

МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО РЕЖИМУ «ЗНЯТТЯ-ВІДНОВЛЕННЯ» НАПРУГИ НА СТРУМОПРИЙМАЧІ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Створено математичну модель електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму в режимі «відрив-піднімання» струмоприймача електрорухомої одиниці. Шляхом чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь електромагнітного стану, отримано перехідні процеси в силових колах тягових підстанцій та електровозу.

Ключові слова: струмоприймач, тяговий електродвигун, електровоз, аварійний режим електровозу.

Як показують дослідження [1, 2], контактні проводи є найбільш пошкоджуваними пристроями контактної мережі (КМ). Кількість їхніх відмов у рік на 100 км у системі електротяги постійного струму України становить 16 % (для порівняння, у Росії – 38 %). Однієї з головних причин цих відмов є перепал контактних проводів. При цьому до перепалу та віджигу проводів за допомогою виникаючої електричної дуги веде неякісне струмознімання, що обумовлює зокрема відрив (з наступним доторканням) струмоприймача від проводів.

Режим короткочасного зняття напруги на струмоприймачі електрорухомого складу (ЕРС) 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 автоматичного повторного ввімкнення (АПВ); при проїзді повітряних проміжків в місцях секціонування контактної мережі; при наявності ожеледі, тощо. Найчастіше при експлуатації зустрічається перший випадок, тобто «опускання-піднімання» струмоприймача під навантаженням; його загальна тривалість складає від декількох десятків секунд до 1,5...2,0 с. Процес «відрив-піднімання» струмоприймача обумовлює такі стадії (етапи) режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі (рис. 1, а): перша стадія – зняття напруги при наявності електричної дуги між струмоприймачем і контактним проводом (на початку відриву струмоприймача) (рис. 1, б); друга стадія – повне вимикання струмоприймача ЕРС від контактного проводу (тобто з моменту досягнення струмом ЕРС нуля) (рис. 1, в); третя стадія – відновлення напруги живлення (тобто з моменту доторкання струмоприймача до контактного проводу) (рис. 1, г).

На рис. 1 позначено: ШВ – блок швидкодіючого вимикача складається з розмагнічуючого витка, з параметрами $R_{рв}$ та $L_{рв}$ та індуктивного шунта – $R_{ш}$ та $L_{ш}$. Блок тягової підстанції (ТП) включає такі основні параметри: $E_{нс}$ – електрорушійна сила кремнієвого випрямляча тягової підстанції; $L_{тт}$ – індуктивність тягового трансформатора; $R_{тт}$ – еквівалентний внутрішній опір тягової

підстанції; $R_{зр}$ та $L_{зр}$ параметри згладжуючого реактора; $R_о$ та $L_о$ параметри відсасуючого фідера. Блок тягової мережі (ТМ) складається з контактної підвіски, параметри якої $R_к$ та $L_к$, а також рейок з параметрами – $R_р$ та $L_р$. Тяговий електропривод електровоза, складається з двох секцій, для серієс-паралельного (СП) з'єднання тягових електричних двигунів (ТЕД) секції з'єднані паралельно між собою, а одна група складається з двох послідовно з'єднаних ТЕД. Напруга на струмоприймачі електровозу позначено $u_{св}(t)$, а струм електровозу згідно першого закону Кірхгофа визначається за формулою $i_{св} = i_{я1} + i_{я2}$. Параметри основних елементів тягових двигунів описано нижче.

Дослідження режиму «зняття-відновлення» напруги, який відбувається в результаті процесу «відрив-доторкання» струмоприймача важливо, виходячи із таких його наслідків: появою кидків тягового струму в силових колах ЕРС і фідерних струмів ТП; небезпекою перепалу контактного проводу відкритою електричною дугою між струмоприймачем і контактним проводом; електромагнітним впливом перехідних імпульсних напруг і струмів системи тяги на рейкові кола й кола сигналізації; зниженням надійності контактної мережі.

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. Однак це питання мало досліджене навіть для ділянок не швидкісного руху. По цій проблемі треба відзначити лише роботи [3, 4], однак в них проаналізовані процеси лише в ЕРС і без врахування системи тягового електропостачання.

Зазначимо, що в еквівалентній схемі рис. 1 і в моделі електрична дуга врахована спадом напруги на резисторі $R_{дг}$. Зрозуміло, що, строго кажучи, вплив дуги треба було б враховувати шляхом використання її вольт-амперної характеристики [5]. Але, згідно з експериментальними даними [5, 6], падіння напруги в дузі для високовольтних кіл (у тому числі й в ЕРС) складає 2–3 % напруги живлення. Тобто, $R_{дг}$ є «малим параметром» [7] і тому дуга в моделі врахована як лінійний резистор з опором $R_{дг} = 0,22$ Ом [3].

