

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ АВАРІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

2. КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ З ЕЛЕКТРОРУХОМИМ СКЛАДОМ

У статті викладено математичну модель системи тягового електропостачання з навантаженням у режимі короткого замикання, а також результати розрахунків цього аварійного процесу. Визначено перехідні величини та характер їх зміни, які можна використовувати для визначення аварійних режимів.

В статье изложена математическая модель системы тягового электроснабжения с нагрузкой в режиме короткого замыкания, а также результаты расчетов этого аварийного процесса. Определены переходные величины, а также характер их изменения, которые можно использовать для определения аварийных режимов.

The article deals with the description of mathematical model of the system of traction electric power supply with load in the short circuit condition as well as the calculation results of this emergency process. The transition values as well as the character of their change, which can be used for detection of emergency processes, have been determined.

У роботі [1] автори почали досліджувати системи електричної тяги (СЕТ) 3,3 кВ постійного струму в аварійних режимах. Вперше було розроблено математичну модель СЕТ для одного з найрозповсюджених аварійних режимів системи: коротке замикання (КЗ) без електрорухомого складу (ЕРС). Ця модель ґрунтувалася на законах класичної електротехніки та описувалася рівняннями електромагнітного стану. Слід зазначити, що автору невідомі подібні роботи інших науковців в області електрифікації та електропостачання залізничного транспорту. Крім цього, зацікавленість цією проблемою викликана відсутністю публікацій, присвячених аварійним режимам в такій складній динамічній системі, відсутністю аналізу роботи існуючих систем захисту (СЗ) фідерів 3,3 кВ тягових підстанцій (ТП) постійного струму, а також впровадження сучасних СЗ, оснований на мікропроцесорній та мікроконтролерній базі.

Результатом другорядного ставлення до цієї важливої, з точки зору авторів, проблеми стало те, що функції захисту системи «тягова підстанція (ТП) – тягова мережа (ТМ) – електрорухомий склад (ЕРС)» до сьогодення виконують швидкодіючі вимикачі (ШВ) серій АБ 2/4, ВАБ-28, в кращому разі ВАБ-43. Лише до недавнього часу на українських залізницях почали впроваджувати ВАБ-49, які в деяких близьких закордонних країнах уже вважаються морально застарілими.

Актуальність викладеної проблеми підтверджують результати моніторингу роботи існуючих СЗ фідерів 3,3 кВ тягової мережі постійного струму стосовно основних вимог до надійності їх роботи, що проведені автором на шести дистанціях електропостачання (ЕЧ1-Нікополь, ЕЧ2-Нижньодніпровськ-Вузол, ЕЧ3-Верхівцево, ЕЧ4-Запоріжжя, ЕЧ6-Кривий-Ріг, ЕЧ7-Павлоград) ДП «Придніпровська залізниця». Дійсно з кругової діаграми рис. 1 видно, що значну частку вимикань ШВ (~ 31 %) спричиняють пошкодження електрорухомого складу і 30 % – це невизначені причини. Останні спрацьовування в своїй більшості неселективні та нез'ясовані взагалі внаслідок недостатньої кількості інформації про режими роботи СЕТ.

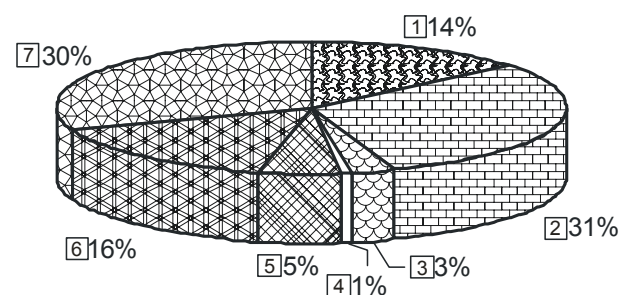


Рис. 1. Частки основних причин вимикань ШВ тягових підстанцій:

- 1 – перенавантаження; 2 – несправність ЕРС;
- 3 – короткі замикання; 4 – земляний захист;
- 5 – хибне спрацювання; 6 – гроза;
- 7 – причини невизначені

Слід зазначити, що за останні п'ять років (2001-2006 рр.), по яких було проведено моніторинг, спостерігається явна тенденція до зростання кількості неселективних та невизначених вимикань ШВ, що призводить до зменшення надійності роботи існуючих СЗ фідерів 3,3 кВ постійного струму. Враховуючи вищезазначене, автор вважає викладену проблему вельми актуальною і перспективною.

