

## ВПЛИВ РЕЖИМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ПЕРЕХІДНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОРУХОМОМУ СКЛАДІ

*Методом математичного моделювання виконана оцінка впливу режиму короткого замикання в контактній мережі на електромагнітні процеси в електрорухомому складі постійного струму. Встановлено, що в цьому режимі струм електровозу змінюється з тягового на генераторний (рекуперативний).*

*Методом математического моделирования выполнена оценка влияния режима короткого замыкания в контактной сети на электромагнитные процессы в электроподвижном составе постоянного тока. Установлено, что в этом режиме ток электровоза изменяется с тягового на генераторный (рекуперативный).*

### ВСТУП

Ця робота є продовженням досліджень [1-3] перехідних аварійних електромагнітних процесів у системі електричної тяги 3,3 кВ постійного струму. В [1] шляхом математичного моделювання досліджено вплив режиму повного зняття напруги на струмоприймачі електровоза ДЕ 1 з наступним її відновленням на електромагнітні процеси в його силових тягових колах. Автори проаналізували процеси при відриві струмоприймача на час тривалістю від 0,5 до 1,5 с. Тим же методом в [2] оцінено реакцію силових кіл електровоза ДЕ 1 на поштовхи-зростання напруги на струмоприймачі. При цьому враховано випадковий характер поштовхів напруги в межах 214-990 В.

Одним із найбільш розповсюджених аварійних режимів у системі електричної тяги постійного струму є режим короткого замикання (КЗ) в контактній мережі (КМ) [4-6]. Це пояснюється великою кількістю

причин, які обумовлюють такий режим [4]. В [3] також математичним моделюванням автори розраховували перехідні електромагнітні процеси в контактній мережі постійного струму в режимі КЗ. Однак при цьому вони не дослідили характер зміни напруги ні на тяговій підстанції (ТП), ні на електрорухомому складі (ЕРС), що дуже важливо для загального аналізу процесів у всій системі електричної тяги. Тому метою цієї роботи є оцінка шляхом математичного моделювання впливу КЗ в КМ на електромагнітні процеси в ЕРС (на прикладі електровозу ДЕ 1).

### СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ

На рис. 1 і рис. 2, згідно з роботою [3], представлені відповідно принципова схема і схема заміщення фідерної ділянки системи електричної тяги 3,3 кВ постійного струму.

