
Оцінка впливу тягового струму на роботу рейкових кіл при нелінійному режимі роботи дросель-трансформаторів

Сергій Разгонов

Кафедра транспортних технологій та міжнародної логістики / факультет інноваційних технологій, Університет митної справи та фінансів, м.Дніпро, Україна

ORCID 0000-0002-1244-2047

Антон Журавльов

Кафедра «Автоматика та телекомунікації» / факультет «Комп'ютерних технологій і систем», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

ORCID 0000-0001-6885-5177

Катерина Ящук

Кафедра «Автоматика та телекомунікації» / факультет «Комп'ютерних технологій і систем», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

ORCID 0000-0002-8606-5790

Анотація: Сучасна Укрзалізниця це складна транспортна система, яка має чітку ієрархічну структуру побудови та об'єднання великої кількості взаємозалежних між собою підсистем. Конкретні задачі функціонування окремих елементів підпорядковані спільній меті функціонування Укрзалізниці в цілому. У статті розглядається вплив тягового струму на роботу рейкових кіл при нелінійному режимі роботи дросель-трансформаторів, створюваного тяговим струмом в умовах ожеледних явищ на контактній мережі та наводяться причини переходу дросель-трансформатора в нелінійний режим роботи. Питання підвищення надійності добре простежується розвитку технічних засобів автоматичного управління та контролю рухом поїздів на залізничному транспорті. Зокрема, у розробці та будівництві перегінних базових систем автоматики та телемеханіки (АіТ) та станційних систем СЦБ. На частку рейкових ланцюгів (РЛ) падає виняткова роль щодо забезпечення безпеки руху поїздів. Шляхом вимірювань встановлено, що основною причиною відмов систем Сигналізації, Централізації та Блокування СЦБ під час ожеледиці на контактній мережі є імпульси, що виникають, постійної складової струму в спектрі тягового струму, яка намагнічує магнітопроводи дросель-трансформаторів ДТ електровоза; наведені деякі параметри надійності пристроїв АіТ та їхнього впливу на експлуатаційні показники залізничних колій. Розглянуто вперше в галузі метод розв'язання нелінійного диференціального рівняння рейкового кола з прикладом розрахунку реальної рейкової колії РК. Цей метод, завдяки поданню розв'язку у вигляді експоненціального ряду, дає змогу поширити перетворення Лапласа на нелінійні процеси, що спостерігаються у фізичній системі електричних рейкових ланцюгів. Таким чином, метод дає змогу привести отримане рівняння до лінійного вигляду і розв'язати його звичайними методами.

Ключові слова: тяговий струм, рейкове коло, диференціальне рівняння дросель-трансформатор, режим роботи, експлуатаційні показники.

1. Вступ

Питання підвищення надійності добре простежується розвитку технічних засобів автоматичного управління та контролю рухом поїздів на залізничному транспорті. Зокрема, у розробці та будівництві перегінних базових систем автоматики та телемеханіки (АіТ) та станційних систем СЦБ. На частку рейкових ланцюгів (РЛ) падає виняткова роль щодо

забезпечення безпеки руху поїздів. Незважаючи на це, тривалий час залишалися невирішеними питання підвищення їхньої експлуатаційної надійності.

