

УДК 621.332.3:621.311

П. Є. Михаліченко, канд. техн. наук.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ КОЛЕКТОРНИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ АВАРІЙНОМУ РЕЖИМІ «ЗНЯТТЯ–ВІДНОВЛЕННЯ» НАПРУГИ НА ЙОГО СТРУМОПРИЙМАЧІ

Анотація. Розглянуто розроблену автором математичну модель аварійного режиму «зняття–відновлення» напруги на струмоприймачі електровозів постійного струму. Отримані результати дають змогу оцінити електромагнітні процеси в колах тягових електричних двигунів електровозів.

Ключові слова: електровоз, струмоприймач, тяговий електродвигун, математична модель

Р. Е. Mihalichenko, PhD.

STUDY OF THE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE COLLECTOR TRACTIVE ENGINES OF DIRECT CURRENT OF ELECTRIC LOCOMOTIVE UNDER EMERGENCY MODE OF "REMOVING–RECONSTRUCTION" VOLTAGES ON ITS TROLLEY

Abstract. Mathematical model of emergency mode of "removing–reconstruction" voltages on trolley of a direct current electric locomotive is presented. Obtained results allow to evaluate the electromagnetic processes in circuit of the tractive electric engines of electric locomotive.

Keywords: electric locomotive, trolley, tractive electric motor, mathematical model

П. Е. Михаліченко, канд. техн. наук.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ КОЛЕКТОРНЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ «СНЯТИЕ–ВОССТАНОВЛЕНИЕ» НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕГО ТОКОПРИЕМНИКЕ

Аннотация. Рассмотрена разработанная автором математическая модель аварийного режима «снятия–восстановления» напряжения на токоприемнике электровозов постоянного тока. Полученные результаты позволяют оценить электромагнитные процессы в цепи тяговых электрических двигателей электровозов.

Ключевые слова: электровоз, токоприемник, тяговый электродвигатель, математическая модель

Вступ. Як показують дослідження [4 – 5], контактні проводи є найбільш пошкоджуваними пристроями контактної мережі. Кількість їхніх відмов у рік на 100 км у системі електротяги постійного струму України становить 16 % (для порівняння, у Росії – 38 %). Однією з головних причин цих відмов є перепал контактних проводів. При цьому до перепалу та віджигу проводів внаслідок електричної дуги веде неякісне струмознімання, що обумовлює зокрема відрив (з наступним доторканням) струмоприймача від проводів.

Режим короткочасного зняття напруги на струмоприймачі електрорухомого складу залізниць постійного струму з наступним її відновленням спостерігається у випадках: відриву струмоприймача від контактного проводу під час руху поїзда внаслідок вібрації та коливання струмоприймача; при вимиканні фідера швидкодіючим вимикачем і його вторинному вмиканні пристроями АПВ, при проїзді повітряних проміжків у місцях секціонування контактної мережі;

© Михаліченко П.Є., 2012

при наявності ожеледі тощо. Найчастіше при експлуатації зустрічається перший випадок, тобто «опускання–піднімання» струмоприймача під навантаженням. Його загальна тривалість становить від декількох десятих часток секунди до 1,5 – 2,0 с [13].

Дослідження режиму «зняття–відновлення» напруги, який спостерігається при «відриві–доторканні» струмоприймача, особливо важливо для швидкісного руху поїздів на Україні і загалом на створюваних з Україною Європейських транспортних коридорах. Це питання мало досліджене навіть для ділянок не швидкісного руху. По вказаній проблемі треба відзначити лише роботи [7 – 8], проте в них проаналізовано процеси лише в електровозі і без врахування системи тягового електропостачання.

Створення математичної моделі аварійного режиму. Процес «відрив–піднімання» струмоприймача обумовлює такі стадії (етапи) режиму «зняття–відновлення» напруги на струмоприймачі: **перша стадія** – зняття напруги за наявності електричної дуги між струмоприймачем і контак-

тним проводом (на початку відриву струмоприймача); **друга стадія** – повне вимикання струмоприймача від контактного проводу (тобто з моменту досягнення струмом електровоза нуля); **третя стадія** – відновлення напруги живлення (тобто з моменту доторкання струмоприймача до контактного проводу).

Як відомо, режим пуску електровоза постійного струму здійснюється при послідовному з'єднанні («С») тягових електричних двигунів (ТЕД).

Розрахуємо і проаналізуємо електромагнітні процеси в системі електротяги під час зняття і наступного відновлення напруги на струмоприймачі в режимі пуску електровоза методом математичного моделювання.

Узагальнена електрична схема заміщення системи електричної тяги в режимі пуску електровоза при з'єднанні «С» ТЕД має вигляд, показаний на рис. 1.

