати область площини  $\Delta I(I)$ , в якій розміщено стрибки струму навантаження та її максимальні значення; ОЗХ повинна робити фідер, на якому реалізується, максимально захищеним за всіма параметрами, на які реагує ШВ із шунтом за умови надійного налаштування від хибних спрацювань; ОЗХ визначається не типом ШВ, а властивостями тягової мережі, тобто реалізація ОЗХ має бути здійсненою для кожного окремого фідера з урахуванням умов його роботи, пропускну здатності та експлуатованого ЕРС.

Враховуючи вищезазначене, в роботі [4] було запропоновано ОЗХ вигляду, зображеного на рис. 4.



Рис. 4. Оптимальна характеристика спрацювання при тяговому навантаженні

Щоб забезпечити імпульсний захист фідера, уставка вимикача повинна бути менше еквівалентного вимикаючого струму при всіх можливих сполученнях навантаження на фідері і приросту струму КЗ та більше еквівалентних струмів фідерів при самих різких приростах навантаження з урахуванням початкової умови. Таким чином, необхідно виконати умову [6]:

$$I_{Hmax} + \Delta I_1 \leq I_y \leq I_{Kmin} - \Delta I_2, \quad (4)$$

де  $I_{H \max}$  – максимальний еквівалентний струм навантаження, який не викликає вимикання ШВ;

$I_{K \min}$  – мінімальний еквівалентний струм вимикання ШВ від КЗ;

$\Delta_1, \Delta_2$  – запас по струму, який забезпечує необхідну надійність і чутливість захисту ( $\Delta_1 = 100$  А,  $\Delta_2 = 300 \dots 350$  А [7]).

По відношенню до самого ШВ імпульсна уставка  $\Delta I_y$  повинна мати значний запас по відношенню до максимального імпульсу струму навантаження  $\Delta I_{H \max}$  і мінімального імпульсу струму КЗ із врахуванням струму генерації локомотивів  $\Delta I_{K \min}$ , тобто вона повинна задовольняти нерівність [8]:

$$\Delta I_{H \max} \ll \Delta I_y \ll \Delta I_{K \min}.$$

Тоді для імпульсної уставки вираз (4) можна переписати у вигляді:

$$\Delta I_{H \max} + \Delta I_1 \leq \Delta I_y \leq \Delta I_{K \min} - \Delta I_2. \quad (5)$$

Величини  $\Delta I_{H \max}, \Delta I_{K \min}$  визначають шляхом математичного моделювання різних режимів роботи системи електричної тяги постійного струму. Величину запасу уставки  $\Delta I_1, \Delta I_2$  необхідно визначати з точки зору ймовірності можливих хибних спрацьовувань захисту при заданій уставці.

Питання вибору  $\Delta I_y$  є досить складним. З одного боку, бажаним є максимальне наближення  $\Delta I_y$  до  $\Delta I_{H \max}$ , але у цьому випадку збільшується ймовірність хибних відключень. З іншого боку, збільшення  $\Delta I_y$  не може бути безмежним, оскільки при  $\Delta I_y \approx \Delta I_{K \min}$  порушується селективна робота системи захисту фідерів.

За результатами математичного моделювання, виконаних у роботах [9, 10], встановлено наступні показники захисних ХС (табл. 1). На рис. 5 представлено ХС для  $\Delta I_y = 700 \dots 1000$  А та  $I_y = 3000$  А.

Таблиця 1

Показники захисних характеристик імпульсного захисту

Напруга на затискачах тягової підстанції $U_0, \text{В}$	Стала часу електро-тягової мережі $\tau_c, \text{с}$	Струм статичної уставки $\Delta I, \text{А}$	Максимальний стрибок струму навантаження $\Delta I_{H \max}, \text{А}$	Мінімальний стрибок струму КЗ $\Delta I_{K \min}, \text{А}$
3300	0,005...0,03	3000...4000	600..850	1200...1700