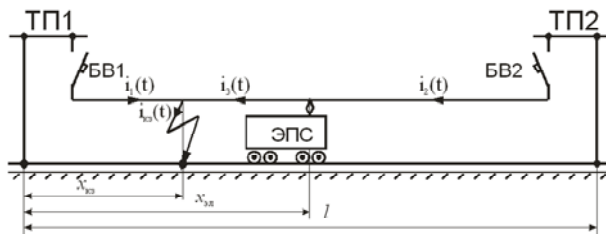


Рис. 1. Принципова схема фідерної ділянки

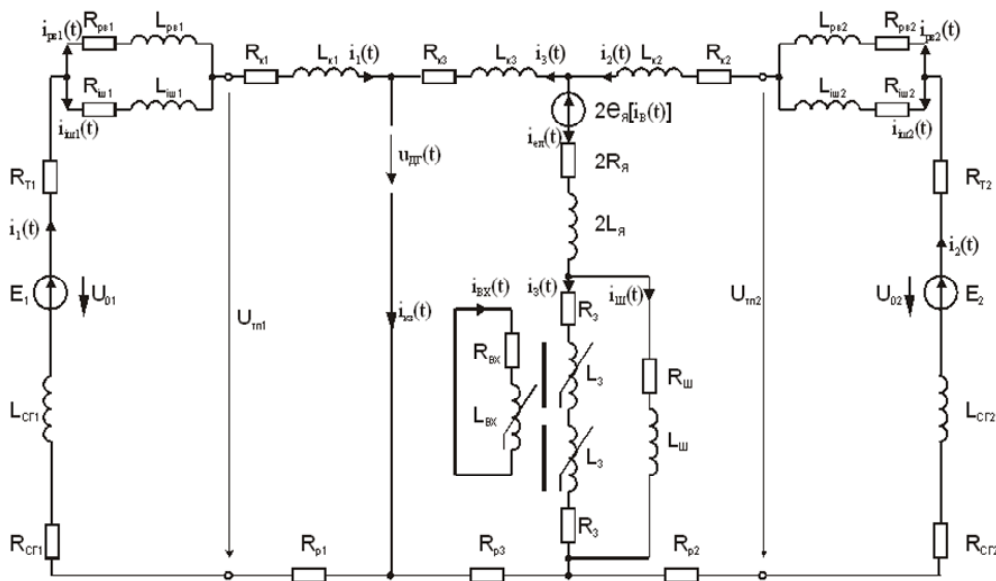


Рис. 2. Схема заміщення фідерної ділянки у режимі короткого замикання

Ділянка прийнята одноколійною з двостороннім живленням від ТП 1 та ТП 2 з одним електровозом ДЕ1, який рухається у режимі паралельного з'єднання тягових двигунів (ТД). У розглядуваній системі "ТП-КМ-ЕРС" (рис. 1) відбулося КЗ між контактним проводом і залізничною колією. У цьому режимі електромагнітний стан системи тяги описується наступною системою нелінійних диференціальних рівнянь:

$$i_{рв1}(t) + i_{ім1}(t) - i_1(t) = 0, \quad (1)$$

$$i_1(t) + i_3(t) - i_{кз}(t) = 0, \quad (2)$$

$$-i_3(t) - i_{еп}(t) + i_2(t) = 0, \quad (3)$$

$$-i_{рв2}(t) - i_{ім2}(t) + i_2(t) = 0, \quad (4)$$

$$-i_3(t) + i_{еп}(t) - i_{ш}(t) = 0, \quad (5)$$

$$i_3(t) + i_{вх}(t) - i_{\mu}(t) = 0, \quad (6)$$

$$(R_{T1} + R_{зГ1} + R_{р1} + R_{к1}) \cdot i_1(t) + (L_{T1} + L_{зГ1} + L_{к1}) \cdot \frac{di_1(t)}{dt} +$$

$$+ R_{рв1} \cdot i_{рв1}(t) + L_{рв1} \cdot \frac{di_{рв1}(t)}{dt} + U_{дг} = U_{01},$$

$$R_{рв1} \cdot i_{рв1}(t) + L_{рв1} \cdot \frac{di_{рв1}(t)}{dt} -$$

$$- R_{ім1} \cdot i_{ім1}(t) - L_{ім1} \cdot \frac{di_{ім1}(t)}{dt} = 0, \quad (8)$$

$$- U_{дг} - R_{кз} \cdot i_3(t) - L_{кз} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + 2 \cdot e_{я} \cdot [i_3(t)] +$$

$$+ 2 \cdot R_{я} \cdot i_{еп}(t) + 2 \cdot L_{я} \cdot \frac{di_{еп}(t)}{dt} + 2 \cdot R_3 \cdot i_3(t) +$$

$$+ 2 \cdot 2p\sigma_3 w_3 \frac{d\Phi(t)}{dt} - R_{р3} i_3(t) - 2L_{р3} \frac{di_3(t)}{dt} = 0,$$

$$- 2 \cdot R_3 \cdot i_3(t) - 2 \cdot 2p\sigma_3 w_3 \frac{d\Phi(t)}{dt} +$$

$$+ R_{ш} i_{ш}(t) + 2L_{ш} \frac{di_{ш}(t)}{dt} = 0, \quad (10)$$

$$R_{вх} \cdot i_{вх}(t) + \sigma_{вх} w_{вх} \frac{d\Phi(t)}{dt} = 0, \quad (11)$$