Починаючи з 80-х років 20 століття на кафедрі «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту (ДІІТ) (на сьогоднішній день – Дніпровський інститут інфраструктури та транспорту українського державного університету науки та технологій) під керівництвом д.т.н., професора А.П.Разгонова, вперше у галузі, почали проводитися дослідницькі роботи із захисту систем СЦБ від перешкод, створюваних комутаційними процесами в тяговій мережі в умовах ожеледиць на проводах контактної мережі [1,2], а також влітку при грозових і блискавкових перешкодах. Також важливим кроком вперед виявилось широке поширення на мережі Укрзалізниці рейкових ланцюгів тональної частоти укороченої довжини з розширеною областю роботи при зниженому питомому опорі ізоляції рейкової лінії; розробки елементів рейкових ланцюгів із мало дефіцитних матеріалів, оцінки їх впливу на параметри рейкових ланцюгів. Разом про те зазначимо, що з переходом виготовлення виробів елементів рейкових ланцюгів (рейкових з'єднувачів, дросельних перемичок та інших) зі сталі виявилось, що перевищуються нормативи асиметрії рейкових ліній за постійним струмом. Так при перерізі тросу зі сталі 150 мм² в рейковому ланцюжку довжиною 100 м коефіцієнт асиметрії $K_a = 18\%$, при нормі 12 %, і в 2,65 рази вище, ніж при мідному тросі, а в ланцюзі 250 м $K_a = 11,9\%$, а при мідному з'єднувачі $K_a = 3,75\%$, і, нарешті, у 1000-метровому ланцюгу відповідно: 4,4% та 2,2%. У зв'язку з цим, на кафедрі велися розробки параметричного генератора, як джерела вторинного живлення, що має високу стабільність напруги навантаження, було отримано низку відповідних патентів [14,15]. Практично показано, що при включенні його в схему захисного трансформатора-подавлювача (ТП) високовольтних імпульсних перешкод досягається [3,4,5] практично повний захист апаратури СЦБ від перешкод. Також кафедрою проводилася велика науково-дослідна робота з параметричного генератора [4,5], щодо доповнення його конструкції новою функцією (режимом роботи на частоті мережі живлення 50/50 Гц), встановлення допусків на параметри об'єктів залізничної автоматики (ЗАТ), мають важливе значення у підвищенні якості їх профілактики та продовження терміну життя.

Стаття призначена для інженерно-технічних працівників галузей АіТ, промислового залізничного транспорту, «Укрзалізниця» та інших галузей промисловості, пов'язаних з експлуатацією та модернізацією техніки СЦБ, а також корисна фахівцям проектних організацій, студентам та аспірантам вузів спеціальності «Автоматика та автоматизація».

2. Об'єкт і предмет дослідження

При наростанні індукції в сердечнику дросель-трансформатора (ДП) за час дії імпульсу напруги струм, що намагнічує, також наростає за аналогічним законом. На момент закінчення імпульсу напруги $t = t_i$ приріст індукції досягає величини $\Delta B = \frac{V_i \cdot t_i}{W_i \cdot S_c}$, Тл. При безперервному намагнічуванні сердечника ДТ1 імпульсами у ньому має місце гістерезис, що характеризується петлею з залишковою індукцією та коерцитивною силою. У цьому випадку процес намагнічування сердечника ДТ1 протікатиме по ряду окремих циклів доки досягне граничного окремого циклу петлі гістерезису ПГ. Петля цього окремого циклу визначає магнітну проникність на ньому ($k_\mu = \frac{\Delta u_B}{uH}$, де k – масштабний коефіцієнт), а значить і реактивний опір обмотки. З сказаного випливає, що намагнічування сталі магнітопроводу дросель-трансформатора може відбуватися не тільки під дією «абстрактної» постійної складової струму, отриманою в результаті рішення диференціального рівняння, а й під дією безперервно наступних імпульсів струму, створюваних електричною дугою на струмознімач (рис.1). Насичення сталі сердечників магнітопроводу призводить, головним чином, до зменшення опору холостого ходу та зміни величин коефіцієнтів чотирьохполюсників схем заміщення колійних ДП, що погіршує нормальний режим роботи рейкових ланцюгів та викликає відмови систем.