Згідно з рис. 1, математична модель електромагнітних процесів, що протікають у цій системі, являє собою систему рівнянь (1)–(8):

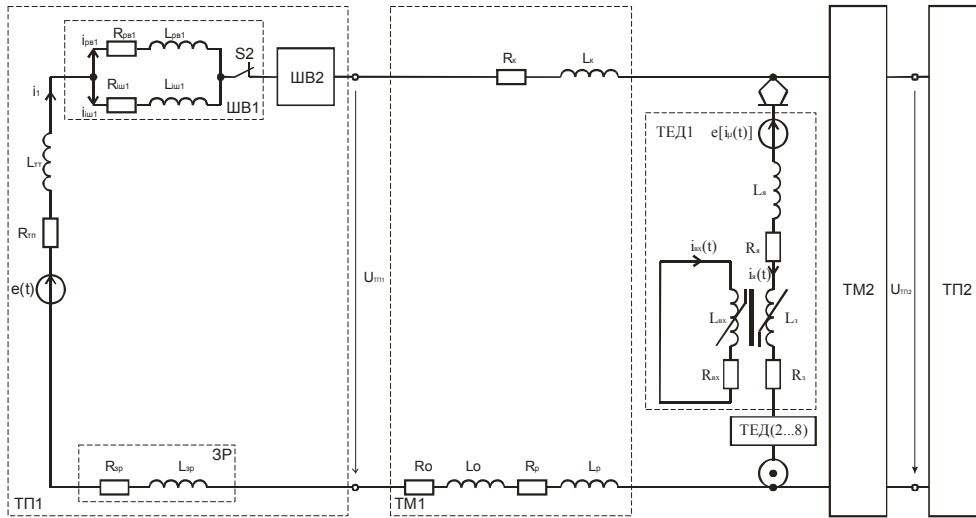


Рис. 1. Схема заміщення СЕТ з електровозом, що рухається на «С» позиції

$$\begin{aligned} & (R_{T1} + R_{I \tilde{N}1} + R_{CD1} + R_{E1} + R_{D1} + R_{O1}) \cdot i_1 + (L_{T1} + L_{CD1} + L_{E1} + L_{D1} + L_{O1}) \frac{di_1}{dt} + \\ & + R_{1\varnothing 1-1} \cdot i_{1\varnothing 1-1} + L_{1\varnothing 1-1} \frac{di_{1\varnothing 1-1}}{dt} + R_{\tilde{A}\tilde{A}} \cdot i_\beta + 8R_\beta \cdot i_\beta + 8L_\beta \frac{di_\beta}{dt} + \\ & + 2p\sigma_3\omega_3 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \dots + \Phi_8) = E_{I \tilde{N}1} - \tilde{N}\omega (\Phi_1 + \dots + \Phi_8); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & (R_{T2} + R_{I \tilde{N}2} + R_{CD2} + R_{E2} + R_{D2} + R_{O2}) \cdot i_2 + (L_{T2} + L_{CD2} + L_{E2} + L_{D2} + L_{O2}) \frac{di_2}{dt} + \\ & + R_{1\varnothing 2-1} \cdot i_{1\varnothing 2-1} + L_{1\varnothing 2-1} \frac{di_{1\varnothing 2-1}}{dt} + R_{\tilde{A}\tilde{A}} \cdot i_\beta + 8R_\beta \cdot i_\beta + 8L_\beta \frac{di_\beta}{dt} + \\ & + 2p\sigma_3\omega_3 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \dots + \Phi_8) = E_{I \tilde{N}1} - \tilde{N}\omega (\Phi_1 + \dots + \Phi_8); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\delta\tilde{a}1-1} \cdot i_{\delta\tilde{a}1-1} + L_{\delta\tilde{a}1-1} \frac{di_{\delta\tilde{a}1-1}}{dt} - R_{s_{\varnothing 1-1}} \cdot i_{s_{\varnothing 1-1}} - L_{s_{\varnothing 1-1}} \frac{di_{s_{\varnothing 1-1}}}{dt} &= 0; \\ R_{\delta\tilde{a}1-2} \cdot i_{\delta\tilde{a}1-2} + L_{\delta\tilde{a}1-2} \frac{di_{\delta\tilde{a}1-2}}{dt} - R_{s_{\varnothing 1-2}} \cdot i_{s_{\varnothing 1-2}} - L_{s_{\varnothing 1-2}} \frac{di_{s_{\varnothing 1-2}}}{dt} &= 0; \\ R_{\delta\tilde{a}2-1} \cdot i_{\delta\tilde{a}2-1} + L_{\delta\tilde{a}2-1} \frac{di_{\delta\tilde{a}2-1}}{dt} - R_{s_{\varnothing 2-1}} \cdot i_{s_{\varnothing 2-1}} - L_{s_{\varnothing 2-1}} \frac{di_{s_{\varnothing 2-1}}}{dt} &= 0; \\ R_{\delta\tilde{a}2-2} \cdot i_{\delta\tilde{a}2-2} + L_{\delta\tilde{a}2-2} \frac{di_{\delta\tilde{a}2-2}}{dt} - R_{s_{\varnothing 2-2}} \cdot i_{s_{\varnothing 2-2}} - L_{s_{\varnothing 2-2}} \frac{di_{s_{\varnothing 2-2}}}{dt} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 - i_{\delta a1-1} + i_{i_{\theta} 1-1} &= 0; \\ i_1 - i_{\delta a1-2} + i_{i_{\theta} 1-2} &= 0; \\ i_2 - i_{\delta a2-1} + i_{i_{\theta} 2-1} &= 0; \\ i_2 - i_{\delta a2-2} + i_{i_{\theta} 2-2} &= 0; \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\delta\delta-\zeta\delta} \cdot i_{\delta\delta 1} + \sigma_3 \omega_3 \frac{d\Phi_1}{dt} &= 0; \\ \dots & \\ R_{\delta\delta-\zeta\delta} \cdot i_{\delta\delta 8} + \sigma_3 \omega_3 \frac{d\Phi_8}{dt} &= 0; \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} i_y - i_{\mu 1} + i_{\delta\delta 1} &= 0; \\ \dots & \\ i_y - i_{\mu 8} + i_{\delta\delta 8} &= 0; \end{aligned} \right\} (6)$$

