

ШВИДКІСТЬ ЗМІНИ СТРУМУ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ В СИЛОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ З УРАХУВАННЯМ ВИХРОВИХ СТРУМІВ

У статті розглянуто питання впливу вихрових струмів на швидкість зміни струму короткого замикання, представлена математична модель для розрахунку струмів короткого замикання в режимі тяги в силових колах електрорухомого складу постійного струму та наведено результати досліджень.

В статье рассмотрен вопрос влияния вихревых токов на скорость изменения тока короткого замыкания, представлена математическая модель для расчета токов короткого замыкания в режиме тяги в силовых цепях электроподвижного состава постоянного тока и приведены результаты исследований.

In the article the issue of influence of vortical currents on rate of change of short circuit current is considered, a mathematical model for the calculation of short circuit currents in the traction mode in the power circuits of DC electric rolling stock is presented, and the research results are given.

ВСТУП

З точки зору значень струму найбільш небезпечним аварійним режимом на електрорухомому складі (ЕРС) є коротке замикання (КЗ). Якщо коло своєчасно не розімкнута, то обладнання буде пошкоджене. Для правильної настройки апаратів захисту необхідно знати характер зміни струму.

МЕТА РОБОТИ

Дослідження кривих короткого замикання, тобто залежності $i = f(t)$, без врахування дії вихрових струмів та з їх урахуванням з метою визначення di/dt для відповідної настройки апаратів захисту на сучасній мікроконтролерній елементній базі. Під відповідною настройкою розуміємо здатність захисного апарату розрізнити по швидкості зміни струму режим короткого замикання від режиму експлуатаційного перевантаження. За рахунок застосування

мікроконтролерів скорочується час від моменту початку КЗ до передачі сигналу розімкнення на швидкодіючий вимикач.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення поставленої мети з допомогою математичної моделі [1] проведемо два дослідження: перше – без врахування дії вихрових струмів; друге – з врахуванням цих струмів.

При цьому будемо вважати, що швидкість обертання якоря тягового двигуна постійна, за рахунок того, що КЗ в часі займає зазвичай доли секунд, а тягові електродвигуни (ТЕД) з'єднані з великими інерційними масами і тому швидкість руху електровозу змінитися суттєво не може [2].

Для першого варіанту дослідження математична модель в загальному випадку має наступний вигляд:

$$\begin{cases} n \cdot (L_{\text{я}} + L_{\text{зб}}) \frac{di}{dt} = U_{\text{м}} - n \cdot k \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{зб}}) \cdot I; \\ c_e \Phi = f(I_{\text{зб}}), \end{cases} \quad (1)$$

де $U_{\text{м}}$ – напруга контактної мережі;

$L_{\text{я}} = L_{\text{оя}} + L_{\text{ко}} + L_{\text{дп}}$ – сумарна індуктивність якорного кола двигуна (обмотки якоря, компенсаційної та додаткових полюсів обмоток);

$L_{\text{зб}}$ – індуктивність обмотки збудження;

$R_{\text{я}} = R_{\text{оя}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{дп}}$ – сумарний активний опір кола якоря двигуна, приведений до 115 °С;

$R_{\text{зб}}$ – активний опір обмотки збудження;

I – струм у колі якоря;

$\omega_{\text{дв}}$ – кутова швидкість обертання вала двигуна;

k – коефіцієнт пропорційності;

Φ – основний магнітний потік;

c_e – постійна двигуна;

n – кількість відповідних елементів у колі від точки живлення до точки КЗ.

Для прикладу розглянемо конкретний варіант короткого замикання на одній секції 8-осного електровозу постійного струму при послідовному з'єднанні тягових електродвигу-

нів, коли в колі КЗ два кола якоря та дві обмотки збудження – точка 4 (рис. 1).

У цьому випадку математична модель без урахування дії вихрових струмів має вигляд (2).

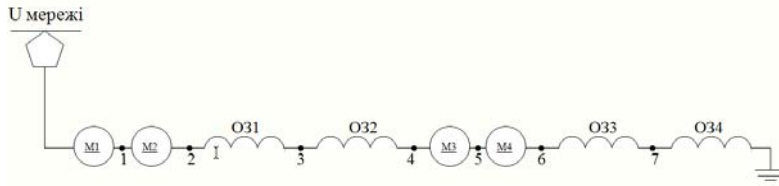


Рис. 1. Варіанти виникнення короткого замикання при послідовному з'єднанні ТЕД однієї секції електровоза

$$\begin{cases} 2 \cdot (L_{\text{я}} + L_{\text{зб}}) \frac{di}{dt} = U_{\text{м}} - 2 \cdot k \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - 2 \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{зб}}) \cdot I; \\ c_e \Phi = f(I_{\text{зб}}). \end{cases} \quad (2)$$