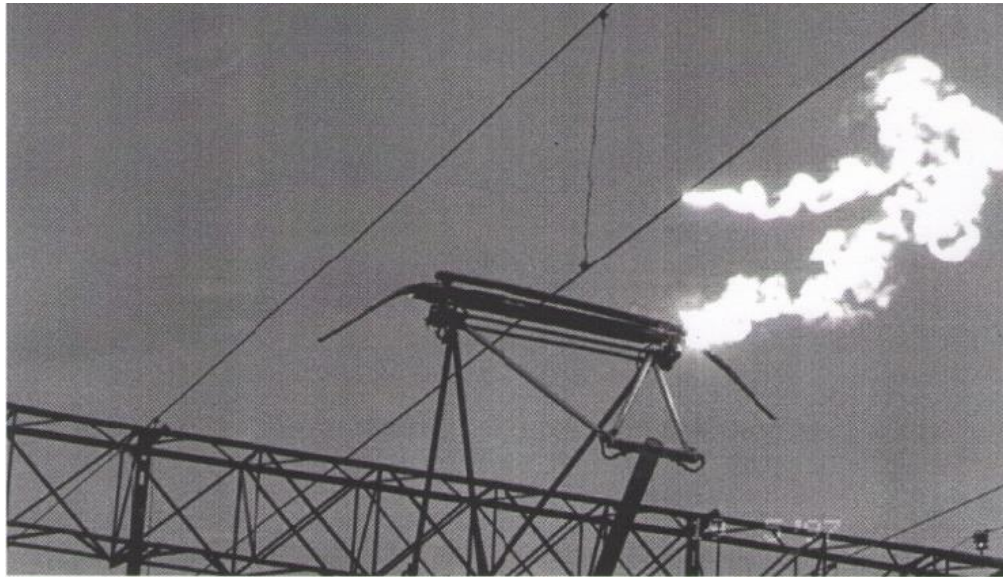


Рис. 1. Фото електричної дуги, що виникає під час ожеледиці на контактній мережі.

Щодо технічного об'єкту припускаємо, що у будь-який момент часу t його стан характеризується параметром діагностики $x(t)$. Що стосується, наприклад реле систем ЗАТ, параметр l являє собою спільний хід контактів, що визначає ресурс приладу. Аналогічно, параметром діагностування рейкового ланцюга є граничний опір ізоляції рейкової лінії $R_{ип}$. Оцінка необхідного параметру $R_{ип}$ для розрахунків процесу зношування приладу або працездатності описується системою диференціальних рівнянь. Тут оцінку параметрів імпульсів перехідного тягового струму, виконали методом осцилографування та розкладання кривої струму в ряд Фур'є, при цьому встановлено співвідношення амплітуди першої гармоніки та постійної складової тягового струму електровоза, що визначається коефіцієнтом $K_C = 0.18 - 0.21$ (нижче наведено приклад розрахунку).

3. Розглянемо варіант розв'язання нелінійного рівняння розрахункової схеми

Було запропоновано метод розв'язання нелінійного рівняння розрахункової схеми, що включає елементи силової ланцюга електровоза та рейковий ланцюг системи електричної централізації [6]. Сутність методу у тому, що він побудований широкому використанні операторного перетворення Лапласа для систематизації лінійної частини нелінійної завдання. І головне, метод представляє розв'язання нелінійної частини завдання у вигляді експоненційного ряду, що дає можливість застосувати перетворення Лапласа і на нелінійні процеси в задачі, що описується. І ще додамо за методом. Вважаємо, що є функція $Y(i)$ і диференціальне рівняння, що описують фізичну систему. Зазвичай, функцію, що залежить від часу і струму, представляють у формі ряду Фур'є. Потім над нею можна робити перетворення Лапласа.

Таким чином, розв'язання нелінійної задачі можна розбити на етапи.

- 1) Будують нелінійну функцію з квадратичною характеристикою, складають нелінійне диференціальне рівняння.
- 2) Знаходять рішення для лінійних доданків, як завжди, операторним методом Лапласа.
- 3) Представляють рішення диференціального рівняння у вигляді експоненційного ряду у формі, що містить дійсні числа та показники ступеня.
- 4) Вирішують нелінійну задачу, інтегрують нелінійні доданки, представлені у вигляді експоненційного ряду, використовуючи положення перетворення Лапласа.

Особливо підкреслимо, що в отриманому нелінійному рівнянні вдало узгоджується застосування одиначної функції як обурюючої функції з фізичною одиначною імпульсною функцією часу, і представляє практично повноцінний опис постійного струму електровозу в перехідних процесах при ожеледицях.

з'єднанні рейок у петлі, для тягового струму дорівнює $Z1 = 0.8 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$. Розраховано згідно формули: $Z1 = \frac{Z}{2} + j\omega M12$ [5]. Хвильовий опір рейкової лінії $Z_{\text{ВОР}} = 1.06 \text{ Ом}$ при питомому опорі рейкового ланцюга $Z_{\text{PO}} = 0.8e^{j65^\circ} \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$. Напруга джерела ЕРС частотою 50 Гц $E(u) = 147 \cdot 0.29 = 42.6 \text{ В}$, а постійного струму - $42.6 \cdot 0.2 = 8.52 \text{ В}$. Ланцюг живлення силового приводу електровоза, як правило, закінчується хвильовими опорами рейкових ліній (див. рис. 2 а, б). Режим холостого ходу рейкового ланцюга, що примикає ліворуч до дросельного пункту ДП, забезпечується при умовному відключенні від рейки кінця нижньої силової обмотки дросель - трансформатора. При цьому напруга холостого струму розрахункової схеми становитиме $U_{\text{ХХ}} = I_{\text{Э}} \cdot Z_{\text{ВХ}} = 43 \text{ В}$, струм короткого замикання $I_{\text{КЗ}}$ приблизно дорівнює струму електровоза, а внутрішній опір $\frac{U_{\text{ХХ}}}{I_{\text{КЗ}}=0.29} \text{ Ом}$.