В даній роботі, яка є логічним продовженням попередньої, розглянемо більш складні випадки: КЗ в СЕТ з навантаженням. Прийняті в [1] припущення, які є невід'ємною частиною математичного моделювання будь-якої за складністю системи, є чинними і в цій роботі. СЕТ, що розглядається, представлена на рис. 2. На цьому рис.: позначенням (1) визначено режим КЗ поза електровозом; позначенням (2) – на

електровозі; ТП1, ТП2 – тягові підстанції; ШВ1, ШВ2 – швидкодіючі вимикачі тягових підстанцій, які діють на певній фідерній зоні; ЕРС – електровоз, що рухається (навантаження); l – довжина фідерної зони; $x_{ел}$ – координата електровоза на фідерній зоні; $x_{кз}$ – координата місця КЗ у разі випадку (2), $x_{ел} = x_{кз}$.

Розглянемо режим (1): КЗ в СЕТ поза електровозом, що рухається. Електровоз знаходиться в середині фідерної зони, тобто $x_{ел} = \frac{l}{2}$. Точка

КЗ знаходиться в координаті $x_{кз} = \frac{x_{ел}}{2}$. Схема замінення для цього випадку представлена на рис. 3.

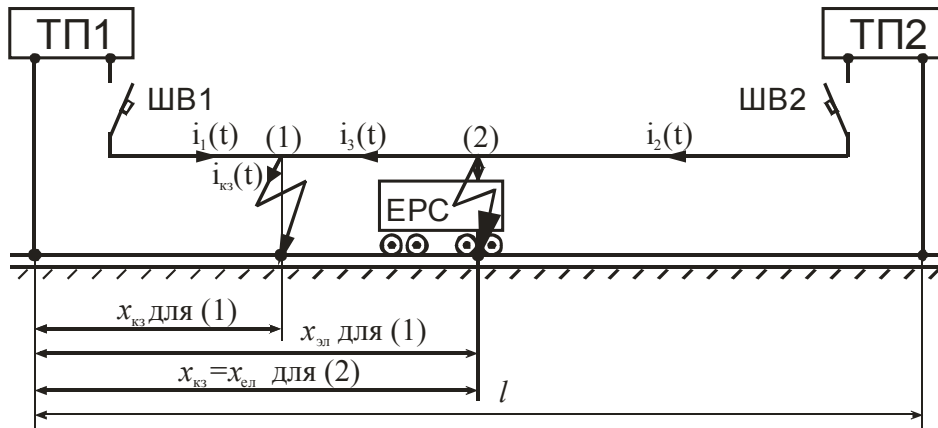


Рис. 2

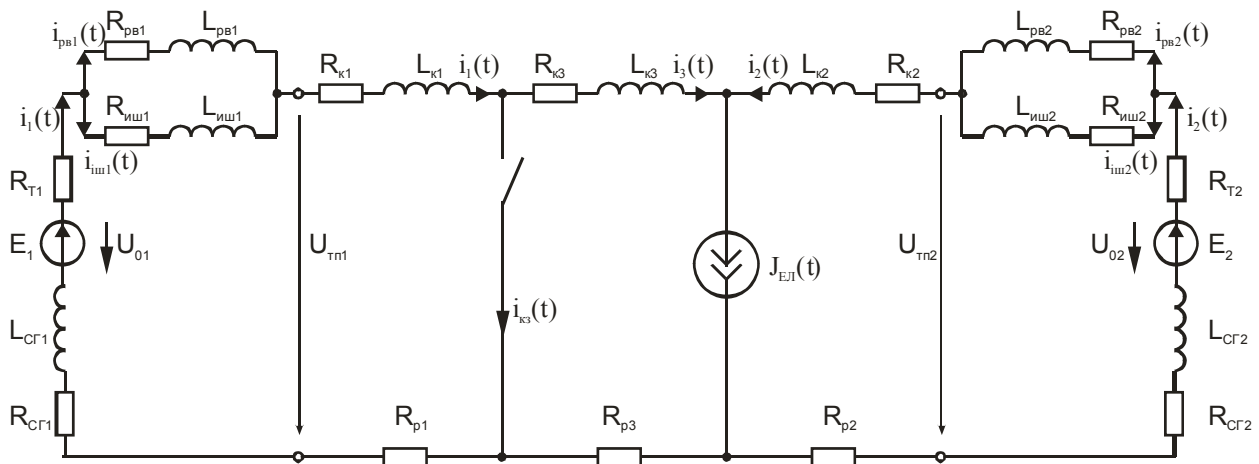


Рис. 3

На схемі рис. 3:

$U_{01}, U_{02} = 3450$ В – напруга х.х. ТП;

$U_{ТП1}, U_{ТП2}$ – напруга на затискачах ТП;

$R_{Т1}, R_{Т2} = 0,14$ Ом [2] – внутрішній активний опір ТП;

$R_{PB1} = R_{PB2} = R_{PB} = 30 \cdot 10^{-6}$ Ом, $L_{PB1} = L_{PB2} =$
 $= L_{PB} = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R_{III1}, R_{III2} = R_{III} =$
 $= 5,65 \cdot 10^{-6}$ Ом, $L_{III1} = L_{III2} = L_{III} = 2,54 \cdot 10^{-6}$ Гн

– параметри схем заміщення ШВ типу ВАБ-43 фідерів ТП [2, 3];

$R_{CF1} = R_{CF2} = R_{CF} = 9 \cdot 10^{-3}$ Ом, $L_{CF1} = L_{CF2} = L_{CF} = 6,1 \cdot 10^{-3}$ Гн – параметри згладжуючих реакторів типу РБФА-У-6500/3250 тягових підстанцій;

R_{K1} та L_{K1} , R_{K2} та L_{K2} , R_{K3} та L_{K3}
 $R_{K1} = R_{K2} = R_{K3} = R_K = 0,0424$ Ом/км, $L_{K1} = L_{K2} = L_{K3} = L_{K4} = 0,00225$ Гн/км – внутрішній активний опір та індуктивність відповідної ділянки контактної мережі з підвіскою, що складена за схемою М-120+2МФ-100+А-185 [4];

$R_{P1} = R_{P2} = R_{P3} = R_P = 15,38 \cdot 10^{-3}$ Ом/км – внутрішній активний опір відповідної ділянки рейок.

Розрахунок перехідних процесів виконано операторним методом з ненульовими початковими умовами, тобто, при $J_{ЕЛ} = 1500$ А, $i_1(0) = 750$ А, $i_2(0) = 750$ А.

Після розв'язання системи рівнянь в операторній формі для схеми після комутації отримали зображення струмів віток схеми. Для визначення оригіналів перехідних струмів застосовано теорему розкладання [5]:

$$L^{-1} \left\{ \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \right\} = f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2(p_k)} e^{p_k t}, \quad (1)$$

де $p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_n$ – прості корені характеристичного рівняння $F_2(p) = 0$.

Результати розрахунків, тобто, вирази перехідних струмів віток, а також струму короткого замикання мають вигляд:

$$\begin{aligned} i_1(t) &= 6610,48 + 250,0 \cdot e^{-16,8t} \times \\ &\times (23,44(\sinh(13,25t) - \cosh(13,25t))) \text{ А}; \\ i_2(t) &= 3530,40 + 250,0 \cdot e^{-15,9t} \times \\ &\times (11,12(\sinh(12,01t) - \cosh(12,01t))) \text{ А}; \\ i_3(t) &= 2030,40 + 250,0 \cdot e^{-15,9t} \times \\ &\times (11,12(\sinh(12,01t) - \cosh(12,01t))) \text{ А}; \\ i_{K3}(t) &= 8640,88 + 250,0 \cdot \left(e^{-16,8t} \times \right. \\ &\times (23,44 \cdot (\sinh(13,25t) - \cosh(13,25t))) + \\ &\left. + e^{-15,9t} \cdot (11,12 \cdot (\sinh(12,01t) - \cosh(12,01t))) \right) \text{ А}; \\ i_{PB1}(t) &= 2203,49 + 250,0 \cdot e^{-16,8t} \times \\ &\times (-7,8 \cosh(13,25t) + 30,74 \sinh(13,25t)) \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{PB2}(t) &= 1176,8 + 750,0 \cdot e^{-15,9t} \times \\ &\times (-1,23 \cosh(12t) + 4,9 \sinh(12t)) \text{ А}; \\ i_{ин1}(t) &= 4407,0 + 250,0 \cdot e^{-16,8t} \times \\ &\times (-15,6 \cosh(13,25t) - 7,3 \sinh(13,25t)) \text{ А}; \\ i_{ин2}(t) &= 2353,6 + 250,0 \cdot e^{-15,9t} \times \\ &\times (-7,4 \cosh(12t) - 3,6 \sinh(12t)) \text{ А}. \end{aligned}$$

Часові залежності цих струмів представлені на рис. 4, 5 і 6, при цьому усталені значення струмів тягових підстанцій дорівнюють $I_{y1} = 6610,5$ А, $I_{y2} = 3530,3$ А. Значення уставки релейно-струмової СЗ на обох ТП $I_{уст1} = I_{уст2} = 3500$ А.