$$(R_{р3} + R_{кз}) \cdot i_3(t) + (L_{р3} + L_{кз}) \cdot \frac{di_3(t)}{dt}$$

$$(R_{T2} + R_{зГ2} + R_{р2} + R_{к2}) \cdot i_2(t) +$$

$$+ (L_{T2} + L_{зГ2} + L_{к2}) \cdot \frac{di_2(t)}{dt} +$$

$$+ R_{рв2} \cdot i_{рв2}(t) + L_{рв2} \cdot \frac{di_{рв2}(t)}{dt} + U_{дг} = U_{02},$$

$$R_{рв2} \cdot i_{рв2}(t) + L_{рв2} \cdot \frac{di_{рв2}(t)}{dt} -$$

$$- R_{ім2} \cdot i_{ім2}(t) - L_{ім2} \cdot \frac{di_{ім2}(t)}{dt} = 0. \quad (13)$$

Позначення величин у системі рівнянь (1) – (13) і значення їх параметрів ті ж самі, що й в роботі [3].

#### РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Систему (1) – (13), приведену до нормальної форми, було розв'язано у програмному середовищі

MAPLE 9.5 шляхом чисельного інтегрування методом Адамса; результати розрахунків представлені на рис. 3 і 5, а-д.

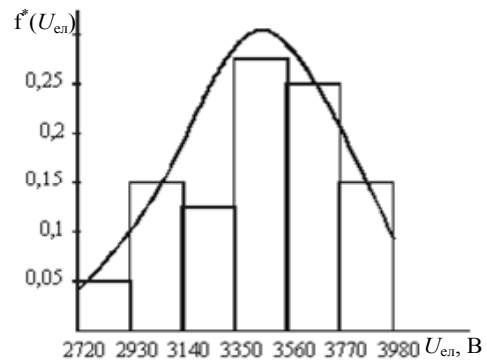


Рис. 3. Гістограма напруги на струмоприймачі

Як випливає з рис. 3 при короткому замиканні у результаті шунтування частини контактної мережі і силових кіл електровозу, напруга на струмоприймачі  $U_{ел}$  зменшується кидком до так званих "залишкових" значень у діапазоні від 3980 до 2720 В. При цьому величина  $U_{ел}$  є випадковою, оскільки вона залежить від багатьох випадкових факторів, зокрема від координат  $x_{кз}$  і  $x_{ел}$  (рис. 1), початкових умов тощо.

Теоретично у загальному випадку зазначене зменшення кидком напруги  $U_{ел}$  викликає перехідний процес зменшення струму  $i_{ел}$  ЕРС. Останнє обумовлює також зменшення основного магнітного потоку  $\Phi(t)$  тягових двигунів ЕРС, а також і зменшення проти-е.р.с. якорів двигунів. Оскільки  $\Phi(t)$  зменшується більш повільно, ніж  $i_{ел}$ , також більш повільно зменшуються і проти-е.р.с. ТД. І тоді, коли залишкові значення  $U_{ел}$  стануть менше проти-е.р.с., струм  $i_{ел}$  змінить свій знак, тобто прийме генераторний (рекуперативний) характер. Отже, основний вплив на появу генераторного струму чинить основний потік  $\Phi(t)$ . Проаналізуємо характер його зміни у режимах повного поля (ПП) і послаблення збудження (ПЗ) ТД ЕРС.

У режимі ПП основний вплив на  $\Phi(t)$  здійснює магнітний потік  $\Phi_{вхр}$  (рис. 4), створений вихровими струмами у масивних магнітопроводах ТД, який залежить від опору  $R_{вхр}$ .

В початковий період, внаслідок магнітного поверхневого ефекту й тим самим витискання  $\Phi(t)$ , активний опір  $R_{вхр}$  контуру вихрових струмів великий, бо  $R_{вхр} \approx k \cdot B_y$ , де  $B_y$  – усталене початкове значення індукції. Тому значення  $i_{вхр}$  малі і створений ними  $\Phi_{вхр}$  теж малий, його протидія зміні основного потоку  $\Phi(t)$  практично відсутня і тому  $\Phi(t)$  загасає різко, до (20-25 %) початкового значення, в основному за рахунок зменшення його в поверхневих шарах магнітопроводу та потоків розсіяння.