$$i_y - i_1 - i_2 = 0; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{\mu 1} &= f(\Phi_1(t)); \\ \dots & \\ i_{\mu 8} &= f(\Phi_8(t)). \end{aligned} \right\} (8)$$

де Φ – основний магнітний потік і магнітний потік; W_3 , R_3 та L_3 – кількість витків, активний опір та індуктивність обмотки збудження; i_y – струм в обмотці якоря; R_{ex} – активний опір короткозамкненого контура, еквівалентного вихровим струмам; σ_3 – коефіцієнт розсіяння обмотки збудження і короткозамкненого контура.

Зазначимо, що в еквівалентній схемі (рис. 1) і в моделі електрична дуга врахована спадом напруги на резисторі $R_{\delta\delta}$. Зрозуміло, що, вплив дуги треба було б враховувати шляхом використання її вольт-амперної характеристики [9]. Але, згідно з експериментальними даними [1, 9], падіння напруги в дузі для високовольтних кіл складає 2 – 3 % напруги живлення. Тобто, $R_{\delta\delta}$ є «малим параметром» [6] і тому дуга в моделі врахована як лінійний резистор з опором $R_{\delta\delta} = 0,22$ Ом [7].

Для врахування вихрових струмів i_{exp} , що виникають в остові та в осерді головних полюсів ТЕД, використано еквівалентний короткозамкнений контур (з кількістю витків W_{exp}), який індуктивно (через основний потік Φ) зв'язаний з обмоткою головних полюсів

аналогічно обмоткам однофазного трансформатора [12].

Розроблена вище математична модель, як і схема на рис. 1, є узагальненою, тобто чинною для всіх зазначених етапів режиму «зняття-відновлення» напруги. Для кожного етапу вона дещо змінюється.

Для початкового, першого етапу зняття напруги (коли дуга ще горить) математична модель (1) – (8) є чинною у повній мірі. Її чисельні розрахунки виконані для даних, наведених в роботах [10 – 11].

Аналіз результатів математичного моделювання. На першому етапі зняття напруги, тобто в процесі горіння та гасіння дуги, в режимі повного збудження поля сила струму електровоза під час протікання зменшується (від 565 до 523 А) (рис. 2).

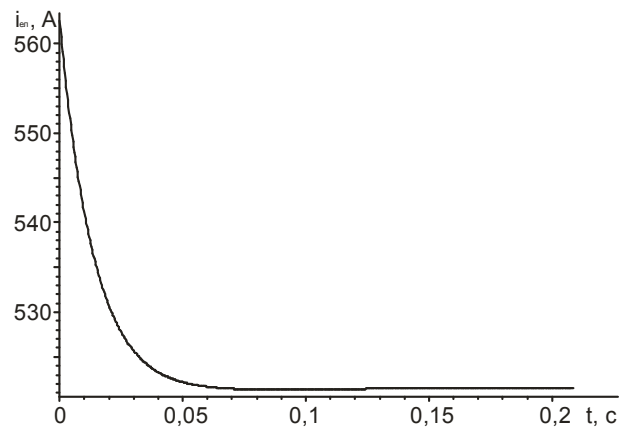


Рис. 2. Часова залежність струму електровоза

Тоді за наявності дуги напруга на е $u_{el}(t)$ а також основні магнітні потоки $\Phi(t)$ (рис. 3) ТЕД будуть зменшуватися.