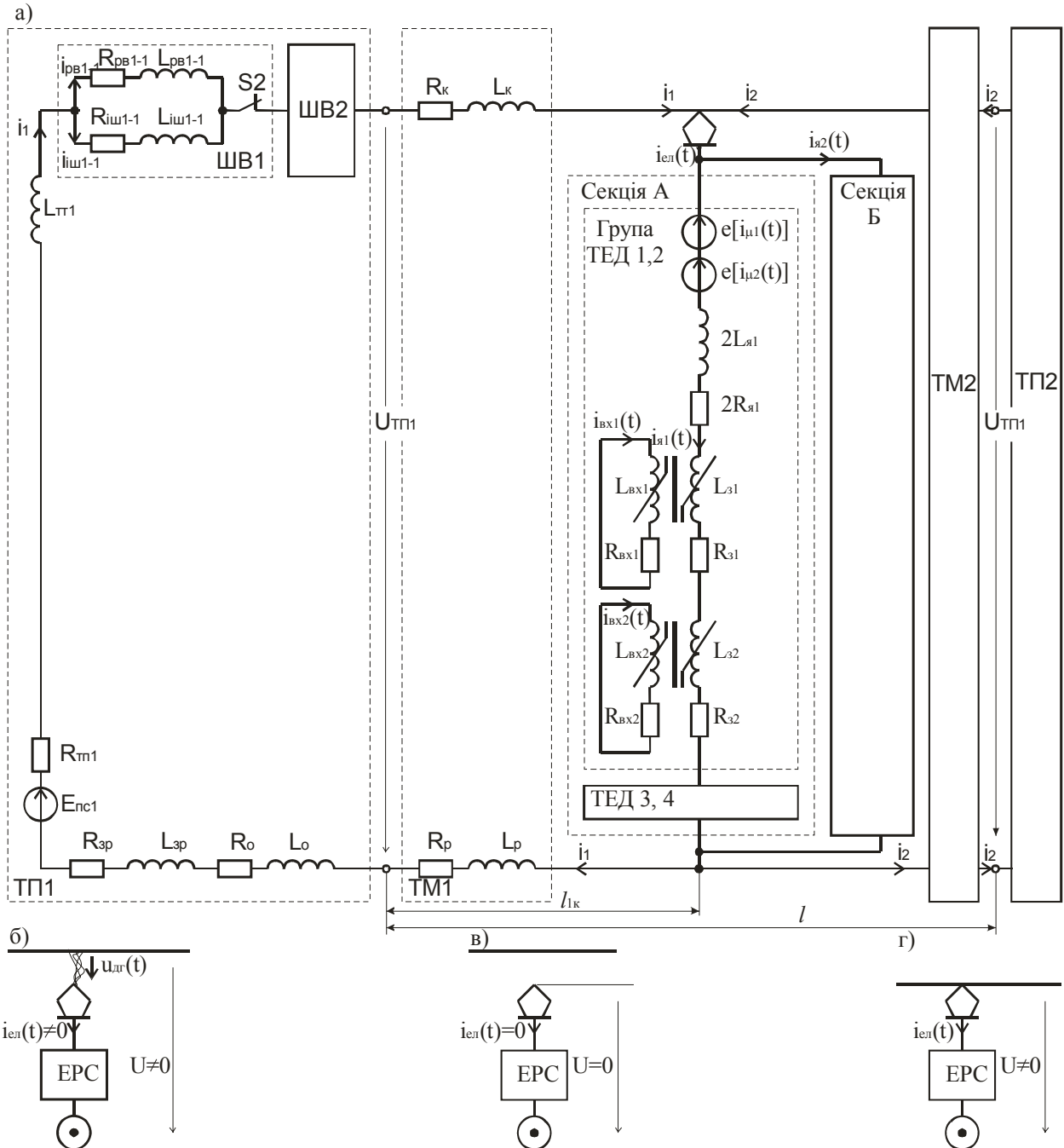


Рис. 1. Схема заміщення системи електричної тяги постійного струму, на періоді процесу «відрив-торкання» струмоприймача

Врахування вихрових струмів $i_{вxp}$, що виникають в остові та в осерді головних полюсів тягових двигунів, здійснено еквівалентним короткозамкненим контуром (з кількістю витків $w_{вxp}$), який індуктивно (через основний потік $\Phi(t)$) зв'язаний з обмоткою головних полюсів аналогічно обмоткам однофазного трансформатора [8].