Для цього дослідження прийнемо параметри тягового електродвигуна типу ЕД141-У1 [3]:

$$R_{\text{я}} = R_{\text{оя}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{дп}} = 0,0674 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{зб}} = 0,0253 \text{ Ом},$$

$$L_{\text{я}} = L_{\text{оя}} + L_{\text{ко}} + L_{\text{дп}} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

$$L_{\text{зб}} = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

$$\Phi = 0,1045 \text{ Вб},$$

$$I = I_{\text{зб}} = 565 \text{ А},$$

$$c_e = 984;$$

$$\omega_{\text{дв}} = 19,22 \text{ рад/с},$$

коефіцієнт пропорційності $k = \frac{c_e}{2 \cdot \pi}$.

Прийнемо початкові умови:

1) напруга контактної мережі $U_{\text{м}} = 3000 \text{ В}$;

2) вважаємо, що КЗ виникло в той час, коли швидкість електровозу була номінальна для з'єднання «С» ($\vartheta = 3,14 \text{ м/с}$), струм якоря при цьому дорівнював номінальному значенню ($I = 565 \text{ А}$).

3) магнітний потік змінюється від значення при $I_{\text{ном}}$ до значення при $(2 - 2,5) \cdot I_{\text{ном}}$.

Дослідимо швидкість наростання струму короткого замикання з урахуванням впливу вихрових струмів. Відомо, що під дією цих струмів, які виникають у магнітопроводі тягових двигунів ЕРС під час перехідних процесів, зро-

стання магнітного потоку сповільнюється відносно зростання струму.

Для дослідження процесів, що виникають при цих умовах, до записаної раніше математичної моделі (2) додаємо рівняння, які відображають вплив вихрових струмів у магнітопроводі ТЕД на магнітний потік головних полюсів [4]. Отримаємо математичну модель (3), в якій:

w_1 – число витків котушки головних полюсів (ГП);

Φ , Φ_1 – магнітний потік головних полюсів і його основна гармоніка відповідно;

$(\Phi - \Phi_1)$ – сумарний магнітний потік вищих гармонік головних полюсів;

g_{μ} – магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП;

R_{m1} , R_{mk} – магнітні опори першої та k -ї ділянки магнітної характеристики ГП;

$1,23R_{m1}$ – магнітний опір основній хвилі потоку;

$5,29R_{m1}$ – магнітний опір вищим гармонікам потоку;

F_{ko} – частина МРС k -ї ділянки магнітної характеристики ГП, що створює Φ .

Початкові умови прийняті ті ж самі, що використані для попереднього випадку, коли вихрові струми не враховуються.

$$\begin{cases} 2 \cdot (L_{\text{я}} + L_{\text{зб}}) \frac{di}{dt} = U_{\text{м}} - 2 \cdot k \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - 2 \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{зб}}) \cdot I; \\ 1,23R_{m1} \Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) = w_1 i + F_{ko}; \\ 5,29R_{m1} (\Phi - \Phi_1) + 0,477g_{\mu} \frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) = w_1 i + F_{ko}. \end{cases} \quad (3)$$

Отримані за допомогою моделей (2) та (3) залежності $i = f(t)$ наведено на рис. 2.

На рис. 2:

I_1 – струм короткого замикання без врахування дії вихрових струмів,

I_2 – струм короткого замикання з урахуванням дії вихрових струмів.

З рис. 2 видно, що значення усталеного струму в обох випадках однакові ($I_{уст.} = 16130$ А), що й повинно бути з точки зору фізичних процесів. Це ще раз підтверджує адекватність запропонованих математичних моделей.

