

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ ВМИКАННІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЕЛЕКТРОВОЗА ДСЗ У РЕЖИМІ ХОЛОСТОГО ХОДУ

Представив д.т.н., професор Костін М.О.

Вступ

З теорії трансформаторів відомо, що при вимиканні ненавантаженого трансформатора з феромагнітним осердям в мережу синусоїдальної напруги в його первинній обмотці можливий короткочасний стрибок струму намагнічування, значення якого нерідко перевищують в 20 і більше разів амплітуду усталеного значення струму холостого ходу трансформатора. Такі сплески струму можуть викликати не тільки помилкове спрацьовування деяких видів захисту, але і механічне руйнування обмотки, оскільки електродинамічні сили, що впливають на неї, пропорційні квадрату струму. Знання величин зазначених стрибків струму також важливо при оцінці виникаючих перенапруг та електричних показників системи. Окрім цього, розробка адекватної математичної моделі дасть можливість створити необхідне програмне забезпечення для аналізу перехідних електромагнітних процесів в системі замість проведення дороговартних натурних її випробувань.

І в той же час досліджуваний режим холостого ходу є нерідкісним режимом роботи електрорухомого складу: він виникає при зрушенні з місця електровоза і частково при переході його струмоприймачем нейтральної вставки контактної мережі.

Дослідження електромагнітних перехідних процесів можливе наступними способами: натуральними експериментальними випробуваннями на діючих ділянках; фізичним комп'ютерним (імітаційним) чи математичним моделюванням. Проведення натурних випробувань дороговартне і пов'язане з можливим виходом із ладу елементів досліджуваної системи. Для фізичного моделювання, по-перше, потрібно змонтувати в лабораторії досліджувану систему, по-друге, масштабний фактор може відіграти негативну

роль в отриманні дійсних результатів. Комп'ютерне (імітаційне) моделювання має справу не з реальними, а віртуальними елементами системи і постає питання вірогідності отриманих результатів. Тому, на нашу думку, найбільш ефективним методом дослідження перехідних електромагнітних процесів є метод математичного моделювання, який і застосований у цій роботі.

Ця робота відрізняється від інших подібних публікацій врахуванням впливу на перехідний процес режиму холостого ходу параметрів і режимів роботи власне системи тягового електропостачання, тобто, тим, що розглядається вся динамічна система «тягова мережа–електровоз».

Враховуючи важливість дослідження процесів у системи електротяги з новими українськими електровозами, ця робота виконана на прикладі електровозів ДСЗ, що експлуатуються на Південно-Західній залізниці, зокрема на електрифікованій ділянці Боярка-Фастов. При цьому оцінимо вплив на перехідні процеси в системі: параметрів тягової мережі; коливання напруги на виході тягової підстанції; руху електровоза з поїздом; наявності та значень параметрів установки поперечної ємнісної компенсації (УПСК).

Електричні системи заміщення та математичні моделі системи.

Наведемо схеми заміщення та математичні моделі процесів, що протікають в зазначених системах. На цих схемах: тягова мережа (ТМ); електрорухомий склад (ЕРС); тягова підстанція (ТП); пристрій поперечної компенсації (ППК).

Система «ТП – ТМ – ЕРС»

Схема заміщення такої системи, тобто з урахуванням параметрів тягової підстанції, представлена на Рис. 1.

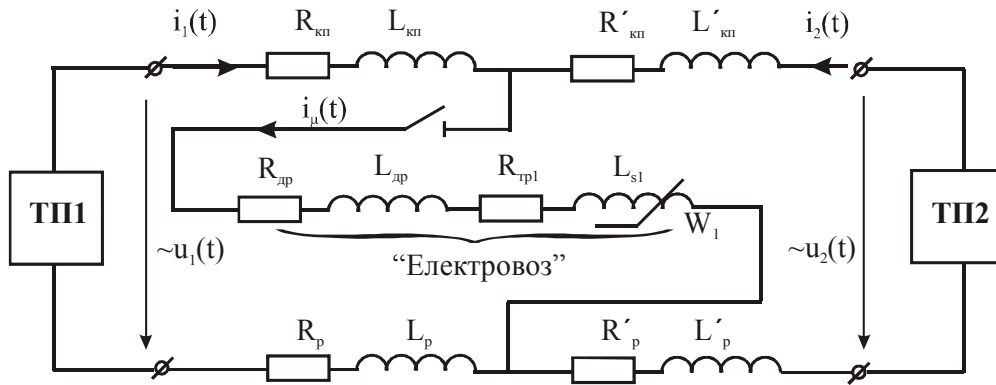


Рис. 1. Схема заміщення системи «тягова підстанція – тягова мережа – електрорухомий склад»