Активний опір короткозамкненого контуру, еквівалентного вихровим струмам $R_{вxp}$ є змінною величиною, що залежить від часу протікання перехідного процесу.

Розроблена нижче математична модель є узагальненою, тобто чинною для всіх зазначених у статті і на рис. 1

етапів режиму «зняття-відновлення» напруги; для кожного етапу вона дещо змінюється. Розрахуємо і проаналізуємо електромагнітні процеси для кожного етапу зазначеного режиму.

У другому етапі повного зняття напруги (після загасання дуги) (рис. 1, ϵ), і після зникнення струму ($i_{ел} = 0$, $R_{дг} \rightarrow \infty$, $U_{ел} = 0$) якраз електромагнітна енергія, що заощаджена в електромагнітному полі індуктивних елементів ТЕД, визначає зміну $\Phi(t)$ і інших величин. При цьому у режимі повного поля основний вплив на характер зміни основного магнітного потоку здійснює магнітний потік

$\Phi_{\text{вxp}}$, створений вихровими струмами. Зокрема, в період цього етапу в інтервалі часу повного зняття напруги $t_{\text{зн}} \leq 40 \dots 50$ мс внаслідок магнітного поверхневого ефекту й тим самим витискання магнітного потоку активний опір $R_{\text{вxp}}$ контуру вихрових струмів великий (рис. 3) (бо $R_{\text{вxp}} \approx kB_y$, де B_y – усталене початкове значення індукції [9]). Тому значення $i_{\text{вxp}}$ ще менші, ніж на етапі 1 і створений ними магнітний потік $\Phi_{\text{вxp}}$ теж малий. Його протидія зміні основного $\Phi(t)$ практично відсутня і тому цей $\Phi(t)$ згасає за рахунок, в основному, зменшення його в поверхневих шарах магнітопроводу та потоків розсіяння. При цьому характерні спадаючих кривих $\Phi(t)$ практично співпадають при різних $I_{\text{поч}}$. До того ж різниця значень Φ в кінці стадії при різних $I_{\text{поч}}$ не перевищує 0,005 Вб.

ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ

Серійно-паралельне з'єднання ТЕД є найчастішим і нерідко найтривалішим режимом роботи електровозів постійного струму при веденні ними вантажних поїздів. Виходячи з цього і були виконані дослідження і розрахунки електромагнітних процесів режиму «зняття-відновлення» напруги при СП-з'єднанні ТЕД електровозів ДЕ1.

Електрична схема заміщення ЕРС для розглядуваного режиму представлена на рис. 1, а). Математична модель являє собою систему рівнянь:

$$\begin{aligned} & (R_{\text{тп1}} + R_{\text{зп1}} + R_{\text{к1}} + R_{\text{п1}} + R_{\text{о1}}) i_1 + \\ & (L_{\text{тп1}} + L_{\text{зп1}} + L_{\text{к1}} + L_{\text{п1}} + L_{\text{о1}}) \frac{di_1}{dt} + R_{\text{им1}_1} \cdot i_{\text{им1}_1} + \\ & + L_{\text{им1}_1} \frac{di_{\text{им1}_1}}{dt} + R_{\text{им1}_2} \cdot i_{\text{им1}_2} + L_{\text{им1}_2} \frac{di_{\text{им1}_2}}{dt} + \\ & + R_{\text{др}} \cdot (i_{\text{я1}} + i_{\text{я2}}) + 4R_{\text{я}} \cdot i_{\text{я1}} + 4L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я1}}}{dt} + 2p\sigma_3 w_3 \times \\ & \times \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \dots \Phi_4) = E_{\text{пс1}} - C\omega(\Phi_1 + \dots \Phi_4); \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 4R_{\text{я}} \cdot i_{\text{я1}} + 4L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я1}}}{dt} + 2p\sigma_3 w_3 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \dots \Phi_4) - \\ & - 4R_{\text{я}} \cdot i_{\text{я2}} - 4L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я2}}}{dt} - 2p\sigma_3 w_3 \frac{d}{dt} (\Phi_5 + \dots \Phi_8) - \\ & = -C\omega(\Phi_1 + \dots \Phi_4) + C\omega(\Phi_5 + \dots \Phi_8) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (R_{\text{тп2}} + R_{\text{зп2}} + R_{\text{к2}} + R_{\text{п2}} + R_{\text{о2}}) i_2 + \\ & (L_{\text{тп2}} + L_{\text{зп2}} + L_{\text{к2}} + L_{\text{п2}} + L_{\text{о2}}) \frac{di_2}{dt} + R_{\text{им2}_1} \cdot i_{\text{им2}_1} + \\ & + L_{\text{им2}_1} \frac{di_{\text{им2}_1}}{dt} + R_{\text{им2}_2} \cdot i_{\text{им2}_2} + L_{\text{им2}_2} \frac{di_{\text{им2}_2}}{dt} + \\ & \times \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \dots \Phi_4) = E_{\text{пс2}} - C\omega(\Phi_1 + \dots \Phi_4); \quad (3) \end{aligned}$$