4. Про метод вирішення задачі-прикладу

Розрахунок струму електровоза при ожеледцях і його вплив на рейковий ланцюг проведемо в два етапи.

На першому, використовуючи метод розв'язання диференціального рівняння силового ланцюга електровоза, знаходимо величину постійної складової струму, що намагнічує шляхові ДП.

На другому етапі, використовуючи результати кількісної оцінки струмів намагнічування ДТ, коригуємо коефіцієнти чотирьохполосників ДТ і розраховуємо передачу енергії сигнального струму в ланцюгу колійного приймача колії.

У розрахунках схема релейного кінця рейкового ланцюга перетворена на простий за формою послідовний ланцюг для отримання диференціального рівняння (рис. 2.а, 2.б). Елементи цієї схеми є двополюсниками: 1 – джерело напруги $e(t) = Eu(t)$, що має форму одиничної ступінчастої функції з амплітудою $E(t)$; 2 – нелінійний опір ланцюга намагнічування ДТ-1-150; R- лінійний опір вхідної схеми релейного кінця рейкового ланцюга. При цьому джерело струму силового ланцюга електровоза перетворено, відповідно до теореми про еквівалентний генератор, в джерело ЕРС $Eu(t)$ [1].

Розрахунки рейкового ланцюга нижче виконані при двох значеннях струму електровоза - до 300А та вище від цього значення. Роз'яснення полягає в тому, що рівень величини постійної складової тягового струму, яка насичує магнітопровід ДТ-1-150 при асиметрії в умовах ожеледних відкладень та виникненні електричної дуги на струмознімачі електровоза, може перевищити критичні пороги намагнічування колійних дроселів типу ДТ-1-150 струму в ланцюзі електровоза.

Знаходження рівня постійного струму отриманого рішення змінного проводиться з використанням співвідношення, що визначається коефіцієнтом $K_C = 0.18 \div 0.21$, згаданим вище.

Якщо амплітуду гармоніки частотою 50 Гц прийняти 600 А, то постійна складова досягне - $I_0 = 600 \cdot 0.2 = 120 \text{ А}$, а струм підмагнічування ДТ складе $I_{\text{ДТ}} = 120 \cdot 0.12 = 14.4 \text{ А}$, що істотно перевищує граничний струм (9 А), який зумовлює відмови системи (тут 0.12 - коефіцієнт асиметрії постійного струму рейкової лінії).

5. Перейдемо до розв'язання прикладу запропонованим методом

Залежність поточкозчеплення від струму в сердечнику ДТ визначається функцією:

$$\psi = \alpha_1 i_L - \alpha_2 i_L^3, \quad (1)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти апроксимації функції ($\alpha_1 = 32.28 \cdot 10^{-3} \text{ Омс}$, $\alpha_2 = 0.312 \cdot 10^{-3} \text{ Омс}$).

Диференціальне рівняння системи має вид:

$$Eu(t) = \frac{d\psi}{dt} = (L + \alpha_1) \frac{di_L}{dt} - \alpha_2 \frac{d(i_L^3)}{dt} + R_e i_L. \quad (2)$$

Струм електровоза i_3 виражається формулою [6]

$$i_3 = A \sin(\tau) + e^{-\xi t}(\varepsilon_3 - B) + \varepsilon_3 e^{-\xi t}(C - D \cos(\tau)). \quad (3)$$

Рівняння (2) зручно переписати в операторній формі:

$$Eu(t) = (L + \alpha_1)\rho + R_e i_L + \alpha_2 \rho[i_L^3]. \quad (4)$$

Рівняння (2) розв'язано методом, який дозволяє привести нелінійне рівняння до лінійного. Крім цього, застосування методу до певної міри дозволяє скористатися перевагами алгебраїчних властивостей операторів, що можна помітити у прикладах, які наводяться нижче. Також прийнято спрощення для практичного рішення, а саме: $L = 0$, $R_e = R$.

Лінійна частина розрахункової схеми (рис. 2.б) систематизується, як згадувалося, за допомогою перетворення Лапласа [2].