При подальшому протіканні перехідного процесу різке зазначене вище загасання  $\Phi(t)$  (а отже, і значна  $d\Phi/dt$ ) обумовлює великі значення вихрової е.р.с. й тим самим великі значення  $i_{вхр}$ , бо  $i_{вхр} = \Phi(t) \cdot d\Phi/dt$ . Створений тим самим великий  $\Phi_{вхр}$  обумовлює суттєву протидію, що й визначає більш повільне загасання  $\Phi(t)$ . Далі, у свою чергу, менша  $d\Phi/dt$  зменшує вихрову е.р.с. та вихрові струми, які знижують ефект вити-

снення потоку та  $i_{ввр}$  в магнітопроводі, що призводить до зменшення опору  $R_{ввр}$ . У подальшому зменшення  $R_{ввр}$  призводить до збільшення  $i_{ввр}$  та  $\Phi_{ввр}$ , протидія якого збільшується, як наслідок, основний  $\Phi(t)$  загасає повільніше.

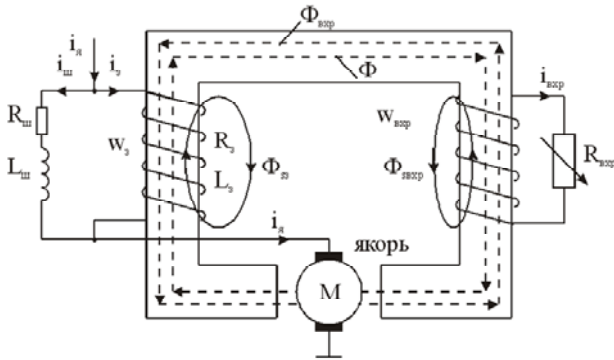


Рис. 4. Схема заміщення тягового електродвигуна:  $w_з$ ,  $R_з$  та  $L_з$  – кількість витків, активний опір та індуктивність обмотки збудження;  $R_{ш}$  та  $L_{ш}$  – активний опір та індуктивність шунтувальної вітки (з індуктивним шунтом);  $i_я$ ,  $i_з$  та  $i_{ш}$  – струм в обмотці якоря, обмотці збудження та в шунтувальній вітці;  $w_{ввр}$ ,  $R_{ввр}$  та  $i_{ввр}$  – кількість витків, активний опір та струм короткозамкненого контуру, еквівалентного вихровим струмам;  $\Phi_{сз}$  і  $\Phi_{сввр}$  – магнітні потоки розсіяння відповідно обмотки збудження і короткозамкненого контуру

У режимі ПЗ на характер та ступінь загасання  $\Phi(t)$  впливають не тільки вихрові струми остова й головних полюсів, але й струм  $i_{ш}$  контуру "збудження – шунт" (З-Ш) (рис. 2). Тому у режимі ПЗ, на будь-якій ступені, спостерігається менша швидкість загасання  $\Phi_{ввр}$ , ніж у режимі ПП. Це пояснюється тим, що струм  $i_{ш}$  у контурі З-Ш, підтримуючи потік, зменшує ступінь його загасання за рахунок розряду індуктивного шунта через обмотку збудження ( $i_{ш}$  змінює знак) (рис. 5,а). При цьому зі збільшенням глибини ПЗ швидкість загасання потоку  $\Phi(t)$  зменшується.

