

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗМІНИ СТРУМУ У КОЛАХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

У статті розглянуті питання збільшення швидкодії апаратів захисту силових кіл електрорухомого складу, представлена математична модель двигуна послідовного збудження та наведені результати моделювання перехідних процесів у режимі пуску при різних значеннях напруги в контактній мережі.

В статье рассмотрены вопросы увеличения скорости срабатывания аппаратов защиты силовых цепей электроподвижного состава, представлена математическая модель двигателя последовательного возбуждения и приведены результаты моделирования переходных процессов в режиме пуска при разных значениях напряжения в контактной сети.

In the article the issues of increase in operation rate of devices of power circuits' protection for the electric rolling stock are considered, the mathematical model of an engine of consecutive excitation is presented and the results of modeling of transition processes in a start-up mode at different voltage values in the contact mains are given.

ВСТУП

З точки зору надійності роботи захисних апаратів силових кіл електрорухомого складу важливе значення має швидкодія цих апаратів. Електромагнітні (електромеханічні) пристрої, які поки що значною мірою застосовуються у схемах електровозів та електропоїздів, забезпечують час відключення кола порядку декілька сотих секунди. Із застосуванням сучасних мікропроцесорних пристроїв цей час можна значно скоротити і тим самим запобігти значною мірою розмірам пошкоджень, наприклад, при коротких замиканнях (КЗ) у колах.

Для вирішення вказаної задачі потрібно знати швидкість зміни струму у колі за певний проміжок часу при різних режимах (пуск, коротке замикання, перевантаження) з тим, щоб захисна апаратура відрізняла ці режими і апарати захисту від КЗ спрацьовували до того, як струм короткого замикання досягне максимального значення.

МЕТА РОБОТИ

Перевірка адекватності запропонованої математичної моделі та дослідження з метою розробки рекомендацій зі збільшення швидкодії захисної апаратури силових кіл електрорухомого складу залізниць у раціональних межах.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою визначення швидкості наростання струму $\frac{di}{dt}$ у колах тягових двигунів електровозів постійного струму від моменту подачі напруги до моменту зрушення розроблена математична модель, що описує роботу електропривода електровоза постійного струму у вказаному режимі.

Математична модель розроблена у відповідності з рис. 1. Мається на увазі двигун послідовного збудження.

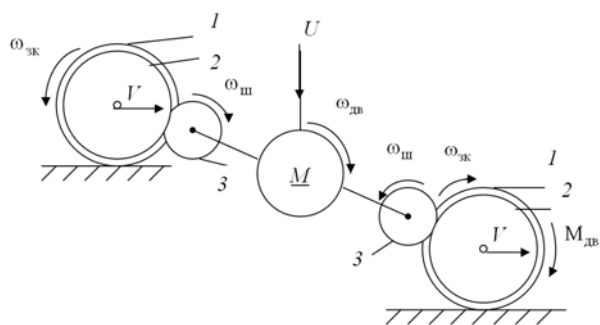


Рис. 1. Електромеханічна система приводу однієї колісної пари:

1 – колісна пара, 2 – зубчасте колесо редуктора, 3 – шестерня редуктора, M – двигун постійного струму послідовного збудження, U – напруга, що прикладена до якоря двигуна

Загальний вигляд системи диференціальних рівнянь [1, 2]:

$$\begin{cases} L_{\text{я}} \frac{di}{dt} = U - c_{\text{е}} \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - i \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{пуск}}); \\ J_{\text{прив}} \frac{d\omega}{dt} = c_{\text{м}} \Phi \cdot i - M_{\text{с}}; \\ c_{\text{е}} \Phi = f(I_3); \\ c_{\text{м}} \Phi = f(I_3), \end{cases} \quad (1)$$

де $L_{\text{я}}$ – сумарна індуктивність якірного кола двигуна без обмотки збудження;

$R_{\text{я}}$ – сумарний активний опір кола двигуна;

$R_{\text{пуск}}$ – опір пускових реостатів;

i – струм у колі якоря;

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

$c_{\text{м}}, c_{\text{е}}$ – постійні двигуна;

Φ – основний магнітний потік;

$M_{\text{с}}$ – статичний момент опору на валу двигуна;

$J_{\text{прив}}$ – приведений до вала двигуна момент інерції з урахуванням ваги поїзда, що приходить на один двигун.