Зупинимося на методику розв'язання нелінійного завдання. Готового способу розв'язання такої задачі в цілому, як це має місце з лінійним диференціальним рівнянням, не дається [12]. Надалі подано рішення нелінійних диференціальних рівнянь типу (5) у вигляді експоненційного ряду (6), коли перетворення Лапласа поширюється і на нелінійні процеси задачі. Передбачається, що розв'язування диференціального рівняння, що містить невідому функцію $x(t)$, може бути виражено статечним рядом.

При цьому нелінійний елемент розрахункової схеми задається вольтамперною характеристикою (1), яка залежить від струму. Спочатку треба визначити функції доданків коефіцієнтів, що входять у статечний ряд рішення (2) і величини коефіцієнтів $A_1(t)$ и $A_3(t)$. Сума коефіцієнтів є миттєвим значенням розрахункового змінного струму, що протікає через нелінійний опір при впливі на ланцюг обурюючої одиничної функції $Eu(t)$. Помножуючи потім отриману величину суми на коефіцієнт K_C знаходимо потрібне значення постійного струму в ланцюзі.

У загальному вигляді рівняння (2) є окремим випадком рівняння, представленого у формі:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n(\rho) y^n = k\varphi(t), \quad (5)$$

де α – функція оператора диференціювання ρ .

Рішення такого рівняння передбачається у формі:

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} A_n k^n. \quad (6)$$

Підстановка (6) в (5) призводить до системи лінійних рівнянь для визначення коефіцієнтів, перші три з яких наводяться нижче, наступні – вказані, наприклад, у джерелі [12]:

$$A_1 = \frac{1}{\alpha_1} \varphi(t); A_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} A_1^2; A_3 = -\frac{1}{\alpha_1} (2\alpha_2 A_1 A_2 + \alpha_3 A_1^3). \quad (7)$$

При порівнянні (6) з основною формою рівняння (5) видно, що

$$\alpha_1(\rho) = -(\rho\alpha_1 + V_H); \alpha_2(\rho) = 0; \alpha_3(\rho) = \alpha_2\rho; k = 1; \varphi(t) = Eu(t).$$

З рівності (6) можна визначити, що коефіцієнт $A_2 = 0$, тому що $\alpha_2 = 0$; для коефіцієнта A_3 знаходимо:

$$A_3 = -\frac{\alpha_3 A_1^3}{\alpha_1}. \quad (8)$$

Визначаючи значення коефіцієнтів $A_1(t)$ и $A_3(t)$, отримуємо шукану величину струму в обмотці ДТ-1-150:

$$i(t) = A_1(t) + A_3(t). \quad (9)$$

Значення першого коефіцієнта запишемо у вигляді $A_1(t) = \frac{1}{\rho\alpha_1 + R} Eu(t)$, а в операторній формі отримаємо:

$$L[A_1(t)] = \frac{\frac{E}{R_e}}{s} + \frac{\frac{-E}{R_e}}{s + \left[\frac{R}{L + \alpha_1}\right]}. \quad (10)$$

Взявши зворотне перетворення від виразу (10), маємо:

$$A_1(t) = \frac{E}{R_e} \left[1 - e^{\left(-\frac{Rt}{L + \alpha_1}\right)} \right]. \quad (11)$$

Нехай $e^{\left(-\frac{Rt}{L + \alpha_1}\right)} = e^{-gt}$, та R_e - захисний опір у схемі рейкового ланцюга; $g = \frac{R}{L + \alpha_1}$; t - функція часу; L - індуктивність дросель-трансформатора, прийнята $3.18 \cdot 10^{-3}$ Гн. Тоді:

$$A_1^3(t) = \left(\frac{E}{R_e}\right)^3 (1 - 3e^{-gt} + 3e^{-2gt} - e^{-3gt}).$$

Взявши перетворення Лапласа для $A_1^3(t)$, потім повне зображення $L[A_3(t)]$ і зворотне перетворення від отриманого виразу цієї функції, отримаємо:

$$A_3^3(t) = \frac{\alpha_2}{L + \alpha_1} \left(\frac{E}{R_e}\right)^3 (-4.5e^{-gt} + 3gte^{-gt} + 6e^{-2gt} - 1.5e^{-3gt}). \quad (12)$$

Нагадаємо, що $A_1(t)$ визначається (9), яке можна записати у вигляді:

$$[(\rho\alpha_1 + R_e)]A_1(t) = Eu(t).$$

З урахуванням початкового струму рівняння (12) перетворюється на вигляд:

$$[(L + \alpha_1)\rho + R_e]L[A_1(t)] = \frac{E}{\rho} + (L + \alpha_1)[i(0)_+] = \frac{E}{R_e} [1 - e^{-gt}] + [i(0)_+]e^{-gt}, \quad (13)$$

де: $g = 6.51 \frac{1}{c}$ постійна часу.