Електромагнітні процеси в схемі рис. 1 описуються рівнянням (1)

$$R_{\text{ТП}} \cdot i_1(t) + L_{\text{ТП}} \cdot \frac{di_1}{dt} + (R_{\text{кп}} + R_{\text{п}}) \cdot i_{\mu}(t) + (L_{\text{кп}} + L_{\text{п}}) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + (R_{\text{др}} + R_{\text{тр1}}) \cdot i_{\mu}(t) + (L_{\text{др}} + L_{\text{с1}}) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 1,1 \cdot e_1(t),$$

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

де $R_{\text{ТП}} = 0,176$ Ом – активний опір тягової підстанції; $L_{\text{ТП}} = 0,0177$ Гн – індуктивність тягової підстанції; $1,1 \cdot e_1(t)$ – е.р.с. тягової підстанції; W_1 – кількість витків первинної обмотки трансформатора.

Система «ТП – ППК – ТМ – ЕРС»

Як відомо [1, 2], для покращення якості електричної енергії в тягових мережах використовують пристрої поперечної компенсації (ППК). Тоді електрична схема заміщення системи електротяги однопутної ділянки двостороннього живлення з урахуванням ППК реактивної потужності може бути представлена у вигляді:

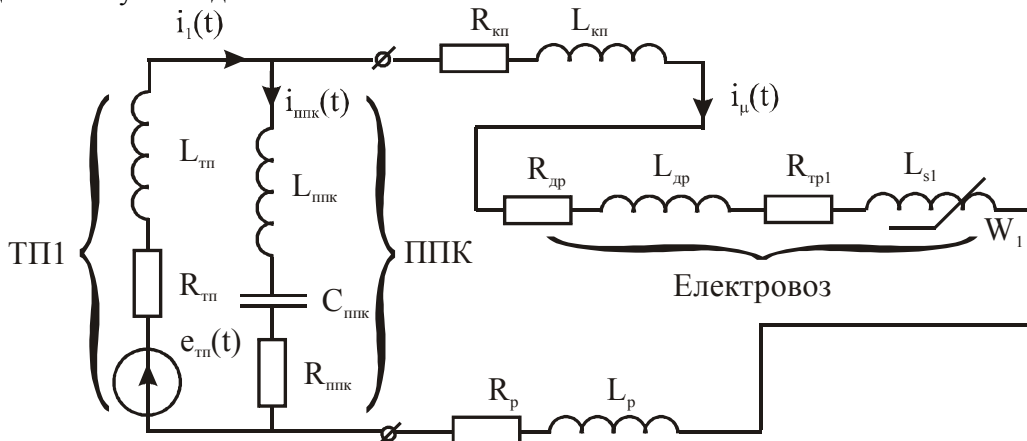


Рис. 2. Схема заміщення системи електричної тяги з урахуванням поперечної компенсації реактивної

Згідно рис. 2, математична модель електромагнітних процесів є наступною системою нелінійних рівнянь:

$$R_{\text{ТП}} \cdot i_1(t) + L_{\text{ТП}} \cdot \frac{di_1}{dt} + R_{\text{ппк}} \cdot i_{\text{ппк}}(t) + L_{\text{ппк}} \cdot \frac{di_{\text{ппк}}}{dt} + \frac{1}{C_{\text{ппк}}} \int_0^t i_{\text{ппк}}(t) dt = 1,1 \cdot e_1(t),$$

$$-R_{\text{ппк}} \cdot i_{\text{ппк}}(t) - L_{\text{ппк}} \cdot \frac{di_{\text{ппк}}}{dt} - U_c(0) - \frac{1}{C_{\text{ппк}}} \int_0^t i_{\text{ппк}}(t) dt + (R_{\text{кп}} + R_{\text{п}}) \cdot i_{\mu}(t) + (L_{\text{кп}} + L_{\text{п}}) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + (R_{\text{др}} + R_{\text{тр1}}) \cdot i_{\mu}(t) + (L_{\text{др}} + L_{\text{с1}}) \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0,$$

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

де індекс «ппк» – означає параметри та електричні величини пристрою поперечної компенсації з даними $R_{\text{ппк}} = 67,18$ Ом; $L_{\text{ппк}} = 107,03$ мГн; $C_{\text{ппк}} = 10,617$ мкФ.