Момент інерції $J_{\text{прив}}$ вважаємо постійним та приведеним до вала одного тягового двигуна. В цьому випадку момент інерції при передатному відношенні $i_{\text{ред}}$ і заданій масі поїзда визначається за розрахунковою схемою (рис. 1) і може бути записаний як [3]:

$$J_{\text{прив}} = J_{\text{дв}} + 2 \cdot J_{\text{ш}} + \frac{2 \cdot (J_{\text{зк}} + J_{\text{кп}})}{i_{\text{ред}}^2} + \frac{(P + Q) \cdot \rho^2}{n}, \quad (2)$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції якоря тягового двигуна;

$J_{\text{ш}}$ – момент інерції шестерні редуктора;

$J_{\text{зк}}$ – момент інерції зубчатого колеса редуктора;

$J_{\text{кп}}$ – момент інерції колісної пари;

P – маса електровоза;

Q – маса поїзда;

n – кількість осей (тягових двигунів).

Радіус приведення визначається за формулою:

$$\rho = \frac{V}{\omega_{\text{дв}}}. \quad (3)$$

Система диференціальних рівнянь (1) є нелінійною системою, оскільки містить вираз, що описує криву намагнічування $c\Phi = f(I_3)$. Крива намагнічування відноситься до неаналітичних нелінійностей. Для її використання потріб-

но провести лінеаризацію. Найбільш розповсюдженим методом лінеаризації нелінійностей є апроксимація: за допомогою відомих чисельних методів підбирається аналітичний вираз для нелінійності.

Відомо, що нелінійна залежність $c\Phi = f(I_3)$ може бути з прийнятною точністю апроксимована прямолінійними відрізками і записана наступною системою рівнянь [4]:

$$c\Phi(i) = \begin{cases} c\Phi_{01} + k_{\Phi 1} \cdot i; \\ c\Phi_{02} + k_{\Phi 2} \cdot i; \\ \vdots \\ c\Phi_{0i} + k_{\Phi i} \cdot i, \end{cases} \quad (4)$$

де $k_{\Phi i} = \frac{\lambda_i \Phi_i}{\Phi_{i-1} \lambda_i}$ – коефіцієнт, що залежить від форми кривої на i -й ділянці апроксимації; $\lambda_i \Phi_i$, $\Phi_{i-1} \lambda_i$ – відрізки на рис. 2 та 3.

У нашому випадку розглядаємо криву намагнічування двигуна типу ЕД-141У електровозу ДЕ1 [5]. Апроксимовані $c_{\text{е}}\Phi = f(I_3)$ та $c_{\text{м}}\Phi = f(I_3)$ показані на рис. 2 та 3.

Маючи апроксимовані $c_{\text{е}}\Phi = f(I_3)$ та $c_{\text{м}}\Phi = f(I_3)$, використаємо математичну модель (1) для визначення $i = f(t)$ від моменту подачі напруги на якір двигуна до моменту зрушення.

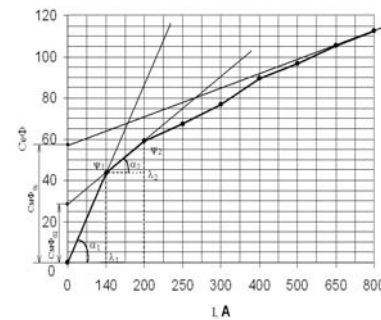


Рис. 2. Апроксимація кривої намагнічування $c_{\text{е}}\Phi = f(I_3)$

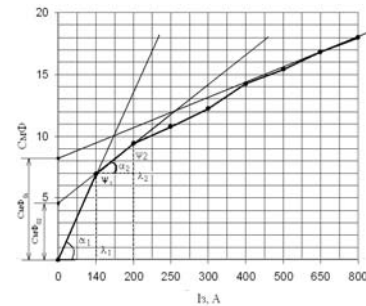


Рис. 3. Апроксимація кривої намагнічування $c_{\text{м}}\Phi = f(I_3)$

При розрахунках приймаємо, що поїзд рухається по прямій на горизонтальній ділянці, кількість осей (тягових двигунів) дорівнює восьми, маса електровозу $P = 188 \cdot 10^3$ кг, маса поїзду $Q = 3 \cdot 10^6$ кг.

На рис. 4 наведено графік перехідного процесу при пуску тягових двигунів до моменту зрушення при напрузі в мережі – 3 кВ.