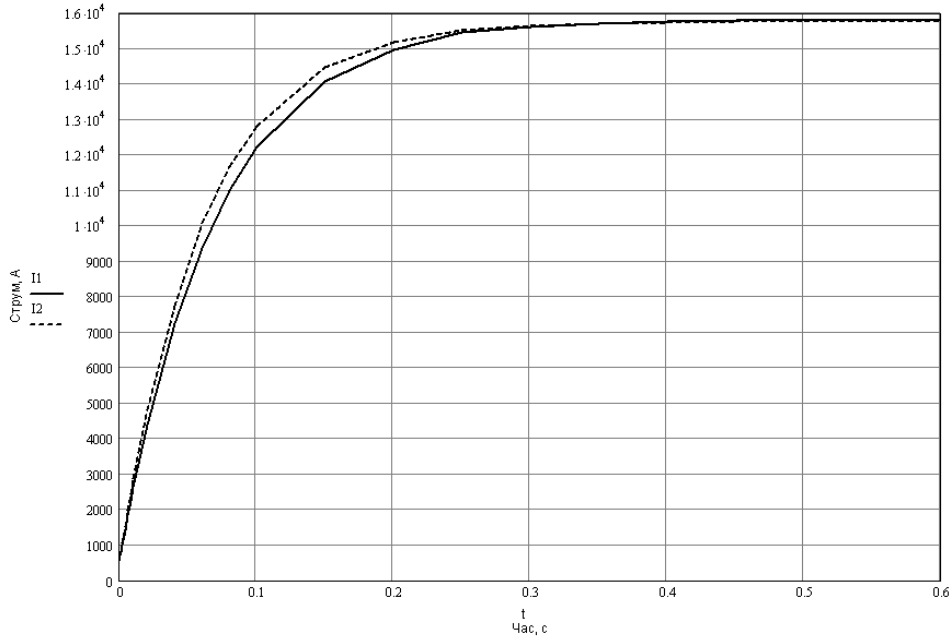


Рис. 2. Порівняння кривих $i = f(t)$

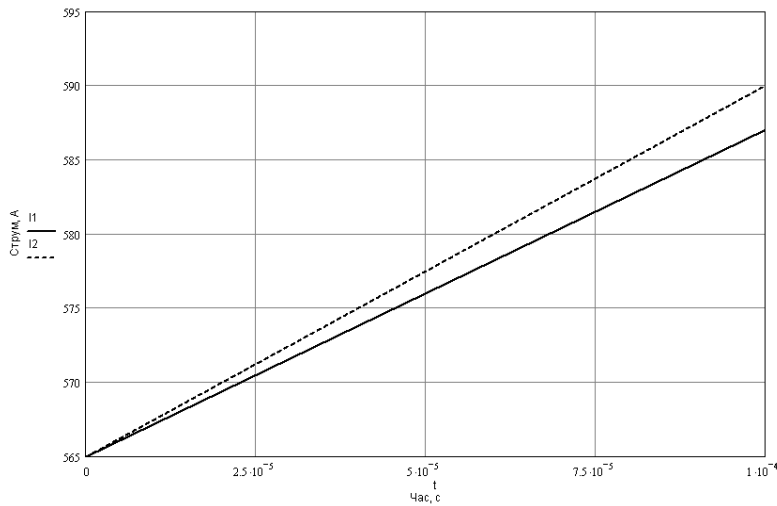


Рис. 3. Знаходження швидкості зміни струму

Для знаходження швидкості зміни струму використаємо рис. 3, на якому показано збільшені за масштабом криві залежності струму короткого замикання від часу з рис. 2 протягом 0,0001 с. Вказаний час визначено властивостями сучасних мікроконтролерів.

Шукаємо $\frac{di}{dt}$ на інтервалі часу від 0 до 0,0001 с, який прийнятий як час реагування апаратури захисту. Відкладемо від нуля по

шкалі часу час 0,0001 с, піднімаємо перпендикуляр до кривої струму та отримаємо значення струму для кожної кривої $i = f(t)$.

Поділивши отримані значення струму на 0,0001 с, отримаємо:

$$\frac{di}{dt} = \frac{590 - 565}{0,0001} = 250000 \text{ А/с} - \text{із врахуван-}$$

ням вихрових струмів;

$$\frac{di}{dt} = \frac{587 - 565}{0,0001} = 220000 \text{ А/с} - \text{без врахуван-}$$

ня вихрових струмів.

Різниця $\frac{di}{dt}$ складає:

$$\frac{250000 - 220000}{250000} \cdot 100\% = 12\%, \text{ що суттєво.}$$

Аналогічні дослідження можна провести для будь-якої точки КЗ у колі тягових двигунів при будь-якому їх з'єднанні.

Отримані результати дають можливість раціонально виконати настройку захисної апаратури з урахуванням $\frac{di}{dt}$.

ВИСНОВКИ

При настройці датчиків апаратів захисту силових кіл електрорухомого складу постійного струму від струмів КЗ швидкість зміни струму потрібно визначати з урахуванням дії вихрових

струмів в інтервалі часу від початку короткого замикання до 0,0001 с.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Иоффе, А. Б. Тяговые электрические машины (теория, конструкция, проектирование) [Текст] / А. Б. Иоффе. – М.: Энергия, 1965. – 232 с.
3. Электровоз магистральный ДЭ1. Техническое описание. ЗТП.000.020-03 ТО [Текст]. – 1999. – 188 с.
4. Жиц, М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока [Текст] / М. З. Жиц. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.

Надійшла до редколегії 22.04.2010.

Прийнята до друку 12.05.2010.