Особливістю розрахунку (2), що згадувалося вище, є відшукування напруги джерела ЕРС шляхом перетворення ланцюга живлення електровоза. Крім того, при вирішенні рівняння запропонованим методом скористаємося перевагами комп'ютеризованих розрахунків: розкладання в ряд Фур'є кривої імпульсу перехідного струму в силовому ланцюзі електровоза та співвідношення постійної складової та основної гармоніки спектру струму, що встановлюється коефіцієнтом K_c , ($K_a = 0.12$ - коефіцієнт асиметрії рейкової лінії постійного струму). Граничний струм намагнічування ДТ-1-150 в межах 6 – 10 А, що викликає відмову систем. Тому рішення рівняння (2), слід вести з урахуванням те, що з напруги імпульсу джерела ЕРС $Eu(t)$, при якому рівні шуканих струмів перевищують граничний струм (зазвичай вище 300А).

При розрахунках рівняння (2), збільшуючи струм електровоза в широкому діапазоні, слід коригувати параметри $g(t)$ згасання та ЕРС $Eu(t)$ за виразами (3) та (10). Великий вплив на величину струму у вирішенні рівняння надає тривалість тимчасової функції (за спостереженнями, краще $T < 2-3$ періодів частоти 50 Гц в перехідний період тягового струму), що підтверджують досліди розрахунків.

Продовжимо далі про методику розрахунку. Використовуючи рис. 2 визначається опір ізоляції рейок, за звичайними формулами для паралельно включених елементів: $R_{\text{и}} = 0.32 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ (опір заземлення опор та одиночної рейки); знаходиться сумарний тяговий струм, що протікає по двох ланцюгах в землю - по хвильовому опору правої рейці рейкового ланцюга і по одиночній рейці лівої. Виявилось, що при заданому, наприклад, зворотному струмі електровоза 450 А струм в одиночному рейці 318 А, а амплітуда ЕРС обурюючої функції $Eu(t) = 318 \cdot 0.32 = 102$ В (по змінному струму), по постійному струму отримуємо $Eu(t) = 102 \cdot K_C = 102 \cdot 0.18 (\dots 0.21) = 18.36 (21.42)$ В, а параметр $\left(\frac{E}{R}\right)^3 = (30.6 \dots 35.7)$ в формулах (8-10).

Приклади розрахунку коефіцієнтів (11) $A_1(t)$ и (12) $A_3(t)$. №1. Вихідні дані: струм електровозу 150А, хвильовий опір рейкової лінії $Z_B = 0.89e^{j32.5^\circ} \text{Ом}$, отримано з урахуванням опору ізоляції рейкової лінії 1,4 Ом · км, ізоляції $R_{\text{и}} = 0.4 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ опор контактної мережі (опір опори 20 Ом) для періоду ріка с повторюваними ожеледицями [4], при цьому вхідний опір рейкової лінії 0,29 Ом; індуктивність цепи ДТ-1-150 0,004 Гн, опір $R_e = 0,6 \text{ Ом}$, параметр $g = 18,7 \frac{1}{\text{с}}$. Величина ЄРС $Eu(t) = 8,55$ В (знайдено вище). Прийемо відрізок тривалості імпульсу перехідного процесу (горіння дуги на струмозйомнику) 0,02 с. Підстановка параметрів (9) дає результат $A_1(t) = \frac{8.55}{0.6} (1 - e^{-0.37}) = 4.45$ А.

Нагадаємо, що отриманий постійний струм є наслідком асиметрії рейкової лінії при ожеледицях. Величина постійного струму врахована при розрахунку обурювальної ЕРС. Розрахунок коефіцієнта $A_3(t)$ при струмі 150 А дає результат 6,9 А, сумарний струм рішення рівняння (10) склав 11,35 А, а струм намагнічування $11.35 \cdot 0.12 = 1.362$ А.