Адекватність результату моделювання за запропонованою моделлю перевірена згідно відповідної документації для електровозу ДЕ1 [5]. На пусковому реостаті з моменту пуску до моменту зрушення виводиться 10 ступенів. Швидкість при цьому дорівнює нулю. При виведенні першої ступені пусковий струм дорівнює 187 А, другої – 242 А, третьої – 293 А, а при виведенні останньої десятої ступені струм пуску дорівнює 731 А. Після десятої ступені починає зростати швидкість. З рис. 4 видно, що струм при виведенні відповідних ступенів майже точно дорівнює значенням, вказаним вище. Це дозволяє вважати, що запропонована модель тягових двигунів постійного струму послідовного збудження, з урахуванням всіх допущень, задовільно описує процес пуску до моменту зрушення.

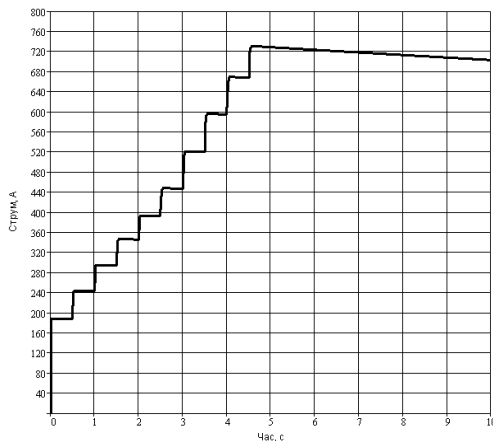


Рис. 4. Залежність $i = f(t)$ при напрузі в мережі 3кВ

У випадку збільшення напруги в контактній мережі до 4000 В (рис. 5) пусковий струм зростає приблизно до 970 А на останній ступені виведення пускового реостату за той же проміжок часу, що і при нормальному пуску.

Маючи залежності $i = f(t)$, можемо визначити швидкість наростання струму у колі за певний проміжок часу. Цей проміжок часу приймаємо 0,001 с. – що на порядок менше, ніж у електромагнітних проміжних реле, які використовуються у теперішній час в схемах захисту, наприклад, див. рис. 6.

У схемі рис. 6 захист від струмів КЗ кіл опалення пасажирських вагонів, які живляться від спеціальної обмотки тягового трансформатора електровозів типу ЧС8, здійснюється за допомогою головного вимикача електровозу, номінальний час спрацювання якого 0,04 с. Сигнал на розмикання головного вимикача електровоза подається через два проміжних якірних реле, номінальний час спрацювання кожного з яких 0,02 с.

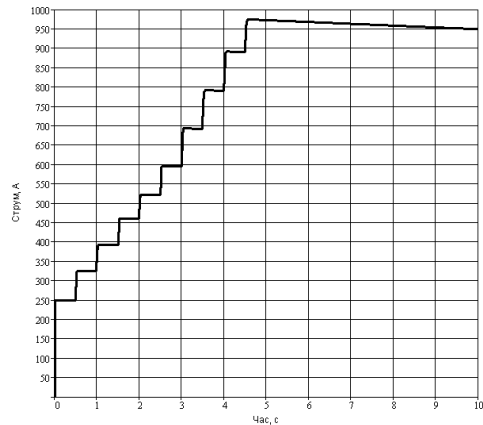


Рис. 5. Залежність $i = f(t)$ при збільшенні напруги в мережі до 4кВ

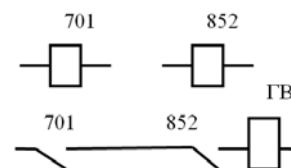


Рис. 6. Котушки та контакти проміжних реле, що подають сигнал на відключення ГВ: 701, 852 – проміжні реле, ГВ – головний вимикач

Отримання сигналу на спрацювання реле 701 (702) та 852 показано на рис. 7.

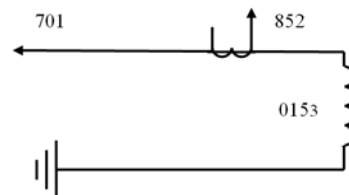


Рис. 7. Схема живлення опалення пасажирських вагонів від електровозу ЧС8

015₃ – вторинна обмотка тягового трансформатора, від якої живляться печі опалення пасажирських вагонів. При перевантаженнях та КЗ у колах опалення сигнал поступає на котушки проміжних реле (рис. 6), які розривають свої контакти у колі котушки головного вимикача, головний вимикач розмикає коло живлення електровозу.