Результати розрахунків (рис. 5,б) свідчать про те, що основний магнітний потік зменшується за експоненціальною залежністю, досягаючи усталеного значення 0,065 Вб за 0,06-0,07 с. Синфазно з ним, без кидка, зменшується струм в обмотці збудження (рис. 5,в), зменшуючись від 475 до 235 А при зменшенні  $U_{ел}$  від 3000 до 2010 В. Струм  $i_я$  (рис. 5,г), тобто електровоза  $i_{ел}$ , по-перше, зменшується кидком, і по-друге, змінює свій напрямок на зворотний, тобто теж стає генераторним, тривалість якого складає 0,055 с. Далі струм переходить через нуль, досягаючи через 0,1-0,13 с свого звичайного тягового характеру.

Характер зміни вихрових струмів  $i_{ввр}$  (рис. 5,д) теж свідчить про їх основний вплив на зміну  $\Phi(t)$ , а, отже, на проти е.р.с.  $e(t)$  і перехід  $i_{ел}$  в рекуперативний характер. Дійсно, у перші 0,01 с після КЗ і зменшення  $U_{ел}$ , струм  $i_{ввр}$  різко зростає, створений ним  $\Phi_{ввр}$  стримує спад основного  $\Phi(t)$ , що й призводить до затримки спаду е.р.с. якорів ТД, сума яких перевищує залишкове значення  $U_{ел}$  й тим самим обумовлює зміну струму  $i_{ел}$  електровоза.

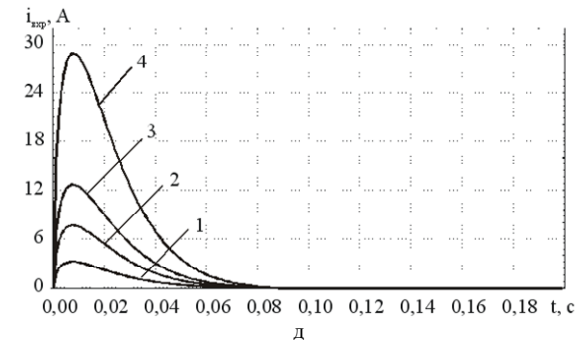
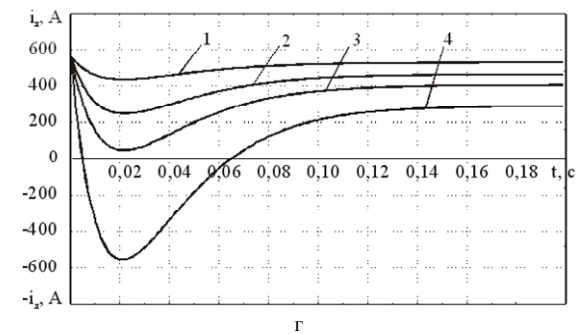
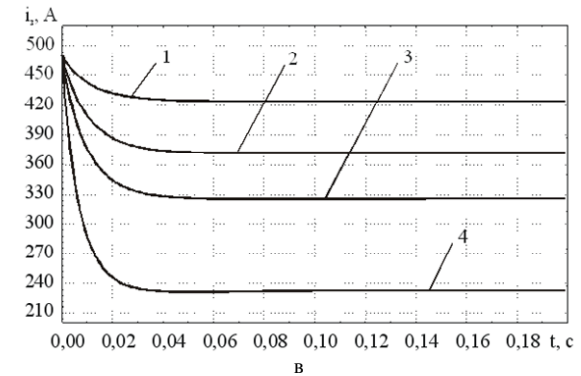
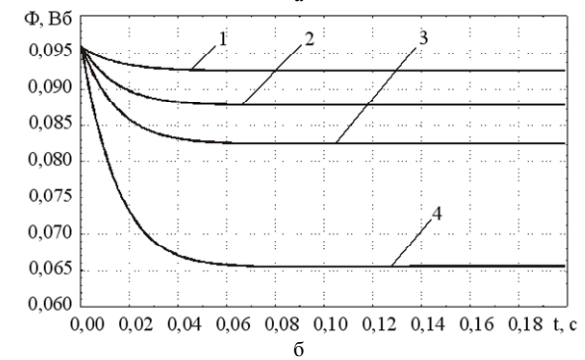
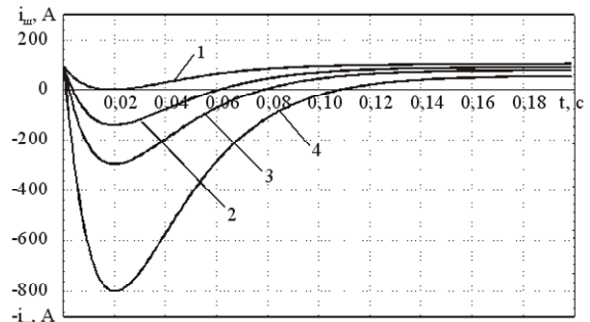