№2. Струм електровоза 450 А. ЄРС $Eu(t) = 16.8$ В, струм в точці зйому ЕРС (рис. 2а) достиг 318 А, параметр $gt = 0.37$. Розрахунок коефіцієнта $A_1(t)$ для цього струму виконано при тих же параметрах схеми, що використані при розрахунку вище $A_3(t)$. Разом з тим, скажемо, що входить у другий множник у дужках третього ступеня ЕРС, знижена в коефіцієнт $K_C = 0.18 (0.21)$ раз. Отримано, що ЕРС $Eu(t) = 93.4 \cdot 0.18 = 16.8$ В, а коефіцієнт (число у дужках при експоненте 0.278)

$$A_3(t) = \frac{0.312}{0.004 + 32.3} \left(\frac{16.8}{0.6}\right)^3 (-4.5e^{-0.38} + 3gte^{-0.38} + 6e^{-0.76} - 1.5e^{-1.14}) = 39 (64) \text{ А}$$

6. Уточнена методика розрахунку

Вище зазначалося, що при максимальному струмі електровоза (3) $I_0 = 600 (K_C = 0.20) = 120$ А, струм підмагнічування ДТ $I_{\text{ДТ}} = 120 (K_a = 0.12) = 14.4$ А, що значно перевищує граничний струм намагнічування, що викликає відмови системи.

Важливо, що отримане співвідношення постійної складової струму, в наведеному розрахунку при струмі електровоза 450 А, складає $K_C = 0.106$, що близько до відносного значення коефіцієнта K_C .

На другому етапі розв'язання задачі результати рішення рівняння (2) використовуються для коригування величин коефіцієнтів чотирьохполюсників дросель-трансформаторів рейкового ланцюга, що підмагнічуються імпульсами постійного струму в умовах ожеледиці. Постійна складова імпульсу ЕРС перешкоди зі зростанням коефіцієнта асиметрії і потокозчеплення зростає, істотно зменшуючи опір ланцюга намагнічування сигнальному струму 25Гц фоточутливої рейкової ланцюга, що розглядається тут. Так, номінальний опір холостого ходу [7,9] ДТ-1-150 визначається формулою:

$$Z_{\text{ХХ}} = \frac{A_P}{C_P} = \frac{0.333}{0.49e^{-70^\circ}} = 0.678e^{j70^\circ}, \quad (14)$$

де A_P, C_P – коефіцієнти чотириполюсника схеми заміщення ДТ рейкового ланцюга.

Розмір нижньої межі цього опору є розрахунковою при згаданих струмах намагнічування, що приводять приймач рейкового ланцюга в стан «зайнято». Використовуючи змінні входні опори на сигнальній частоті, шукають коефіцієнти 4-х полюсників ДТ за величинами опорів і струму ланцюга намагнічування, при яких індукція в сталі магнітопроводу перевищує поріг насичення [8,9].

Отримані таким чином коефіцієнти чотирьохполюсників дросель-трансформаторів використані в розрахунках рейкового ланцюга з метою оцінки впливу перешкоди тягового струму на режими роботи рейкового ланцюга при ожеледцях.

Скористаємося спрощеною розрахунковою схемою заміщення (рис. 3) досліджуваного рейкового ланцюга [5,7] з параметрами:

$$Z'_H = \frac{Z_H}{n_{\text{ИТ}}^2} = \frac{1015e^{j5^\circ}}{18.3^2} = 2.98e^{j5^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z''_H = \frac{Z'_H}{n_{\text{ДТ}}^2} = 0.33e^{j5^\circ} \text{ Ом};$$

$$R'_H = \frac{R_H}{n_{\text{ДТ}}^2} = \frac{2.2}{9} = 0.244 \text{ Ом};$$

де: Z_H – опір релейного навантаження, Z'_H – приведений опір релейного навантаження; $n_{\text{ИТ}}$, $n_{\text{ДТ}}$ – коефіцієнти трансформації ізолюючого та дросель-трансформаторів; R_H , R'_H – опір обмежувача та його наведений опір у схемі живильного кінця рейкового ланцюга; I_H – робочий струм приймача.