$$i_{\text{я1}} + i_{\text{я2}} - i_1 - i_2 = 0; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 - i_{\text{рв1}_1} - i_{\text{им1}_1} &= 0; \\ i_1 - i_{\text{рв1}_2} - i_{\text{им1}_2} &= 0; \\ i_2 - i_{\text{рв2}_1} - i_{\text{им2}_1} &= 0; \\ i_2 - i_{\text{рв2}_2} - i_{\text{им2}_2} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{вх1}} \cdot i_{\text{вх1}} + \sigma_3 w_3 \frac{d\Phi_1}{dt} &= 0; \\ \dots & \\ R_{\text{вх8}} \cdot i_{\text{вх8}} + \sigma_3 w_3 \frac{d\Phi_8}{dt} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{я1}} - i_{\mu 1} - i_{\text{вх1}} &= 0; \\ \dots & \\ i_{\text{я8}} - i_{\mu 8} - i_{\text{вх8}} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{рв1}_1} \cdot i_{\text{рв1}_1} + L_{\text{рв1}_1} \frac{di_{\text{рв1}_1}}{dt} - \\ - R_{\text{им1}_1} \cdot i_{\text{им1}_1} - L_{\text{им1}_1} \frac{di_{\text{им1}_1}}{dt} &= 0; \\ R_{\text{рв1}_2} \cdot i_{\text{рв1}_2} + L_{\text{рв1}_2} \frac{di_{\text{рв1}_2}}{dt} - \\ - R_{\text{им1}_2} \cdot i_{\text{им1}_2} - L_{\text{им1}_2} \frac{di_{\text{им1}_2}}{dt} &= 0; \\ R_{\text{рв2}_1} \cdot i_{\text{рв2}_1} + L_{\text{рв2}_1} \frac{di_{\text{рв2}_1}}{dt} - \\ - R_{\text{им2}_1} \cdot i_{\text{им2}_1} - L_{\text{им2}_1} \frac{di_{\text{им2}_1}}{dt} &= 0; \\ R_{\text{рв2}_2} \cdot i_{\text{рв2}_2} + L_{\text{рв2}_2} \frac{di_{\text{рв2}_2}}{dt} - \\ - R_{\text{им2}_2} \cdot i_{\text{им2}_2} - L_{\text{им2}_2} \frac{di_{\text{им2}_2}}{dt} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{\mu 1} &= f(\Phi_1(t)); \\ \dots & \\ i_{\mu 8} &= f(\Phi_8(t)); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де w_3 , R_3 та L_3 – кількість витків, активний опір та індуктивність обмотки збудження; $R_{\text{ш}}$ та $L_{\text{ш}}$ – активний опір та індуктивність шунтувальної вітки (з індуктивним шунтом); $i_{\text{я}}$ – струм в обмотці якоря, він же в обмотці збудження; i_{μ} – струм намагнічення тягового двигуна; $w_{\text{вxp}}$, $L_{\text{вxp}}$ – кількість витків та індуктивність короткозамкнутого контури, еквівалентного вихровим струмам; $\Phi_{\text{с3}}$ та $\Phi_{\text{свxp}}$ –

магнітні потоки розсіяння відповідно обмотки збудження і короткозамкненого контури. В системі рівняння (7) називаються рівняннями зв'язку, що описує взаємозв'язок між струмом збудження і вихровим струмом в суцільному остові ТЕД, рівняння (9) описують криву намагнічення ТЕД.

Розв'язання системи рівнянь (1)–(9) виконувалося чисельним інтегруванням методом Адамса, за допомогою ліцензованого програмного забезпечення MAPLE. Цей метод використовується для аналізу жорстких диференціальних рівнянь [9].

