

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ЗМІННОГО СТРУМУ «ТЯГОВА МЕРЕЖА – ЕЛЕКТРОВОЗ».

2. ВМИКАННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЕЛЕКТРОВОЗА В РЕЖИМІ ХОЛОСТОГО ХОДУ; ВИЗНАЧЕННЯ Й АНАЛІЗ КИДКА СТРУМУ НАМАГНІЧУВАННЯ

Стаття є продовженням аналізу математичних моделей систем змінного струму, в які поступово підключаються елементи тягової мережі та вмикання силового трансформатора в режимі холостого ходу. Виконано чисельні розрахунки та аналіз струму намагнічування трансформатора.

Ключові слова: математична модель, тягова підстанція, пристрій поперечної компенсації, параметри тягової мережі, електровоз, трансформатор

Статья является продолжением анализа математических моделей систем переменного тока, в которые постепенно подключаются элементы тяговой сети и включение силового трансформатора в режиме холостого хода. Выполнены численные расчеты и анализ тока намагничивания трансформатора.

Ключевые слова: математическая модель, тяговая подстанция, устройство поперечной компенсации, параметры тяговой сети, электровоз, трансформатор

The article is a continuation of analysis of mathematical models for AC systems, in which the elements of electric-traction network and switch-on of power transformer in an idling mode are gradually connected. The numerical calculations and analysis of current of transformer magnetization are executed.

Keywords: mathematical model, electric-traction substation, device of transversal compensation, parameters of electric-traction network, electric locomotive, transformer

1. Вступ

Ця робота є продовженням досліджень [1] і містить результати чисельних розрахунків і аналізу перехідних електромагнітних процесів, що супроводжують режим вмикання силового трансформатора електровоза ДС 3 без навантаження. При цьому оцінимо вплив на зазначені процеси в системі електричної тяги таких факторів і величин: руху електровоза з поїздом (шляхом урахування відстані ℓ електровоза до тягової підстанції); електричних параметрів тягової мережі і тягової підстанції; коливання фідерної напруги; наявність та значення електричних параметрів пристрою поперечної ємнісної компенсації. Розрахунки виконаємо для електрифікованої ділянки, зазначеної в [1], а також для визначених в ній параметрів тягового трансформатора електровоза. З метою виявлення впливу на перехідні величини, і зокрема на струм намагнічування $i_{\mu}(t)$ трансформатора, зазначених вище факторів послідовно складалі й розраховували математичні моделі таких систем: «тягова мережа (ТМ) – електрорухомий склад (ЕРС)»; «тягова підстанція (ТП) – ТМ – ЕРС»; «ТП – пристрій поперечної компенсації (ППК) ТМ – ЕРС».

2. Електричні системи заміщення та математичні моделі систем

Наведемо схеми заміщення та математичні моделі процесів, що протікають у зазначених системах.

2.1. Система «ТМ – ЕРС»

Схема заміщення такої системи представлена на рис. 1, а математична модель являє собою нелінійне диференціальне рівняння вигляду:

$$R_{\text{TM}} \cdot i_{\mu}(t) + L_{\text{TM}} \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + (R_{\text{др}} + R_{\text{тр1}}) \cdot i_{\mu}(t) + (L_{\text{др}} + L_{\text{с1}}) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = u_1(t); \quad (1)$$

$$u_1(t) = U_{\text{ном}} \sqrt{2} \sin \omega t; \quad (2)$$

$$\Phi(t) = 0,1234 + 0,0003 i_{\mu}(t). \quad (3)$$

У рівняннях (1)–(3) та на рис. 1: R_{TM} – активний опір тягової мережі; L_{TM} – індуктивність тягової мережі; $R_{\text{др}}$ – активний опір дроселя, $L_{\text{др}}$ – індуктивність дроселя, $R_{\text{тр1}}$ – активний опір трансформатора, $L_{\text{с1}}$ – індуктивності розсіювання первинної обмотки трансформатора, $W_{\text{т1}}$ – кількість витків первинної обмотки трансформатора, Φ – магнітний потік.