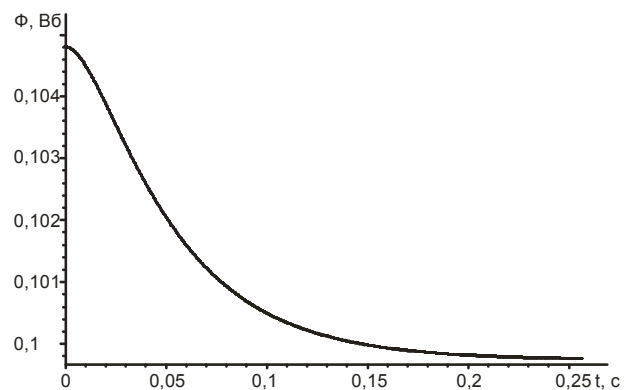


Рис. 3. Часова залежність зміни основного магнітного потоку

Зі збільшенням початкового значення струму $I_{поч}$ якорів поточне значення перехідного струму в дузі зростає, його похідна також збільшується, що обумовлює більше зменшення $u_{дз}$, й тим самим підвищення напруги на двигуні та його магнітного потоку в кінці стадії, що видно із рис. 4 для терміну часу зняття напруги $t_{зн} = 0,5$ с. У цьому випадку у більшій ступені проявляється спадаючий в часі характер магнітного потоку. З іншого боку, навіть ця ступінь зменшення $\Phi(t)$ обумовлюється значною величиною $\frac{d\Phi}{dt}$ й тим самим дуже малими (~ 15 А) значеннями вихрових струмів (рис. 5). Тобто, в цій стадії потік підтримується лише струмом $i_{я}(t)$, що дорівнює $i_3(t)$ і які практично незмінні та дорівнюють $I_{поч}$. Протягом першого етапу фідерні напруги і струми теж зменшуються, хоча і незначно.

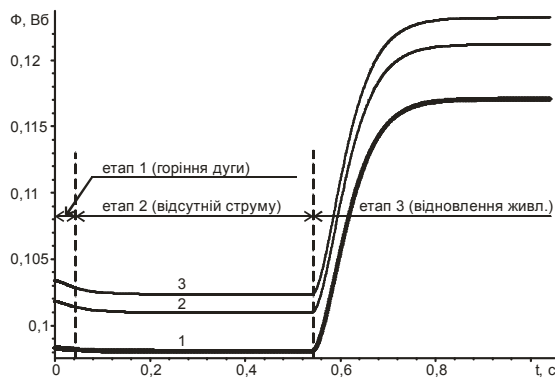


Рис. 4. Часові залежності зміни магнітного потоку протягом всього часу режиму «відрив-доторкання» струмоприймача при $t_{зн} = 0,5$ с та різних початкових значеннях струму електровоза: 1 – 500 А; 2 – 565 А; 3 – 600 А

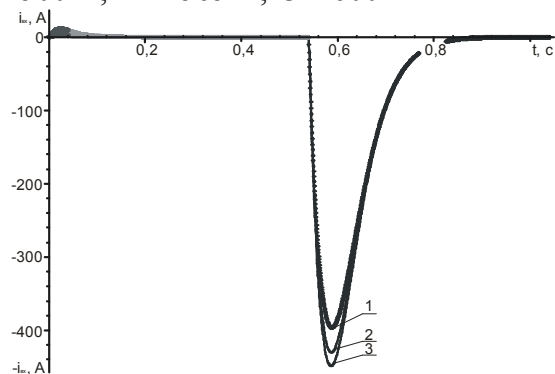


Рис. 5. Часові залежності зміни вихрових струмів для умов рис. 4

У другому етапі повного зняття напруги і після зникнення струму ($i_{ел} = 0$, $R_{дз} \rightarrow \infty$, $U_{ел} = 0$) електромагнітна енергія, що заощаджена в електромагнітному полі індуктивних елементів ТЕД, визначає зміну $\Phi(t)$ й інших параметрів. При цьому у режимі повного поля основний вплив на характер зміни головного магнітного потоку здійснює магнітний потік, створений вихровими струмами. Зокрема, в період, етапу що розглядається, в інтервалі часу повного зняття напруги $t_{зн} \leq 0,04 \dots 0,05$ с, внаслідок магнітного поверхневого ефекту й тим самим витискання магнітного потоку, активний опір R_{exp} контуру вихрових струмів великий (бо $R_{exp} \approx kB_y$, де B_y – усталене початкове значення індукції [3]). Тому значення i_{exp} ще менші, ніж на етапі 1 і створений ними магнітний потік Φ_{exp} теж малий. Він практично не протидіє зміні основного $\Phi(t)$, тому цей $\Phi(t)$ згасає за рахунок, в основному, зменшення його в поверхневих шарах магнітопроводу та потоків розсіяння. При цьому характери спадаючих кривих $\Phi(t)$ практично однакові при різних $I_{поч}$. До того ж різниця значень Φ у кінці стадії при різних $I_{поч}$ не перевищує 0,005 Вб.