В розглядуваному режимі СП-з'єднання перехідні процеси в силових колах ЕРС, отже і в усій системі електричної тяги, в більшому ступеню визначаються процесами, які протікають у магнітопроводі ТЕД і, насамперед, зміною основного магнітного потоку (рис. 2, а, при різній тривалості другого етапу: лінія 1 – термін тривалості 0,5 с; лінія 2 – 1,0 с; 3 – 1,5 с; 4 – другий етап відсутній) та вихрових струмів (рис. 2, б).

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ У РЕЖИМІ ПОВНОГО ЗНЯТТЯ НАПРУГИ

На етапі 1 (рис. 1, б) – етапі горіння дуги тривалістю 40 мс, у режимі повного поля напруга на електровозі $u_{\text{ел}}(t)$ зменшується на 50...70 В (рис. 2, в), сила струму в паралельних вітках силового тягового кола електровоза (тобто, в якорях (рис. 2, з)) знижується на 25...40 А, а струм в електровозі $i_{\text{ел}}(t)$ зменшується на 50...80 А. Тобто, при такій тривалості горіння електричної дуги і напруга і струм в ЕРС зменшується незначно. Тому, і магнітний потік $\Phi(t)$ (рис. 2, а) змінюється незначно, від 1,04 до 1,0 Вб. Оскільки, як відомо [10, 11], вихрові струми $i_{\text{вхр}} = \kappa \Phi(t) \frac{d\Phi}{dt}$ ($\frac{d\Phi}{dt}$ і $\Phi(t)$ малі за значеннями) практично дорівнюють нулю (рис. 2, б). Також мало змінюються фідерні струми і вихідні напруги на обох тягових підстанціях (рис. 2, рис. 3).

В початковий період етапу 2 (рис. 1, в) (після розриву дуги й тим самим зникнення струму електровоза, $i_{\text{ел}} = 0$) в інтервалі $t_{\text{зн}} = 40...50$ мс, внаслідок ще великих значень $\Phi(t)$, а також різкого його зниження (велика від'ємна похідна $\frac{d\Phi}{dt}$) (рис. 2, а), вихрові струми зростають кидком до ~200 А (рис. 2, б). Створений ними магнітний потік $\Phi_{\text{вхр}}$ обумовлює значну протидію основному $\Phi(t)$, що й визначає більш повільне загасання $\Phi(t)$ у другій половині (чи наприкінці) етапу 2. Далі, менша $\frac{d\Phi}{dt}$ і менші значення $\Phi(t)$ зменшують вихрову е. р. с. та вихрові струми, які поступово експоненціально загасають.

Одночасно, в термін часу етапу 2 (рис. 1, в) струм електровоза (рис. 2, д) і напруга на струмоприймачі (рис. 2, в) після розриву дуги різко спадають до нуля. У контурі, утвореному двома вітками ТЕД, струм зменшується експоненціально, досягаючи нуля через 1,7...2,0 с (рис. 2, з). В той же час, напруги ТП1 і ТП2, після кидків до своїх початкових значень ($U_1 = 3,3$ кВ, а $U_2 = 3,4$ кВ), експоненціально змінюються, відповідно, до 3,4 і 3,3 кВ (рис. 3, при тривалості 2-ого етапу 1,0 с). Внаслідок різниці фідерних напруг ($U_1 - U_2 = 0,1$ кВ) по тяговій мережі протікає зрівняльний струм, значення якого залежить від терміну часу зняття напруги $t_{\text{зн}}$ і при $t_{\text{зн}} = 1,5$ с він складає приблизно 70 А (рис. 2, е і є).

Найбільш «відповідальним» з точки зору протікаючих по СЕТ процесів є етап 3, етап відновлення напруги (рис. 1, з), коли, після поновлення металевого контакту між струмоприймачем і контактним проводом, напруга на ЕРС кидком зростає до $U_{\text{ном}} = 3,0$ кВ (незалежно від $t_{\text{зн}}$) (рис. 2, в). В той же час, основний магнітний потік $\Phi(t)$, внаслідок стримуючої дії $\Phi_{\text{вхр}}$, створеного великими $i_{\text{вхр}}$ (рис. 2, б), починає зростати, але не кидком (як напруга на струмоприймачі), а повільно. Як наслідок, струм якорів ТЕД в паралельних вітках (рис. 2, з) і всього електровозу (рис. 2, д) зростають кидком, максимальні значення яких залежать від $t_{\text{зн}}$. Зокрема, струм електровоза $i_{\text{ел}}$ складає (рис. 2, д): 2650 А при часі зняття напруги – $t_{\text{зн}} = 1,5$ с, 3200 А при 1,0 с і 3450 А при 1,5 с. Тобто, швидкодіючий вимикач (ШВ) електровоза спрацює, оскільки його уставка дорівнює 2500 А, однак коловий вогонь на якорях ТЕД спостерігатися не буде, оскільки для зазначених $t_{\text{зн}}$ струм якорів (в паралельних вітках будуть (рис. 2, з) відповідно: 720, 1320, 1610, 1720 А). Струми ТП (рис. 2, е і є) не перевищують 1840 А навіть при $t_{\text{зн}} = 1,5$ с і тому ШВ тягових підстанцій не спрацьовують.