Рис 5. Часові залежності перехідних величин струму в шунтувальній вітці (а), магнітного потоку (б), струму в обмотці збудження (в), струму якоря (г) та вихрових струмів (д) у режимі ПЗ-4, при  $U_{ел}$  (В): крива 1 – 2850; 2 – 2700; 3 – 2535; 4 – 2010

Електрорухомий склад, що рухається з генераторними струмами, являє собою рухоме джерело, яке видає електроенергію до місця КЗ. Це збільшує об'єм термічних пошкоджень у контактній мережі, зокрема, перепал контактної мережі. Генераторні струми також викликають ушкодження іскрових проміжків у колі заземлення опор контактної мережі [5]. Нарешті, генераторні струми нерідко призводять до колового вогню на колекторах ТД, що обумовлює їх вихід із ладу.

#### ВИСНОВКИ

Оскільки режим короткого замикання у контактній мережі є достатньо розповсюдженим аварійним режимом, що призводить до виникнення в електрорухомому складі небезпечних генераторних струмів, необхідна розробка і обладнання електрорухомого складу спеціальним захистом від зазначених струмів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Костин Н.А., Мищенко Т.Н., Гилевич О.И. Стохастические переходные электромагнитные процессы в силовых цепях электровозов при резком изменении напряжения на токоприёмнике // Электротехника і електромеханіка. – 2005. – № 4. – С. 73-78.
2. Мищенко Т.Н. Математическое моделирование влияния толчков случайной функции напряжения на токоприёмнике на переходные электромагнитные процессы в электровозе ДЭ 1 // Дніпропетровськ: Вісник ДНУЗТ. – 2005. – Вип. 9. – С. 61-68.
3. Михаліченко П.Є., Костін М.О. Математичне моделювання перехідних аварійних електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму // Технічна електродинаміка. Темат. вип. Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Част. 2. – С. 31-35.
4. Кучма К.Г., Марквардт Г.Г., Пупынин В.Н. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – 303 с.

5. Векслер М.М. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.
6. Пупынин В.Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах // Докт. дисс. – М.: МИИТ, 1986. – 340 с.

Надійшла 30.08.2010

Михаліченко Павло Євгенови, к.т.н., доц.  
Костін Микола Олександрович, д.т.н., професор  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна  
кафедра "Теоретичні основи електротехніки"  
Україна, 49010, Дніпропетровськ  
вул Академіка В.А. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-37  
e-mail: miha\_pavel80@mail.ru, evm@diit.dp.ua

Мищенко Тетяна Миколаївна, к.т.н., доцент  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна  
кафедра "Електропостачання залізниць"  
Україна, 49010, Дніпропетровськ  
вул Академіка В.А. Лазаряна, 2  
тел.: (056) 373-15-25, e-mail: diitmaterial@ukr.net

*P.Y. Mihalichenko, T.N. Mishienko, N.A. Kostin*

#### **The influence of the short circuit condition in the contact system on electromagnetic processes in electric train of direct current.**

The influence of the short circuit condition in the contact system on electromagnetic processes in electric train of direct current was estimated by the method of mathematical modeling. It has been established that in this condition the current of an electric locomotive changes for traction current info generative (recuperative) one.

**Key words – mathematical modeling, short circuit condition, contact system, electromagnetic processes, electric train of direct current.**