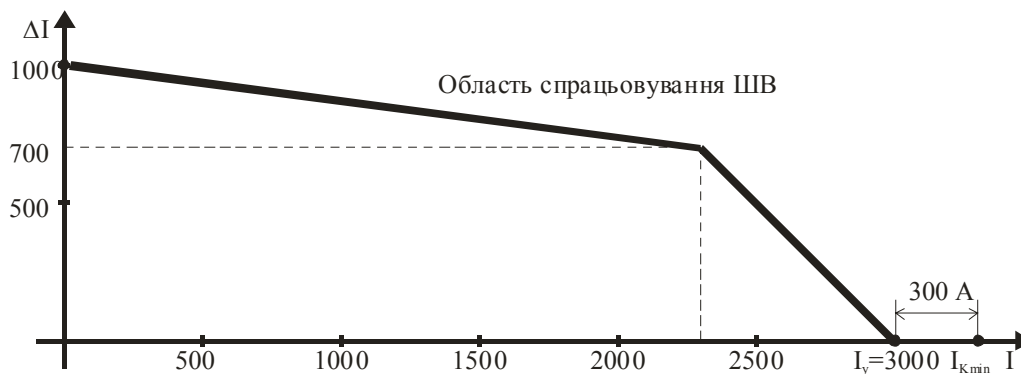


Рис. 5. Реалізована оптимальна характеристика спрацювання

Алгоритм визначення уставки з врахуванням режимів роботи ЕРС можна представити таким чином.

1. За даними графіка руху потягів вибирають розрахункові схеми для зосередженого і розподіленого навантаження.

2. Знаючи діапазон коливання напруги на фідері, тип і характеристику ЕРС, параметри

фідерів і тягових підстанцій, виконують математичне моделювання СЕТ в перехідних аварійних і експлуатаційних режимах.

3. На основі результатів зазначеного моделювання СЕТ в робочих перехідних режимах вибирають найбільший приріст перехідного струму навантаження фідера  $\Delta I_{H \max}$ .

4. За результатами моделювання в аварійних перехідних режимах вибирають найменший приріст перехідного струму КЗ фідера  $\Delta I_{K \min}$ .

5. За існуючою методикою визначають перехідний струм фідера при КЗ у найвіддаленішій точці фідерної зони за умовою (4) визначають струм уставки ШВ  $I_y$ .

6. Знаючи  $\Delta I_{H \max}$ ,  $\Delta I_{K \min}$ ,  $I_y$ , будують ЗХ розглядуваного фідера.

7. Захисну характеристику (ЗХ) фідера представляють у вигляді апроксимованої характеристики, виконують оцифровку (представлення у бінарному коді) отриманої ЗХ. ЗХ, представлена у двійковому коді, заносять у пам'ять мікропроцесорної системи захисту у вигляді масиву даних.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрических железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Костін, Н. А. Імовірнісний аналіз перехідних процесів в силових електричних колах електровоза ДЕ1 [Текст] / Н. А. Костін, Т. Н. Міщенко, О. І. Гілевич // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 3. – С. 54-61.
3. Пупынин, В. Н. Полная теория работы и характеристики параллельных индуктивных шунтов быстродействующих выключателей типов ВАБ-2, АБ-2/3, АБ-2/4 и реле дифференциальных шунтов выключателей ВАБ-28 [Текст] / В. Н. Пупынин // Труды МИИТа. – 1965. – Вып. 213. – С. 61-85.
4. Пупынин, В. Н. Реализация оптимальных защитных характеристик быстродействующего выключателя постоянного тока [Текст] / В. Н. Пупынин // Труды МИИТа. – 1971. – Вып. 380. – С. 26-44.
5. Векслер, М. И. Экспериментальное исследование влияние тяговой нагрузки на формирование тока короткого замыкания и работу импульсной защиты питающих фидеров [Текст] / М. И. Векслер // Сб. тр. ВЗИИТа. – М., 1968. – Вып. 30. – С. 49-62.
6. Векслер, М. И. Методика расчета импульсных уставок и параметров индуктивных шунтов быстродействующих выключателей постоянного тока [Текст] / М. И. Векслер // Сб. тр. ВЗИИТа. – М., 1968. – Вып. 30. – С. 63-71.
7. Пупынин, В. Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах [Текст] : дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 1986. – 340 с.
8. Кучма, К. Г. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети [Текст] / К. Г. Кучма, Г. Г. Марквардт, В. Н. Пупынин. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – 259 с.
9. Костин, Н. А. Математическое моделирование переходных аварийных электромагнитных процессов в системе электрической тяги постоянного тока: 1. Короткое замыкание без тяговой нагрузки [Текст] / Н. А. Костин, П. Е. Михалченко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 66-71.
10. Михалченко, П. Є. Математичне моделювання перехідних аварійних електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму [Текст] / П. Є. Михалченко, М. О. Костін // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – Ч. 2. – К., 2008. – С. 31-35.

Надійшла до редколегії 02.10.2009.

Прийнята до друку 21.10.2009.