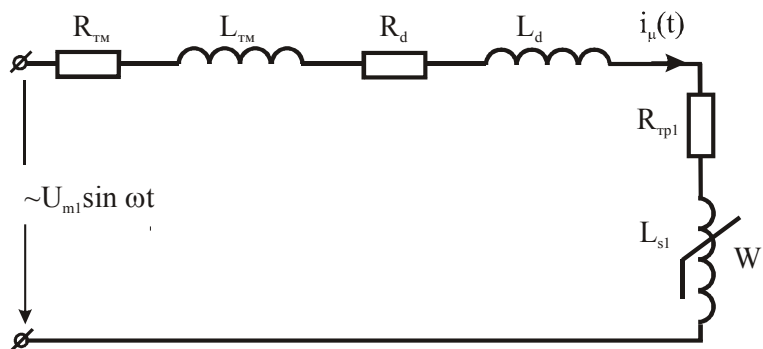


Рис. 1. Електрична схема заміщення системи «тягова мережа – електровоз»

2.2. Система «ТП – ТМ – ЕРС»

Схема заміщення такої системи, тобто з урахуванням параметрів тягової підстанції, представлена на рис. 2.

Електромагнітні процеси в схемі рис. 2 описуються рівнянням (4):

$$R_{тп} \cdot i_1(t) + L_{тп} \cdot \frac{di_1}{dt} + (R_{кп} + R_p) \cdot i_{\mu}(t) +$$

$$+ (L_{кп} + L_p) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + (R_{др} + R_{тп}) \cdot i_{\mu}(t) +$$

$$+ (L_{др} + L_{s1}) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 1,1 \cdot e_1(t), \quad (4)$$

де $R_{тп} = 0,176$ Ом – активний опір тягової підстанції; $L_{тп} = 0,0177$ Гн – індуктивність тягової підстанції; $1,1 \cdot e_1(t)$ – е.р.с. тягової підстанції.

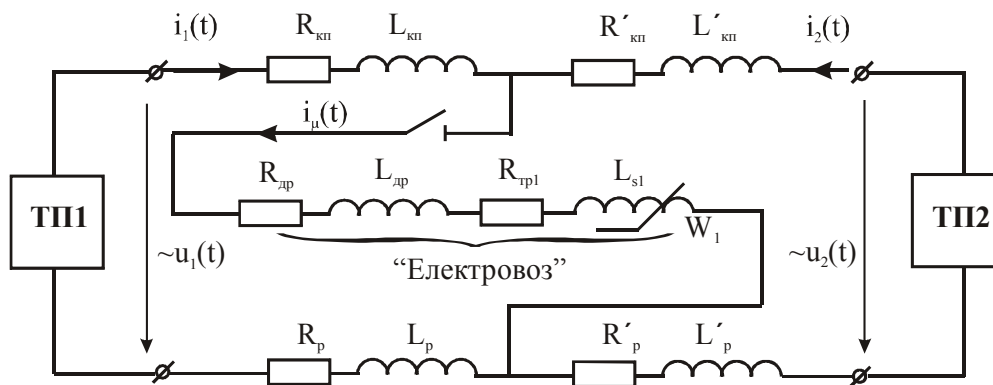


Рис. 2. Схема заміщення системи «тягова підстанція – тягова мережа – електрорухомий склад»

2.3. Система «ТП – ППК – ТМ – ЕРС»

Як відомо [2, 3], для покращення якості електричної енергії в тягових мережах використовують пристрої поперечної компенсації (ППК). Тоді електрична схема заміщення системи електротяги одноколійної ділянки двостороннього живлення з урахуванням ППК реактивної потужності може бути представлена, як зображено на рис. 3, згідно якого математична модель електромагнітних процесів є наступною системою нелінійних рівнянь:

$$R_{тп} \cdot i_1(t) + L_{тп} \cdot \frac{di_1}{dt} + R_{ппк} \cdot i_{ппк}(t) +$$

$$+ L_{ппк} \cdot \frac{di_{ппк}}{dt} + \frac{1}{C_{ппк}} \int_0^t i_{ппк}(t) dt = 1,1 \cdot e_1(t); \quad (5)$$