Таким чином, сумарний час ($t_{\text{сум}}$) від моменту виникнення КЗ до розмикання кола головним вимикачем складає:

$$t_{\text{сум}} = (0.04 + 2 \cdot 0.02) = 0.08 \text{ с.} \quad (5)$$

Швидкість $\frac{di}{dt}$ визначається наступним чином. Першу ступень зміни струму збільшимо за масштабом (рис. 8), відкладаємо від нуля по шкалі часу 0,001 с., піднімаємо перпендикуляр до кривої струму та отримаємо величину струму. В табл. 1 заносимо значення $\frac{di}{dt}$. У нашому випадку вибрана $i = f(t)$ для першої ступені, для якої $\frac{di}{dt}$ має найбільше значення.

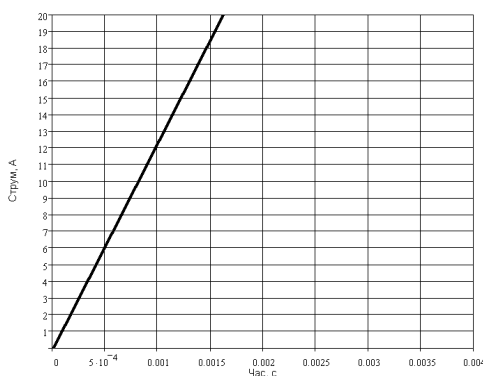


Рис. 8. Перша ступень зміни струму при напрузі в контактній мережі 3 кВ

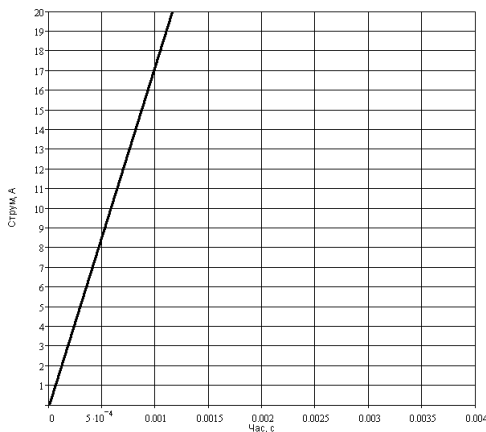


Рис. 9. Перша ступень зміни струму при напрузі в контактній мережі 4 кВ

Таким чином, при розробці швидкодіючого апарату захисту від КЗ на сучасній елементній базі потрібно забезпечити, щоб цей апарат спрацював би при $\frac{di}{dt} > 17000 \text{ А/с}$. Наскільки $\frac{di}{dt}$ повинно бути більше 17000 А/с , потрібно

встановити в результаті відповідних досліджень.

Таблиця 1

Ступені пускового реостата	$\frac{di}{dt}$	
	$U_{\text{мер}} = 3000 \text{ В}$	$U_{\text{мер}} = 4000 \text{ В}$
1	$12/0,001 = 12000$	$17/0,001 = 17000$
2	3300	5400
3	3000	3100
4	3200	4300
5	3000	3500
6	3000	4000
7	5000	6000
8	3200	4500
9	3300	2300
10	3800	4500

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження показали, що запропонована математична модель адекватно описує процеси, які відбуваються при перехідних режимах у силовому колі двигунів електровоза і може бути використана для дослідження будь-яких перехідних режимів у цьому колі.

При розробці захисних апаратів електровозу ДЕ1, які сприяли б тому, що під час КЗ коло буде розірване раніше, ніж струм короткого замикання досягне максимуму, у першому наближенні можна прийняти $\frac{di}{dt} = 17000 \text{ А/с}$.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Чорний, О. П. Моделирование электромеханических систем [Текст] / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін. – Кременчук, 2001. – 410 с.
2. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
3. Величко, Т. В. Теория электропривода, часть 1. Механика и характеристики двигателей в электроприводе [Текст]: учеб. пособие / Т. В. Величко, Д. И. Родькин. – Кременчук, 1999. – 237 с.
4. Тулупов, В. Д. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава [Текст] / В. Д. Тулупов. – М.: Транспорт, 1976. – 368 с.
5. Электровоз магистральный ДЭ1. Техническое описание. ЗТП.000.020-03 ТО [Текст]. – 1999. – 188 с.

Надійшла до редколегії 25.09.2008.