Струм електровоза $i_{ел}(t) = i_{я}(t) = i_3(t)$ у другій стадії загасає різко (рис. 6). Коливання напруги на струмоприймачі від 2723 до 3980 В чисельно і за характером практично не впливають на зміну потоку $\Phi(t)$ та струмів $i_{я}(t)$, $i_{exp}(t)$ у 1-й та 2-й стадіях.

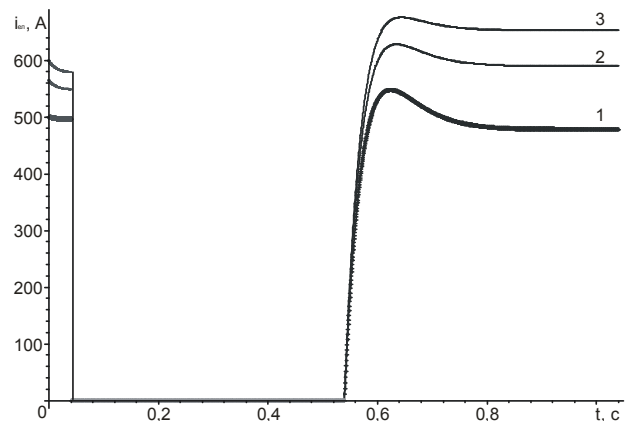


Рис. 6. Часові залежності зміни струму електровоза для умов рис. 4

Після гасіння дуги (її розриву) напруга на струмоприймачі, як і струм електровоза (рис. 6), різко зменшуються до нуля і тому на другому етапі $U = 0$.

Розглянуті вище етапи (стадії) 1 і 2 є де-що підготовчими до основного етапу 3, етапу відновлення напруги, під час якого і відбуваються основні електромагнітні процеси режиму «відрив-доторкання» струмоприймача. Третя стадія описується у загальному випадку системою рівнянь (1)–(8), але за умови, що $R_{02} = 0$. Струм електровоза i_{el} , це ж є і струм якорів $i_a(t)$, можна записати так:

$$i_a(t) = \frac{0,5U - \left(e(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + 2p_3\sigma_3 \frac{d\Phi}{dt} \right)}{R_a + R_3}$$

З цього виразу випливає, що характер перехідного струму у стадії відновлення напруги визначається законом відновлення в часі основного магнітного потоку і параметрами ТЕД.

Як відомо [2 – 3], загальні міркування про вплив основного магнітного потоку $\Phi(t)$ на перехідні величини ТЕД і електровоза в цілому такі. Якщо тривалість часу зняття t_{zn} напруги живлення достатня для помітного загасання $\Phi(t)$, то перед відновленням напруги значення цього потоку складає невелику величину. Відповідно і е.р.с. якоря і в ТЕД (яка визначається так: $e(t) = C_2 \cdot \omega \cdot \Phi(t)$) теж буде малою, оскільки швидкість обертання ω якоря приймається постійною у даний момент часу.

При миттєвому відновленні напруги на двигуні електровоза магнітний потік $\Phi(t)$, починає зростати і досягає усталеного значення не миттєво, як напруга, а поступово, сповільнено внаслідок демпфіруючої протидії магнітного потоку вихрових струмів. В результаті цього у початковий момент відновлення напруги живлення створюється значна різниця між напругою та проти-е.р.с. двигуна. Ця різниця при малому активному опорі обмоток ТЕД обумовлює значний кидок струму якоря кожного ТЕД, який погіршує не лише потенціальні умови на колекторах двигунів і може спричинити їх коловий вогонь, але, буде впливати і на елементи системи електропостачання. Тому тут у пода-

льшому проаналізуємо процеси у третій стадії, стадії відновлення напруги.

Як випливає із рис. 7, основний магнітний потік $\Phi(t)$ у режимі «С» – з'єднанні ТЕД при розриві дуги – спадає незначно від 0,102 до 0,101 Вб незалежно від часу зняття напруги t_{zn} в діапазоні від 0,25 до 1,0 с (криві 1–4). Після металевого доторкання струмоприймача до контактного проводу потік $\Phi(t)$ відносно повільно, впродовж $\sim 0,2$ с, збільшується від 0,101 до 0,12 Вб (рис. 7), а напруга на електровозі різко зростає від 0 до 3,1 кВ (рис. 8). В результаті цього струм електровоза також різко зростає від 0 до 620-660 А (в залежності від t_{zn}) (рис. 9).