$$-R_{ппк} \cdot i_{ппк}(t) - L_{ппк} \cdot \frac{di_{ппк}}{dt} - U_c(0) -$$

$$- \frac{1}{C_{ппк}} \int_0^t i_{ппк}(t) dt + (R_{кп} + R_p) \cdot i_{\mu}(t) +$$

$$+ (L_{кп} + L_p) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + (R_{др} + R_{тп}) \cdot i_{\mu}(t) +$$

$$+ (L_{др} + L_s) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0; \quad (6)$$

$$i_1(t) - i_{ппк}(t) - i_{\mu}(t) = 0, \quad (7)$$

де індекс «ппк» – означає параметри та електричні величини пристрою поперечної компенсації, схема якого представлена на рис. 4 [3].

Для визначення параметрів вітки пристрою паралельної компенсації використаємо наступні формули. Ємність одного конденсатора в послідовному їх з'єднанні:

$$C = \frac{Q_c}{\omega \cdot U_c^2}, \quad (8)$$

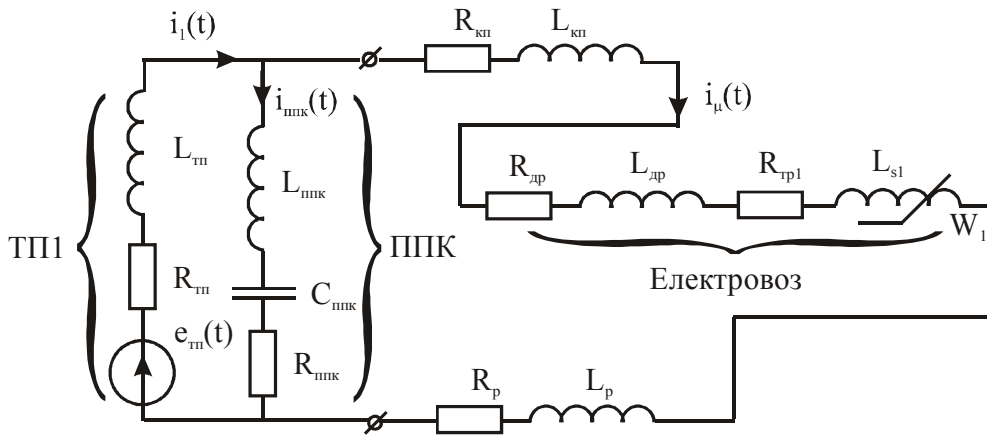


Рис. 3. Схема заміщення системи електричної тяги з урахуванням поперечної компенсації реактивної (ППК)

де $Q_C = 125 \cdot 10^3$ вар – реактивна потужність конденсаторної батареї, яка розташована в пристрої паралельної компенсації біля тягової підстанції Боярка; $\omega = 314 \frac{1}{c}$ – кутова частота тягової мережі; $U_c = 1050$ В – напруга батареї конденсаторів.

Еквівалентну ємність послідовно з'єднаних конденсаторів визначимо як:

$$C_{\text{пнк}} = \frac{C}{n}, \quad (9)$$

де $C = 362$ мкФ – ємність одного конденсатора типу КСК2-1,05-125-2У1;

$n = 34$ – загальна кількість послідовно з'єднаних конденсаторів компенсації.

Далі знайдемо першу та третю гармоніки ємнісного опору ємності; виходячи із умови резонансу напруг:

$$X_C^{(1)} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пнк}}}; \quad (10)$$

$$X_C^{(3)} = X_L^{(3)} = \frac{1}{3\omega \cdot C_{\text{пнк}}}. \quad (11)$$

Для визначення індуктивності вітки ППК визначмо першу гармоніку індуктивного опору ППК:

$$X_L^{(1)} = \frac{X_L^{(3)}}{3}; \quad (12)$$

$$L_{\text{пнк}} = \frac{X_L^{(1)}}{\omega}, \text{ або } L_{\text{пнк}} = \frac{1}{9 \cdot \omega^2 \cdot C_{\text{пнк}}}. \quad (13)$$

Також визначаємо активну складову опору ППК:

$$U_{\text{км}} = \sqrt{R_{\text{пнк}}^2 + (X_L^{(1)} - X_C^{(1)})^2} \cdot I, \quad (14)$$

звідки

$$R_{\text{пнк}} = \sqrt{\frac{U_{\text{км}}^2}{I^2} - (X_L^{(1)} - X_C^{(1)})^2}, \quad (15)$$

де I – номінальне значення струму у вітці ППК.