Результати чисельних розрахунків та аналіз струму намагнічення

Чисельні розрахунки систем рівнянь (1)–(4) виконано для числових даних, приведених у роботі [3], та параметрів ППК, наведених вище. 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. 3, часовий характер зміни струму намагнічування $i_\mu(t)$ однаковий для всіх розглядуваних систем при різних відстанях ℓ від ТП і має вигляд спадаючої гостровершинної кривої, яка відрізняється від синусоїдної залежності. Однак максимальне значення (кидок) струму намагнічування $I_{\mu max}$ різне для різних значень відстані ℓ (рис. 3, а та б, а також рис. 4).

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

Зі збільшенням відстані ℓ (тобто, чим далі від ТП знаходиться електровоз) величина кидка струму $I_{\mu max}$ зменшується (рис. 4); найбільше значення $I_{\mu max}$ спостерігається при $\ell = 0$ км і досягає ~ 700 А.

Електричні кола розглядуваних систем (рис. 1, 2) 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: $T_{\text{пн}} = (4...5)\tau = (4...5)\frac{L}{R}$, де τ – стала часу кола, а R та L – еквівалентні активний опір і 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 установлюється усталений процес у більш складній, тобто реальній, системі електрифікованої ділянки (таблиця).

Характер зміни в часі перехідних струмів фідерного $i_\phi(t)$, пристрою компенсації $i_{\text{ппк}}(t)$ та тягової мережі $i_{\text{тм}}(t)$ в залежності

від фідерної напруги і місця знаходження електровоза в міжпідстанційній зоні (тобто відстані ℓ) однаковий (рис. 5). Однак кидки зазначених струмів різні (таблиця): найбільші максимальні значення, які досягають ~ 830 А, спостерігаються у фідерного струму при U_{max} і $\ell = 20$ км. Найбільша «реакція» зменшення амплітуди від ℓ спостерігається для струму в тяговій мережі і майже не змінюється кидок струму у вітті з пристроєм компенсації.

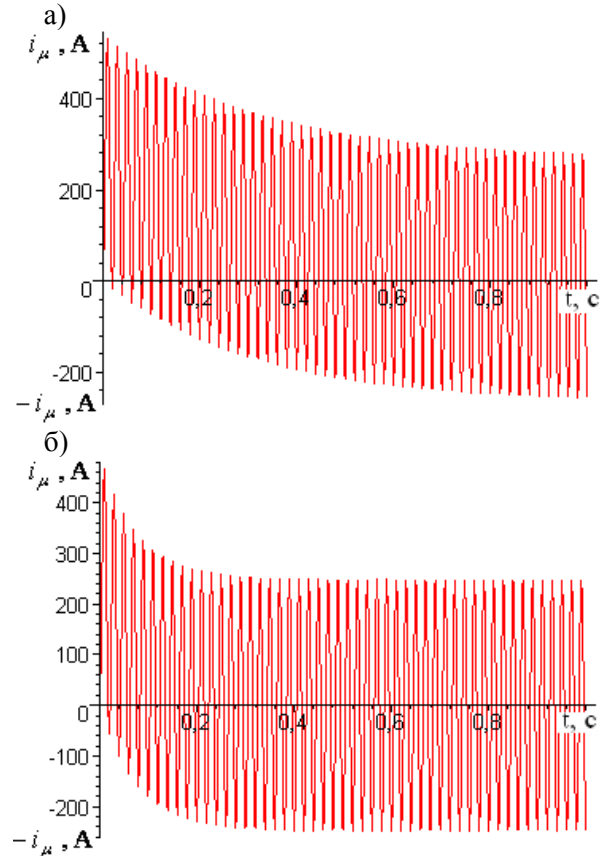


Рис. 3. Часові залежності струму намагнічування: а, б – для системи «ТП – ТМ – ЕРС» при ℓ відповідно 0 та 20 км

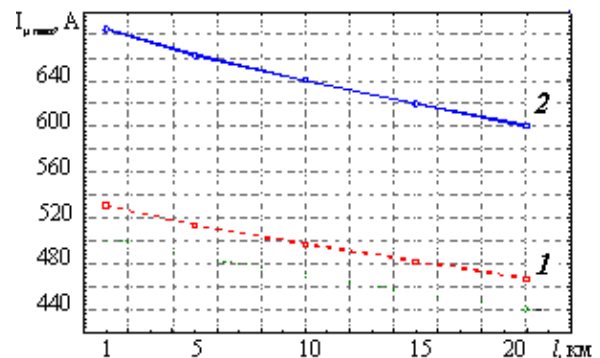


Рис. 4. Залежність максимального значення (кидка) струму намагнічування від відстані ℓ розташування електровоза відносно тягової підстанції: 1, 2 – для розрахункових систем відповідно «ТП – ТМ – ЕРС», «ТП – ППК – ТМ – ЕРС»