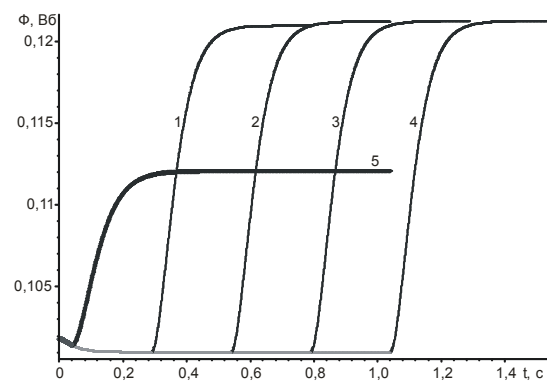


Рис. 7. Часові залежності зміни головного магнітного потоку ТЕД протягом режиму «відрив-доторкання» струмоприймача при різній тривалості 2-го етапу (зняття напруги t_{zn}):
1 – 0,25 с; 2 – 0,5 с; 3 – 0,75 с; 4 – 1,0 с;
5 – без 2-го етапу

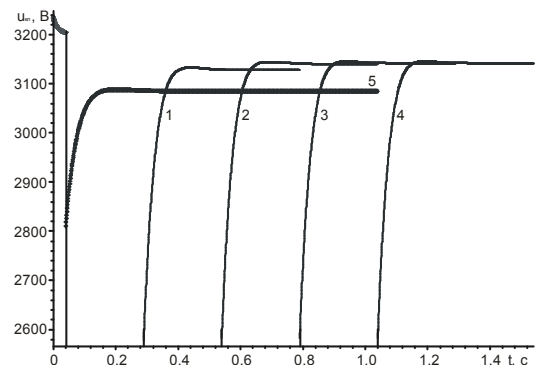


Рис. 8. Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі для умов рис.7

Практика спостереження процесу «відрив-піднімання» струмоприймача свідчить про те, що у деяких випадках розрив електричної дуги не відбувається, тобто після 1-го етапу зразу ж спостерігається відновлення напруги (3-й етап). Згідно [13], термін часу горіння дуги може тривати від 0,2 до 2,0 с.

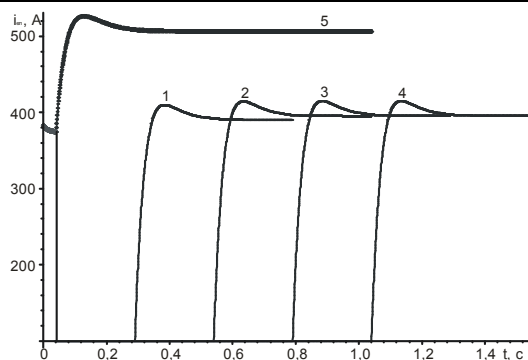


Рис. 9. Часові залежності зміни струму електровоза для умов рис. 7

Система рівнянь (1)–(8) доповнюється $R_{\text{дз}} = 0 \text{ Ом}$, $I_{\text{ел}} \neq 0$, $U \neq 0$. Чисельні розрахунки моделі виконано для тривалості часу горіння дуги до 0,5 с для $l = 10 \text{ км}$ і $I_{\text{поч.}} = 565 \text{ А}$. Результати наведені на рис. 10–12, з яких випливає наступне.

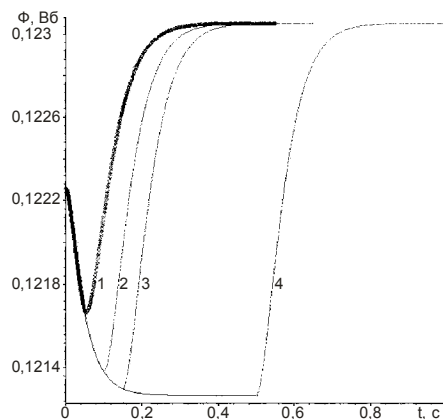


Рис. 10. Часові залежності зміни основного магнітного потоку ТЕД протягом всього режиму «відриву-доторкання» без 2-го етапу при різній тривалості горіння дуги: 1 – 0,05 с; 2 – 0,1 с; 3 – 0,15 с; 4 – 0,5 с

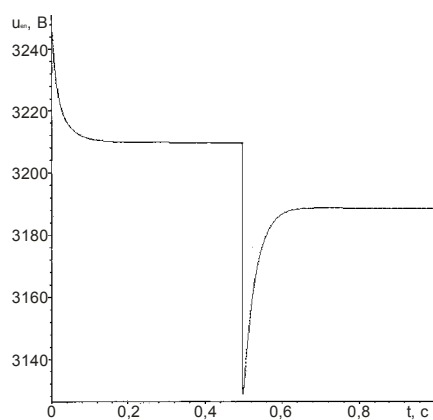


Рис. 11. Часова залежність зміни напруги на струмоприймачі електровоза в режимі «відриву-доторкання» без 2-го етапу і горінні дуги впродовж 0,5 с