Після розрахунків за формулами (9)–(15) отримаємо такі параметри ППК: $R_{\text{пнк}} = 67,18$ Ом; $L_{\text{пнк}} = 107,03$ мГн; $C_{\text{пнк}} = 10,617$ мкФ.

3. Результати чисельних розрахунків та аналіз струму намагнічування

Чисельні розрахунки систем рівнянь (1)–(3), (2)–(4) та (2), (3), (5)–(7) виконано для числових даних, наведених у роботі [1], та параметрів ППК, визначених у цій роботі. Із отриманих величин найбільш важливою є часова залежність струму намагнічування $i_\mu(t)$ тягового трансформатора; у зв'язку з цим проаналізуємо такі залежності.

Як впливає із рис. 5, часовий характер зміни струму намагнічування $i_\mu(t)$ однаковий для всіх розглянутих систем (рис. 1 – 3) при різних відстанях ℓ від ТП і має вигляд спадаючої гостровершинної кривої, яка відрізняється від синусоїдної залежності. Однак максимальне значення (кидок) струму намагнічування $I_{\mu \text{max}}$ різне для різних систем (порівняємо рис. 5, б та г для $\ell = 20$ км) і різних значень відстані ℓ (рис. 5, а та б, а також рис. 6).

З «ускладненням» системи, тобто з урахуванням більшої кількості елементів електрифікованої ділянки, величина кидка струму збільшується: наприклад, при $\ell = 10$ км значення $I_{\mu \text{max}}$ для схем заміщення «ТМ – ЕРС» склало 469,2 А, для «ТП – ППК – ТМ – ЕРС» – вже 619,4 А.

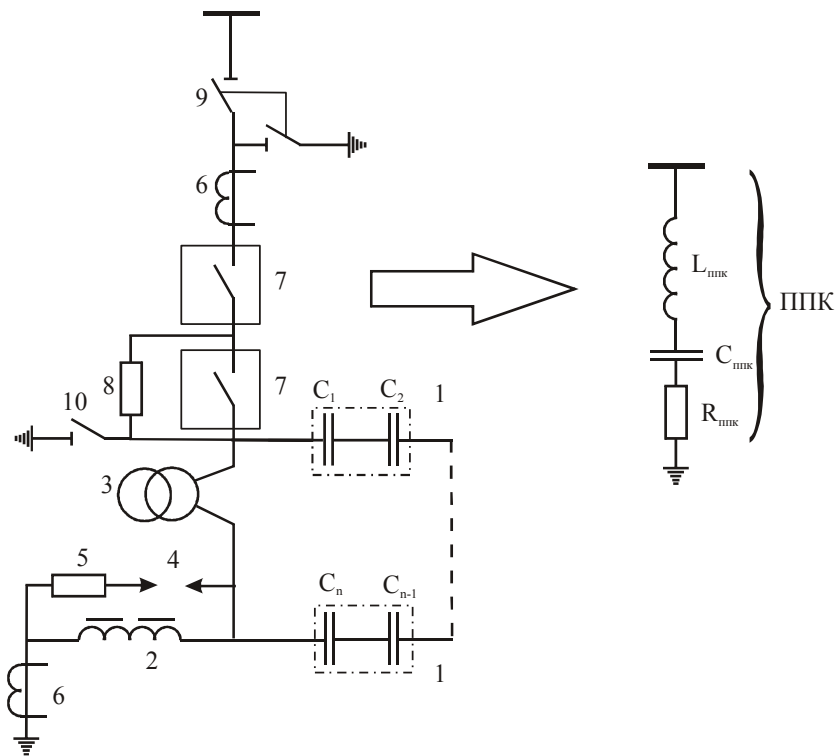


Рис. 4. Схема заміщення нерегульованого пристрою паралельної компенсації:

1 – послідовно з’єднані конденсатори; 2 – реактор зі сталевим осердям; 3 – розрядний трансформатор напруги; 4 – розрядник; 5 – обмежувачий резистор; 6 – трансформатор струму для живлення кола максимального та диференціального захисту; 7 – вимикачі; 8 – шунтувальний резистор; 9 – роз’єднувач із заземлюючим ножем; 10 – заземлюючий роз’єднувач для виконання ремонтних робіт

Зі збільшенням відстані ℓ (тобто, чим далі від ТП знаходиться електровоз) величина кидка струму $I_{\mu \max}$ зменшується (рис. 6); найбільше значення $I_{\mu \max}$ спостерігається при $\ell = 0$ км і досягає ~ 700 А.

Електричні кола розглядуваних систем (рис. 1 – 3) являють собою активно-індуктивні ($R-L$) кола. Для таких кіл, як відомо із теоретичної електротехніки, тривалість перехідного процесу $T_{\text{пн}}$ при вмиканні кола дорівнює:

$$T_{\text{пн}} = (4 \dots 5)\tau = (4 \dots 5)\frac{L}{R}, \text{ де } \tau - \text{ стала часу кола,}$$

а R та L – еквівалентні активний опір та індуктивність кола. Тоді зі збільшенням ℓ , тобто зі збільшенням розрахункової довжини тягової мережі, у більшій мірі збільшується її активний

опір й тим самим зменшується $T_{\text{пн}}$. За такої ж причини збільшується $T_{\text{пн}}$ і, отже, довше встановлюється усталений процес у більш складній, тобто реальній, системі електрифікованої ділянки (табл. 1).

4. Висновок

Вмикання силового тягового трансформатора у режимі холостого ходу є найбільш небезпечним при розташуванні електровоза ДС 3 біля тягової підстанції ($\ell = 0$ км). У цьому випадку, по-перше, кидок струму намагнічування найбільший і досягає ~ 685 А і, по-друге, тривалість перехідного процесу до усталення усталеного процесу найдовша і дорівнює $0,7 \dots 1,1$ с.

Таблиця 1

Система	«ТМ – ЕРС»					«ТП – ТМ – ЕРС»				
	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20
ℓ , км	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20
$T_{\text{пн}}$, с	0,65	0,55	0,46	0,34	0,3	1,1	0,85	0,55	0,46	0,38