Фідерна напряга	$\ell = 1 \text{ км}$			$\ell = 20 \text{ км}$		
	Максимальні значення струмів, А					
	i_{ϕ}	$i_{\text{пнк}}$	i_{μ}	i_{ϕ}	$i_{\text{пнк}}$	i_{μ}
U_{min}	543,49	225,6	505,36	493,43	225,75	450,4
$U_{\text{ном}}$	715,02	296,73	664,86	649,15	296,9	592,6
U_{max}	829,53	344,36	771,33	753,3	344,6	687,5

Як впливає із рис. 5, спостерігається особливий часовий характер зміни струму у вітці з пристроєм компенсації $i_{\text{пнк}}(t)$. Дійсно, якщо $i_{\phi}(t)$ та $i_{\mu}(t)$ загасають повільно (десь за 1,5...2,0 с), коливаючись, то $i_{\text{пнк}}(t)$ миттєво збільшується до 230 А, також миттєво зменшується до 25 А і далі швидко загасає за 0,15...0,2 с. Такі закономірності поведінки перехідних струмів, певно, обумовлені нелінійністю досліджуваного електричного кола (рис. 2).

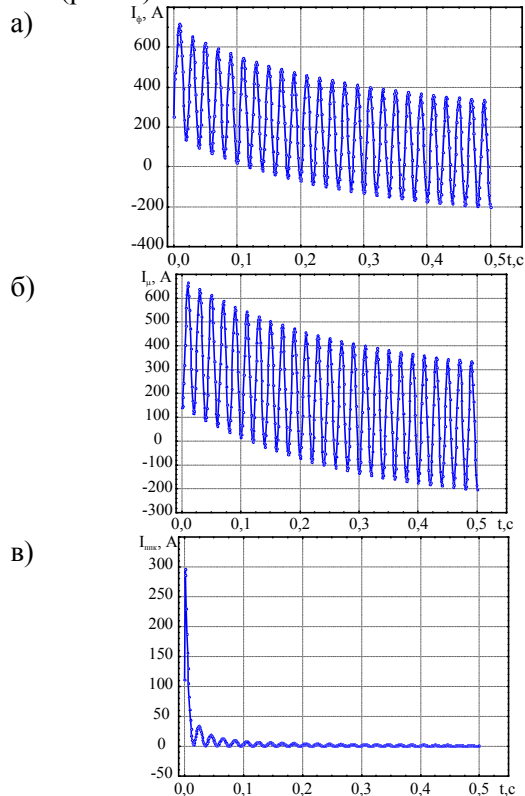


Рис. 5. Залежність струмів: фідерного (а) $i_{\phi}(t)$, у вітці пристрою поперечної компенсації (б) $i_{\text{пнк}}(t)$ та в тяговій мережі (в) $i_{\mu}(t)$ від часу на відстані 1 км від тягової підстанції при фідерній напрузі $U_{\text{ном}}$

Висновки

1. Вмикання силового тягового трансформатора у режимі холостого ходу є найбільш небезпечним при розташуванні електровоза ДСЗ

біля тягової підстанції ($\ell = 0 \text{ км}$). У цьому випадку, по-перше, кидок струму намагнічування найбільший і досягає $\sim 685 \text{ А}$ і, по-друге, тривалість перехідного процесу до установаження усталеного процесу найдовша і дорівнює 0,7...1,1 с.

2. Режим вмикання тягового трансформатора електровоза ДСЗ без його навантаження впливає не лише на характер зміни і кидки струму намагнічення самого трансформатора, але й на електромагнітні процеси в системі тягового електропостачання, що потрібно враховувати при аналізі процесів в системі електричної тяги.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Мамошин, Р.Р. Влияние поперечной ёмкостной компенсации на электромагнитные процессы в тяговой сети переменного тока [Текст] / Р.Р. Мамошин, А.П. Милютин, А.В. Фролов, А.И. Щуров // Электричество. – 1984. – № 5. – С. 9-12.
2. Мамошин, Р.Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / Р.Р. Мамошин, А.Н. Зимакова // –М.: Транспорт, 1980. – 296 с.
3. 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 ДНУЗТ. – 2011. – № 36. – С. 9-12.

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

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

Keywords: mathematical model, hauling substation, device of transversal indemnification, parameters of hauling network, electric locomotive, transformer.