Максимальне значення кидків струмів ЕРС і ТП залежить від відстані / розташування електровоза до певної ТП (рис. 4: 1 – відстань 2 км; 2 – 4 км; 3 – 6 км; 4 – 8 км; 5 – 10 км): чим ближче ЕРС знаходиться до певної ТП, тим більший за амплітудою кидок струму в тяговому колі електровоза і фідерного струму цієї ТП.

У найбільш використовуваному тяговому режимі ЕРС на серіє-паралельному з'єднанні тягових двигунів при виникненні режиму «зняття-відновлення» напруги шляхом «відриву-доторкання» струмоприймача можливе виникнення електричної дуги між струмоприймачем і контактним проводом з протіканням через неї від 600 до 875 А·с, що може спричинити перепад контактного проводу (при одночасному спрацюванні ШВ ЕРС, оскільки його уставка дорівнює 2500 А, а кидки струму електровоза досягають 3000 А і більше).

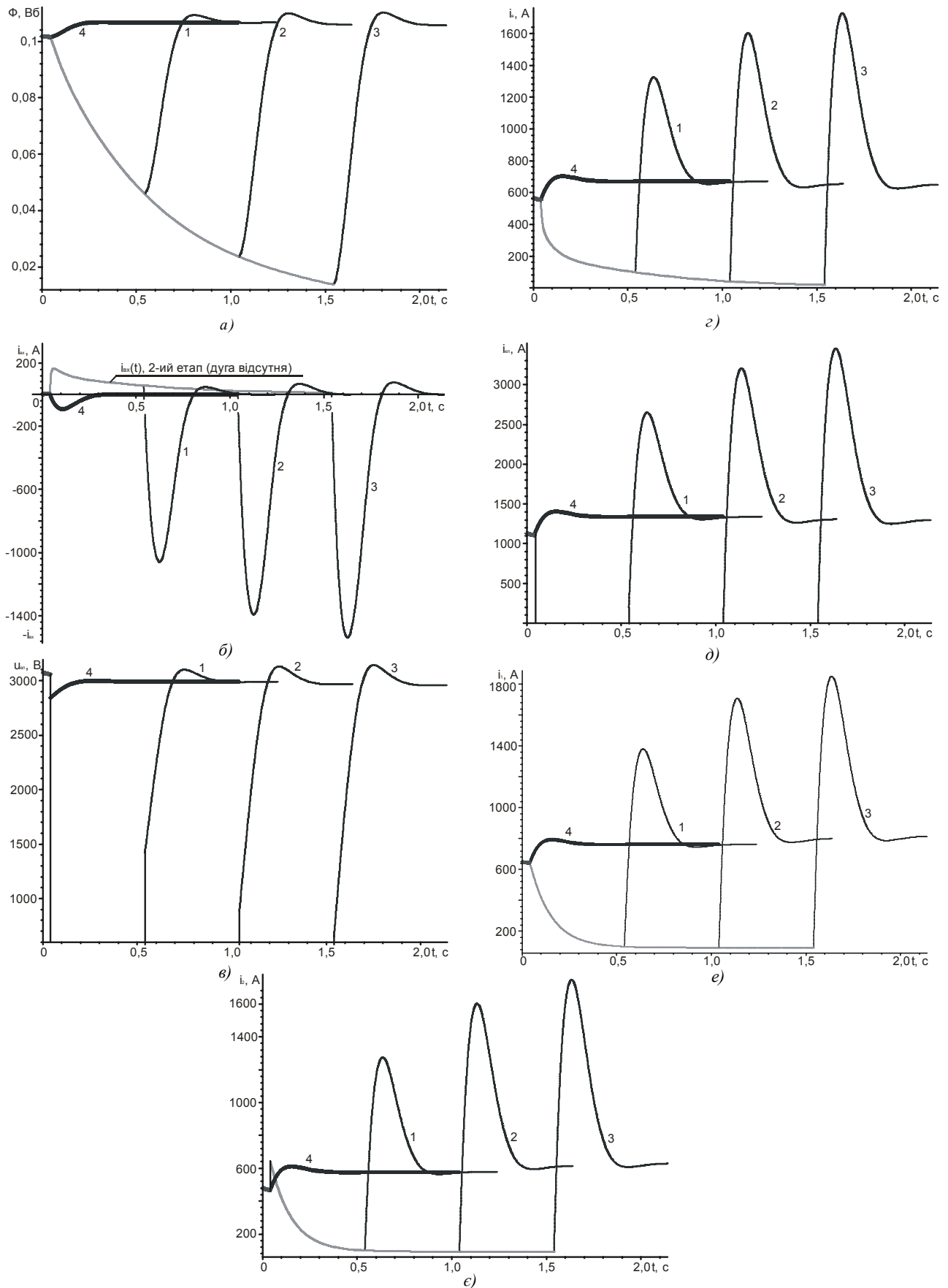