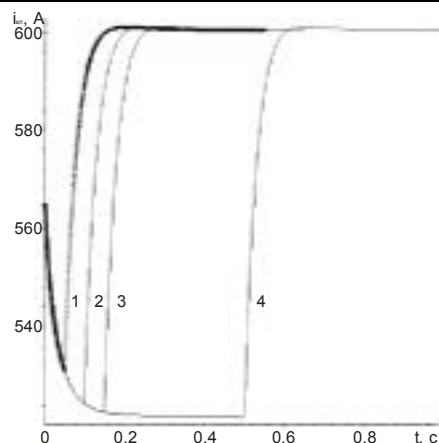


Рис. 12. Часові залежності зміни струму електровоза для умов рис. 10

Під час горіння дуги тривалістю до $\sim 0,2 \text{ с}$ основний магнітний потік, фідерні напруги і струми електровоза зменшуються за експоненціальним законом (рис. 10 – 12). При тривалості горіння дуги більше 0,2 с спостерігаються усталені значення вказаних величин, тобто у подальшому вони не зменшуються.

При відновленні металевого контакту струмоприймача з контактним проводом напруга на електровозі спочатку кидком зменшуються на 75 В, а потім також кидком збільшуються майже до початкових значень (рис. 11). Струми (рис. 12) також збільшуються сплеск, але їх значення не перевищують значень, які отримані в режимі розриву дуги тієї ж тривалості 0,5 с (рис. 6): наприклад, сплеск струму електровозу теж не перевищує 600 А.

Висновки. Наслідки аварійного режиму «зняття-відновлення» напруги, який відбувається в результаті процесу «відрив-доторкання» струмоприймача такі:

- поява сплесків тягового струму в силових колах локомотива і фідерних струмів ТП;
- небезпека перепалу контактного проводу відкритою електричною дугою між струмоприймачем і контактним проводом;
- електромагнітний вплив перехідних імпульсних напруг і струмів системи тяги на рейкові кола й кола сигналізації;
- зниження надійності контактної мережі.

Як показують результати моделювання, якщо нема напруги на струмоприймачі під

час другого етапу, відбувається повне, або часткове розмагнічення (залежать від терміну відсутності живлення) магнітної системи ТЕД. Це призводить до того, що в процесі відновлення живлення рухомого електровоза спостерігаються обов'язкові сплески струмів, і як наслідок, погіршення потенціальних умов на колекторі ТЕД.

Слід зауважити, що проведені розрахунки стосуються до схеми з серієсним з'єднанням тягових двигунів. Тому струм, який проходить через струмоприймач електровоза в номінальному режимі його руху, дорівнює номінальному струму ТЕД $i_{\text{ев С}} = i_{\text{я}}$.

У випадку серієсно-паралельного «СП» і паралельного «П» з'єднання струм електровоза відповідно у два і чотири рази збільшується, тобто $i_{\text{ев СП}} = 2 \cdot i_{\text{я}}$, $i_{\text{ев П}} = 4 \cdot i_{\text{я}}$. А це, в свою чергу, погіршить електромагнітний стан роботи як електровоза, так і системи електричної тяги. Такі випадки автором будуть розглянуті в подальших роботах, присвячених цим маловивченим аварійним процесам. Адже у найбільш використовуваному тяговому режимі на СП-з'єднанні тягових двигунів при виникненні режиму «зняття-відновлення» напруги шляхом «відриву-піднімання» струмоприймача можливе виникнення електричної дуги між струмоприймачем і контактним проводом з протіканням через неї великої кількості електроенергії (кількість ампер-секунд), що може спричинити перепал контактного проводу.

Перелік використаної літератури

1. Быков Е. И. Тяговые сети метрополитенов / Е. И. Быков, Б. В. Панин, В. Н. Пупынин. – М.: Транспорт, 1987. – 330 с.
2. Захарченко Д. Д. Подвижной состав электрических железных дорог / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М.: Транспорт, 1968 – 296 с.
3. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины / А. Б. Иоффе. – М.: Энергия, 1965. – 232 с.
4. Карниенко В. В. Критерии качества токосъема, определяющие ресурсосбережение / В. В. Карниенко, И. В. Доманский // За-

лізничний транспорт України. – 2010. – № 5. – С. 18–21.

5. Карниенко В. В. Эксплуатационные показатели и надежность контактных сетей переменного тока железных дорог Украины / В. В. Карниенко, И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 4. – С. 22 – 27.

6. Косарев Б. И. Расчет первичных параметров тяговой сети в протяжённых тоннелях / Б. И. Косарев, Г. М. Косолапов, А. И. Кушнир // Вестник ВНИИЖТа. – 1982. – № 1 – С. 15 – 18.

7. Костин Н. А. Стохастические переходные электромагнитные процессы в силовых цепях электровозов при резком изменении напряжения на токоприёмнике / Н. А. Костин, Т. Н. Мищенко, О. И. Гилевич // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 4. – С. 73 – 78.

8. Kostin N., (2005), Stochastic transient electromagnetic processes in power circuits of locomotives at a sharp change of voltage on a voltage on a current collector / *Seventh International Conference "Modern Electric Traction in integrated XXIst Century Europe"*, Poland, Warsaw, pp. 227 – 232.