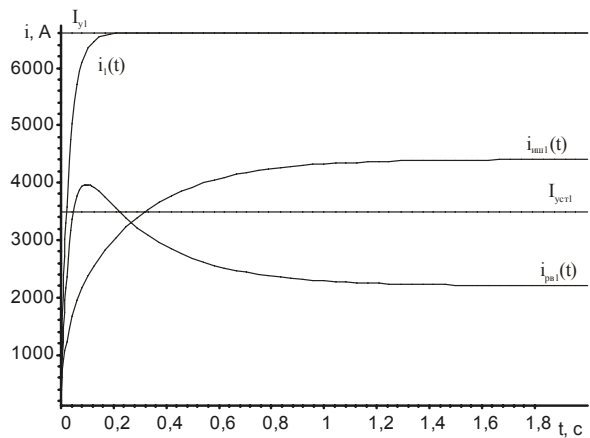


Рис. 4

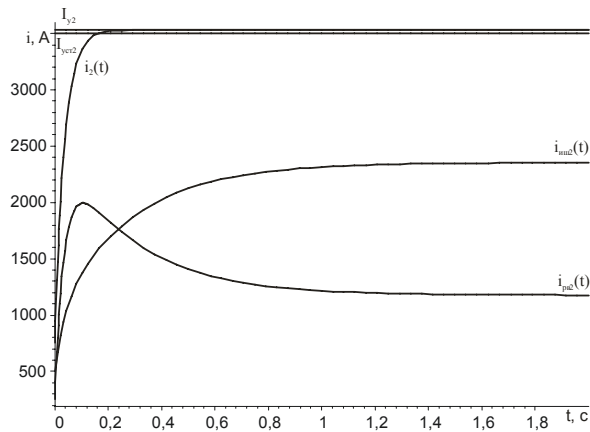


Рис. 5

Практичний інтерес представляють значення перехідних напруг на затискачах тягових підстанцій; в аналітичній формі вони мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} u_{ТП1}(t) &= 1911,1 + 288,83e^{-16,89t} \times \\ &\times (\cosh(13,25t) - \sinh(13,25t)) \text{ В}; \end{aligned}$$

$$u_{\text{ТП2}}(t) = 2328,2 + 179 \cdot e^{-15,9t} \times (\cosh(12t) - \sinh(12t)) \text{ В.}$$

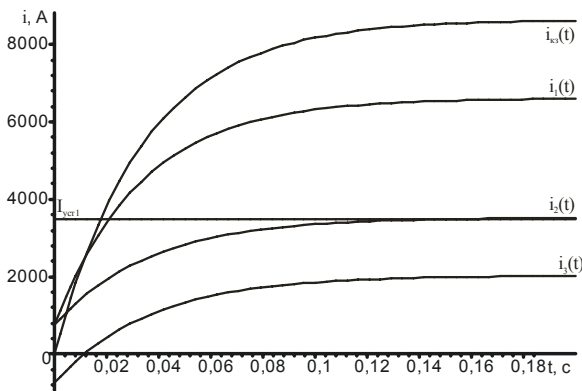


Рис. 6

Графіки зміни напруги на затискачах ТП1 представлено на рис. 7.