Рис. 2. Часові залежності електричних величин на повному періоді процесу «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі, при різних термінах тривалості другого етапу t_{II} (с): лінія1– 0,5 с; 2–1,0 с; 3–1,5 с; 4 – другий етап відсутній

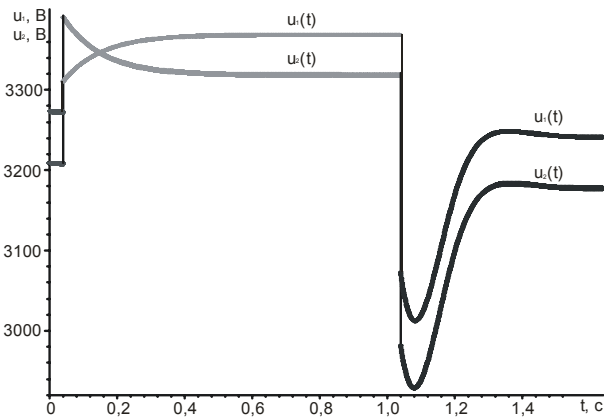


Рис. 3. Часові залежності напруг на затискачах ТП1 і ТП2 на повному періоді процесу «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі, при тривалості другого етапу $t_{II} = 1,0$ с

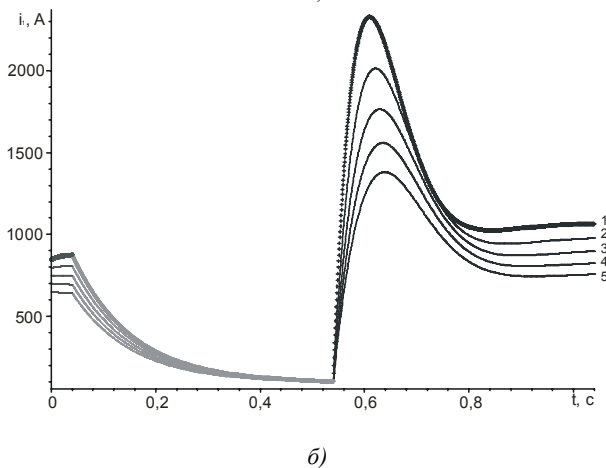
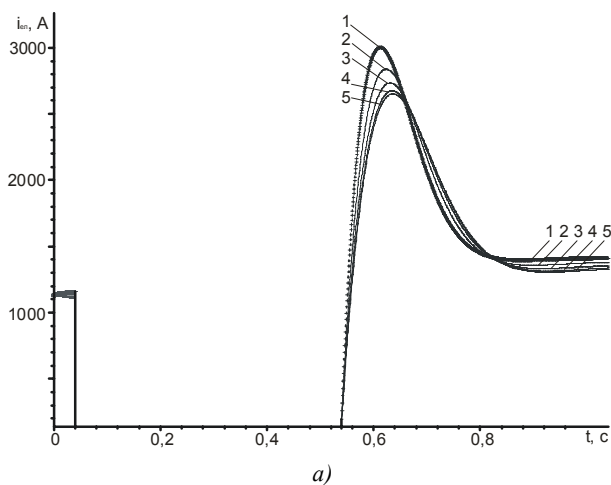


Рис. 4. Часові залежності перехідних струмів ЕРС і ТП1 на повному періоді процесу «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі, при різній відстані електровоза до ТП1 l : лінія 1–2 км; 2–4 км; 3–6 км; 4–8 км; 5–10 км

ВИСНОВКИ

Для розглядуваного аварійного режиму СП – з’єднання тягових двигунів є дуже небезпечним, що пояснюється наступним.