9. Лозановский А. Л. Исследование токовых нестационарных режимов в силовых цепях электровозов методом физического моделирования: автореф. диссертация кандидата технических наук / А. Л. Лозановский. – М.: ВНИИЖТ, 1963. – 20 с.

10. Михаліченко П. Е. Вплив режиму короткого замикання в тяговій мережі постійного струму на перехідні електромагнітні процеси в електрорухомому складі / П. Е. Михаліченко, Т. М. Міщенко, М.О. Костін // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 4. – С. 63 – 66.

11. Михаліченко П. Є. Вплив пасивних фільтрів на електромагнітний стан в режимі короткого замикання в системі тягового електропостачання постійного струму / П. Є. Михаліченко // Технічна електродинаміка. – Тематич. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 2 – С. 195 – 200.

12. Рунов Ю.А. Исследование электромагнитных переходных процессов в тяговых двигателях электроподвижного состава / Ю.

А. Рунов // Труды ЦНИИ МПС. Повышение надёжности и совершенствование ремонта электровоза.–1974. – Вып. 516. – С. 79 – 92.

13. Сердинов С. М. Повышение надёжности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог / С. М. Сердинов.– М. : Транспорт, 1985. – 301 с.

Отримано 20.02.2012

References

1. Bikov E.I., Panin B.V., Pupylin V. N., (1987), Tractive networks underground, Moscow, *Transport*. – 330 p. [in Russian].

2. Zaharchenko D.D., Rotanov N.A., Gorchakov E.V., Shlyahot P.N., (1968), Rolling stock of the electric railways, Moscow, *Transport*. – 296 p. [in Russian].

3. Ioffe A.B., (1965). Tractive electric machines, Moscow, *Energy*. – 232 p. [in Russian].

4. Karnienko V.V., Domanskiy I.V., (2010), Criteria quality current pick-off, defining resource preservation / *Sci-Tech. magazine "Railways transport of the Ukraine"*. – No. 5. – Kiev, pp. 18 – 21 [in Russian].

5. Karnienko V.V., Domanskiy I.V., (2009), Working factors and reliability of the contact networks of alternating current of the railways of the Ukraine/ *Sci-Tech. magazine "Railways transport of the Ukraine"*. – No. 4. – Kiev, pp. 22 – 27 [in Russian].

6. Kosarev B.I., Kosolapov G.M., Kushnir A.I., (1982), Calculation primary parameter to tractive network in a long subway/ *Sci-Tech. magazine "Herald VNIIZHTA"*, No. 1, Moscow, pp. 15 – 18 [in Russian].

7. Kostin N.A., Mischenko T.N., Gilevich O.I., 2005. Stochastic connecting electromagnetic processes in power circuit electric locomotive when cutting change the voltage on trolley/ *Sci-Tech. magazine "Electrical Engineering & Electromechanics"*, No. 4, Kharkov, pp. 73 – 78 [in Russian].

8. Kostin N., (2005), Stochastic transient electromagnetic processes in power circuits of locomotives at a sharp change of voltage on a voltage on a current collector / *Seventh International Conference "Modern Electric Traction in integrated XXIst Century Europe"*, Poland, Warsaw, pp. 227 – 232 [in English].

9. Lozanovskiy A.L., (1963), Study current нестационарных mode in power circuit electric locomotive by method of physical modeling: avtoref. thesis of the candidate of the technical sciences, Moscow, *VNIIZHT*, 20 p. [in Russian].

8. Mihalichenko P.E., Mishienko T.N., Kostin N.O., (2010), The influence of the short circuit condition in the contact system on electromagnetic processes in electric train of direct current / *Sci-Tech. magazine "Electrical Engineering & Electromechanics"*. No. 4, Kharkov, pp. 63 – 66 [in Ukrainian].

9. Mihalichenko P.E., (2010), Influence passive filter on electromagnetic condition in mode of the short circuit in system of tractive supply of the direct current / *Sci-Tech. magazine "Technical electrodynamics. Power electronics & efficiency"*, Kharkov, pp. 195 – 200 [in Ukrainian].

10. Runov Yu.A., (1974), The Study of the electromagnetic connecting processes in tractive engine электроподвижного composition/ *Sci-Tech. magazine "Works CNII MPS. Increasing reliability and improvement of the repair electric locomotive"*, No. 516, Moscow, pp.79 – 92 [in Russian].

11. Serdinov S.M., (1985), Increasing to reliability device supply of the electrified railways, Moscow, *Transport*, 301 p. [in Russian].



Михаліченко
Павло Євгенович,
к.т.н, доцент каф. ТОЕ
ДНУЗТ імені акад. В. Лазаряна, т.:(056)-373-15-37,
E-mail: miha_pavel@mail.ru