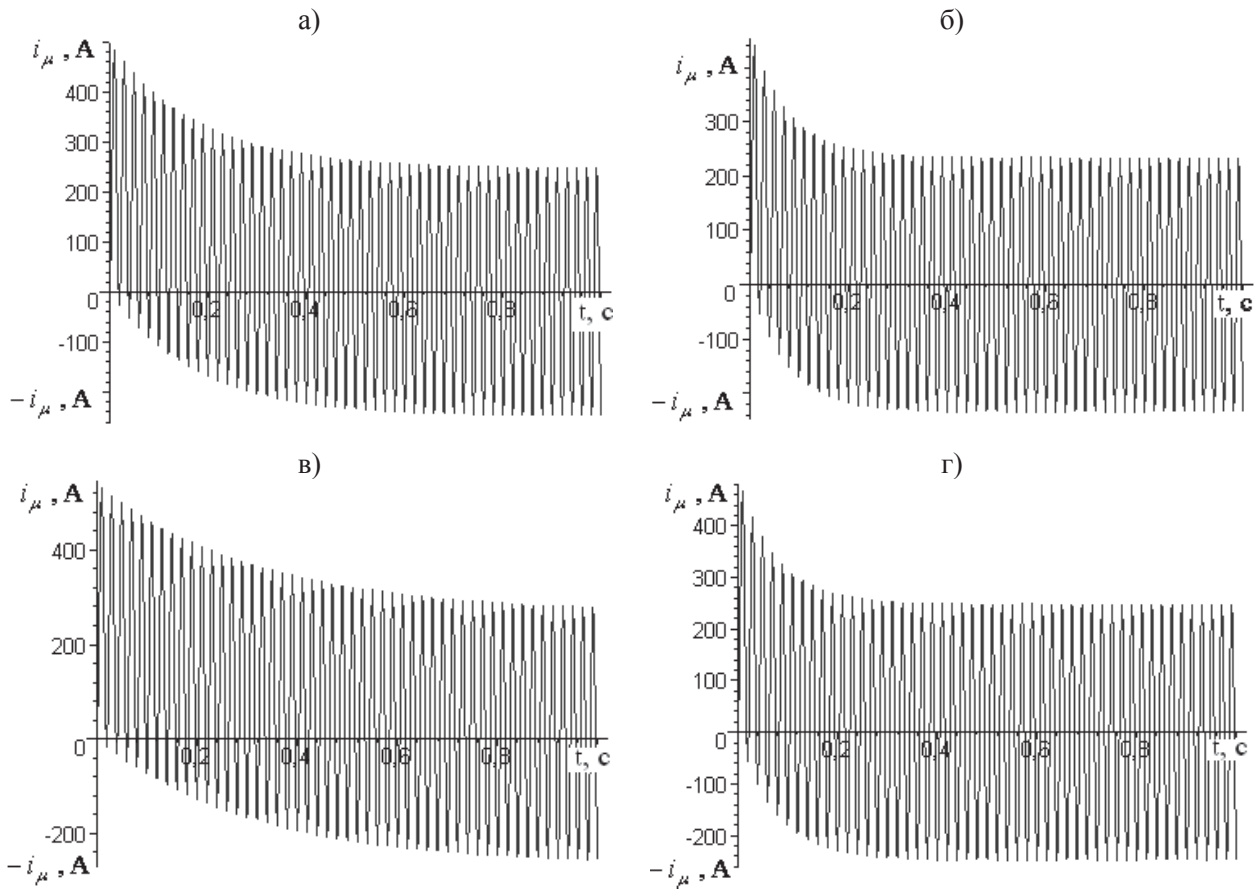


Рис. 5. Часові залежності струму намагнічування:
 а, б – для системи «ТМ – ЕРС» при l відповідно 5 та 20 км;
 в, г – для системи «ТП – ТМ – ЕРС» при l відповідно 0 та 20 км

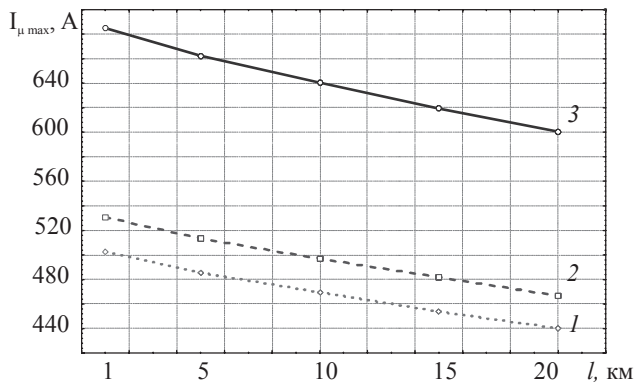


Рис. 6. Залежність максимального значення (кидка) струму намагнічування від відстані l розташування електровоза відносно тягової підстанції:
 1, 2, 3, – для розрахункових систем відповідно «ТМ – ЕРС», «ТП – ТМ – ЕРС», «ТП – ППК – ТМ – ЕРС»

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Міщенко, Т. М. Математичне моделювання перехідних процесів в системі змінного струму «тягова мережа – електровоз». 1. Вмикання силового трансформатора електровоза в режимі холостого ходу; оцінка параметрів [Текст] / Т. М. Міщенко, А. І. Кійко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – № 36. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 90-94.
2. Влияние поперечной ёмкостной компенсации на электромагнитные процессы в тяговой сети переменного тока [Текст] / Р. Р. Мамошин [и др.] // Электричество. – 1984. – № 5. – С. 9-12.
3. Мамошин, Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / Р. Р. Мамошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.

Надійшла до редколегії 02.12.2010.
 Прийнята до друку 15.12.2010.