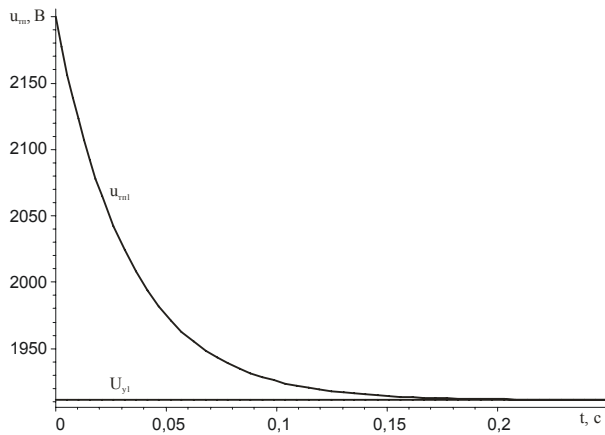


Рис. 7

Характер зміни напруги на ТП2 такий же, як і на ТП1 з тією лише різницею, що спостеріга-

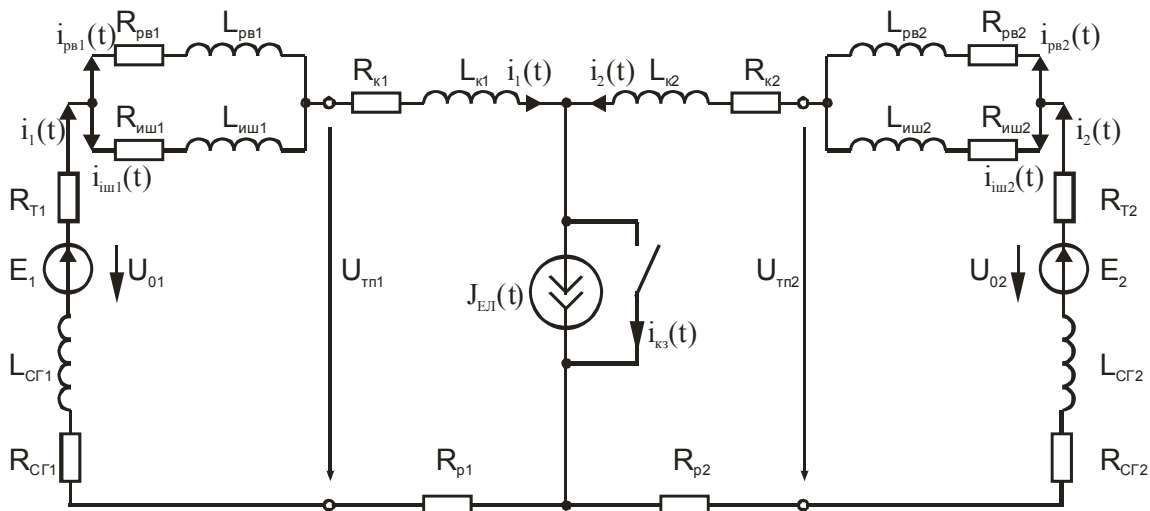


Рис. 8

Аналізуючи представлені вище графіки, бачимо математичне підтвердження тих положень, що висувалися в роботах [3, 4, 6]: при

ються дещо інші значення напруги. Усталені значення напруги на затискачах при КЗ поза електровозом для ТП1, ТП2 відповідно складають: $U_{y1} = 1911,1 \text{ В}$, $U_{y2} = 2628,2 \text{ В}$.

Далі розглянемо випадок режиму (2), а саме – глухе коротке замикання на електровозі. Схема заміщення цього випадку представлена на рис. 8.

Розрахунок цього режиму виконано аналогічно попередньому.

Аналитичні вирази перехідних струмів віток мають наступний вигляд:

$$i_1(t) = i_2(t) = 4253,9 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (56,83(\sinh(12,4t) - \cosh(12,4t))) \text{ А;}$$

$$i_{кз}(t) = 8507,86 + 123,3 \cdot e^{-15,9t} \times (56,83(\sinh(12,4t) - \cosh(12,4t))) \text{ А;}$$

$$i_{рв1}(t) = i_{рв2}(t) = 1417,9 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (75 \sinh(12,4t) - 56,83 \cosh(12,4t)) \text{ А;}$$

$$i_{иш1}(t) = i_{иш2}(t) = 2835,95 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (-37,9 \cosh(12,4t) - 18,16 \sinh(12,4t)) \text{ А.}$$

Часові залежності цих струмів представлені на рис. 9, 10.

Напруга на затискачах тягових підстанцій описується виразом:

$$u_{\text{ТП1}}(t) = u_{\text{ТП2}}(t) = 2459,73 + 209,5e^{-15,9t} \times (\cosh(12,4t) - \sinh(12,4t)) \text{ В.}$$

Графіки представлено на рис. 11.