1. Магнітний потік суттєво залежить від терміну часу зняття напруги і за 1,5...2,0 с досягає майже нульового значення.

2. При спаді магнітного потоку на 0,1 Вб амплітуди кидків струму фідерів в діапазоні $t_{zn} = 0,5 \dots 1,5$ мс складають 1400...1840 А (швидкодіючі вимикачі струму тягових підстанцій не спрацьовують), а електровоза відповідно 2650...3450 А. Оскільки уставки швидкодіючих вимикачів електровозів 2500 А, то він вимикається, хоча і коловий вогонь на колекторі не виникає, оскільки струм якоря не перевищує 1720 А, тобто менше $4 \cdot I_{ном}$, при якому виникає вогонь.

3. Чим ближче електрорухомий склад знаходиться до тягової підстанції, тим більші кидки струмів електровоза, і фідера: при $l = 2$ км кидок струму електровоза ДЕ1 складає 3000 А (якоря 1480 А), а фідера ближньої тягової підстанції – 2300 А.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карниенко, В. В. Эксплуатационные показатели и надежность контактных сетей переменного тока железных дорог Украины [Текст] / В. В. Карниенко, И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 4. – С. 22–27.
2. Карниенко, В. В. Критерии качества токосяема, определяющие ресурсосбережение [Текст] / В. В. Карниенко, И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 5. – С. 18–21.
3. Костин, Н. А. Стохастические переходные электромагнитные процессы в силовых цепях электровозов при резком изменении напряжения на токоприемнике [Текст] / Н. А. Костин, Т. Н. Мищенко, О. И. Гилевич // Електротехніка і Електромеханіка. – 2005. – № 4. – С. 73–78.
4. Kostin, N. 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, 2005. – P. 227–232.
5. Лозановский, А. Л. Исследование токовых нестационарных режимов в силовых цепях электровозов методом физического моделирования: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / А. Л. Лозановский. – М.: ВНИИЖТ, 1963. – 20 с.
6. Быков, Е. И. Тяговые сети метрополитенов [Текст] / Е. И. Быков, Б. В. Панин, В. Н. Пупынин. – М.: Транспорт, 1987. – 330 с.
7. Косарев, Б. И. Расчет первичных параметров тяговой сети в протяженных тоннелях [Текст] / Б. И. Косарев, Г. М. Косолапов, А. И. Кушнир // Вестник ВНИИЖТа. – 1982. – № 1. – С. 15–18.
8. Рунов, Ю. А. Исследование электромагнитных переходных процессов в тяговых двигателях электроподвижного состава [Текст] / Ю. А. Рунов // Труды ЦНИИ МПС. Повышение надежности и совершенствование ремонта электровоза. – 1974. – Вып. 516. – С. 79–92.

9. Демирчан, К. С. Теоретические основы электротехники [Текст] / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – С. Пб. : Питер, 2004. – Том 2. – 576 с.
10. Иоффе, А. Б. Тяговые электрические машины [Текст] / А. Б. Иоффе. – М. : Энергия, 1965. – 232 с.
11. Подвижной состав электрических железных дорог [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М. : Транспорт, 1968. – 296 с.

*Стаття надійшла до редакції 13.09.2012.
Після доробки 03.10.2012.*

П. Е. Михаличенко

Математическое моделирование «снятия-восстановления» напряжения на токоприемнике электровозов постоянного тока

Создана математическая модель электромагнитных процессов в системе электрической тяги постоянного тока в режим «отрыва-касание» токоприемника электроподвижной единицы. Путем интегрирования системы дифференциальных уравнений электромагнитного состояния, получены переходные процессы в силовых цепях тяговых подстанций и электровоза.

Ключевые слова: токоприемник, тяговый электродвигатель, электровоз.

P. Mihalichenko

Mathematical design of «removal-recovery» of voltage on current collector of direct current electric locomotives

The mathematical model of electromagnetic processes in the system of electric traction of direct current in the mode of «break-off-touch» current collector of electro-mobile unit is created. By integration of the system of differential equalizations of the electromagnetic state, dependences of transitional electric sizes in the power circuits of hauling substations and electric locomotive are obtained.

Key words: current collector, hauling electric motor.