виникненні КЗ в СЕТ за наявності навантаження струми фідерів ТП різко збільшуються, а напруга різко зменшується. Рис. 5 підтверджує

те твердження, що при далеких КЗ існуючі СЗ можуть не розпізнати їх, оскільки значення струмів фідерів значно менші у порівнянні струмів близьких ТП. Усталений струм КЗ на ТП2 близький до уставки ШВ2, тобто $I_{y2} \approx I_{уст2}$.

Слід зазначити, що значні похибки в математичні моделі, що розглянуті в цій та попередній роботах автора, вносить класичне представлення навантаження (електровоза, що рухається) як ідеального джерела струму, що є не зовсім коректним з точки зору класичної електротехніки та самого визначення джерела струму як фізичного об'єкту. У таких моделях губляться процеси, що протікають у силових колах електровоза, що, на думку автора, неприпустимо, оскільки вони є невід'ємною частиною складної динамічної нелінійної СЕТ. Тому автор вважає, з метою подальших розробок сучасних СЗ, що базуватимуться на мікроконтролерах чи мікропроцесорах, провести дослідження СЕТ в різноманітних режимах її роботи з врахуванням силових кіл електровозів. Ці питання будуть розглядатися в подальших роботах автора.

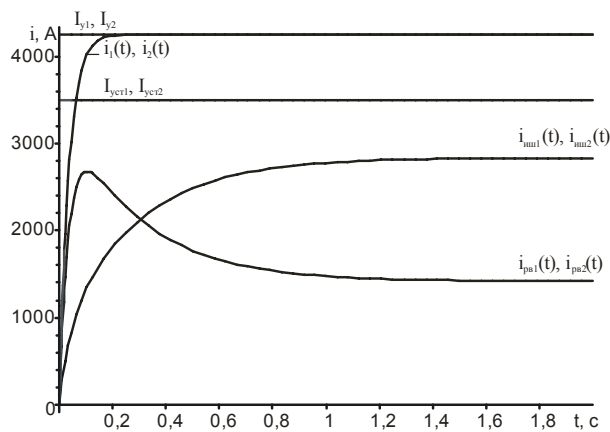


Рис. 9

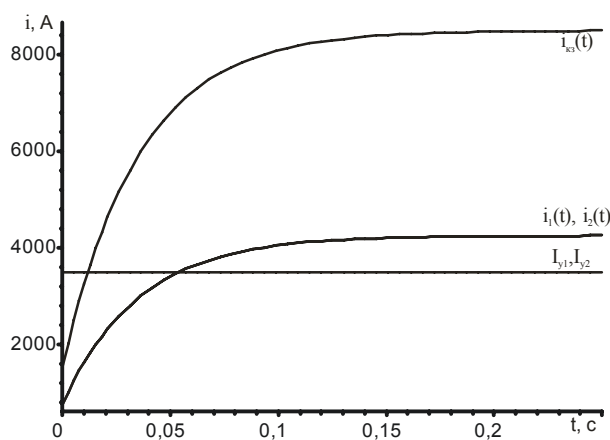


Рис. 10

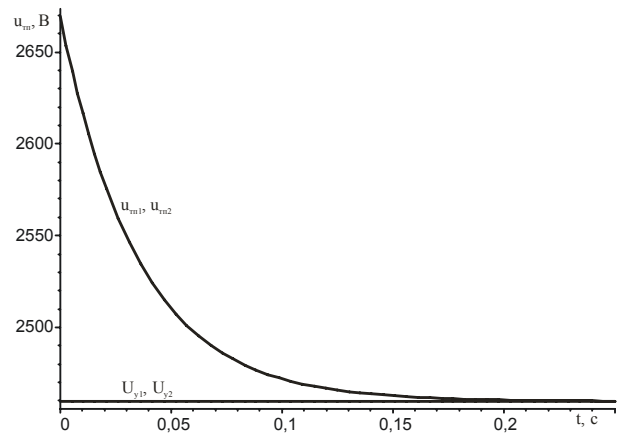


Рис. 11

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Костин, Н. А. Математическое моделирование переходных аварийных электромагнитных процессов в системе электрической тяги постоянного тока. 1. Короткое замыкание без тяговой нагрузки [Текст] / Н. А. Костин, П. Е. Михаличенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 66-71.
2. Сердинов, С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С. М. Сердинов. – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.
3. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М. И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.
4. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
5. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей [Текст] / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
6. Пупынин, В. Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах [Текст] / дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МИИТ, 1986. – 340 с.

Надійшла до редколегії 16.04.2010.
Прийнята до друку 20.04.2010.