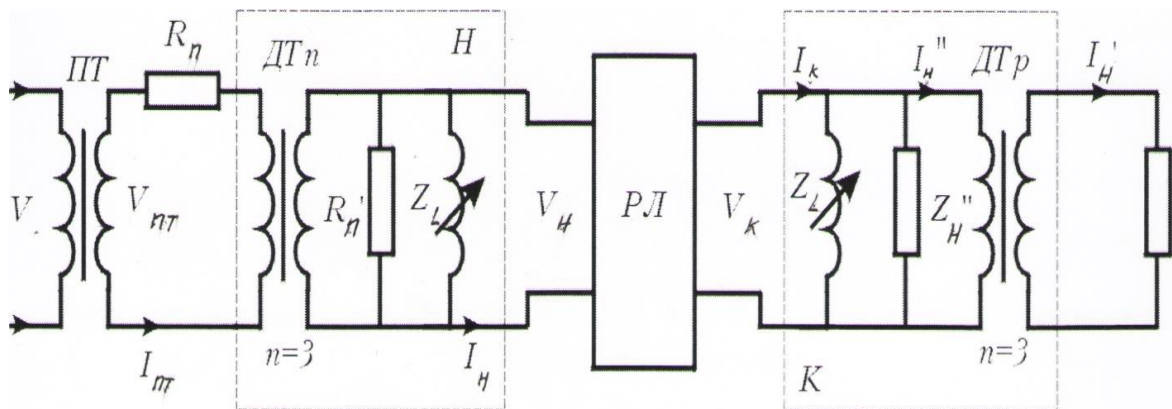


Рисунок 3. Розрахункова схема заміщення рейкового ланцюга.

Вхідний опір релейного кінця (рис. 3) $Z_{\text{ВХК}} = \frac{Z''_H \cdot Z_L}{Z''_H + Z_L}$ Ом, і складо при максимальному струмі підмагнічування $0.3e^{j17^\circ}$ Ом (Z_L на частоті 25 Гц 0.68 Ом), при мінімальному струмі – $Z_L = 0.69e^{j75^\circ}$ Ом. При цьому відносна зміна вхідного опору релейного кінця складала 0.39 Ом (згідно норм проектування И-89-78 систем автоматики, телемеханіки – 0,05 Ом [13])

$$g \cdot Z_{\text{ВХК}} = \frac{Z_{\text{ВХК max}} - Z_{\text{ВХК min}}}{Z_{\text{ВХК max}} + Z_{\text{ВХК min}}} = 0.39 \text{ Ом}.$$

7. Тепер звернемося до оцінки струму перешкоди в ланцюзі намагнічування живлячого ДТ

За розрахунковою схемою заміщення рейкового ланцюга (рис. 3) приблизно визначимо при $\varphi_0 = 0$, $\varepsilon = 0.025$ і $\psi_m = 110$ Вс. Виявилося, що струм підмагнічування живлячого ДТ, перевищує 11 А. При таких струмах опір холостого ходу живлячого ДТ, на частоті $\Omega = 25$ Гц знижується до 0.22 ... 0.24 Ом.

Таким чином, при дії перешкоди максимальна зміна входних опорів по кінцях колії перевищує $\geq 39\%$. Отриманий результат перебуває у добрій згоді з розрахунковими значеннями тягового струму (табл.1).

8. Результати досліджень. Оцінка меж зміни напруги

Для оцінки меж зміни напруги на колійному приймачі досліджуваного рейкового ланцюга розраховані напруги трансформатора, що живить.

Розрахунок двониткового рейкового ланцюга з колійним реле ДСШ–13А (рис. 3) при вихідних даних [6]: робоча напруга на колійному елементі реле ДСШ–13А $15e^{j72^0}$ В; робочий струм реле – 0,038 А; максимальний опір жив кабелю на релейному кінці $R_K=75$ Ом; опір шляхового реостата $R_{\Pi}=2.2$ Ом; коефіцієнт трансформації ізолюючого трансформатора $n_{\Pi T}=18.3$, коефіцієнти рейкового чотириполюсника при питомому електричному опорі ізоляції 1 Ом/км $A = D = 1.25e^{j14^0 10'}$, $B = 0.65e^{j57^0}$, $C = 1.3e^{j5^0} \frac{1}{\text{Ом}}$. Коефіцієнти чотирьохполюсників схем заміщення ДТ1 та шляхових трансформаторів типу ПРТ взяті з [9].

Результати розрахунків напруг живлячого трансформатора рейкового ланцюга при крайніх значеннях струмів підмагнічування ДП поміщені в табл.1, в якій наведені значення електричних параметрів ланцюга довжиною 0.40 км згідно нормальям РЦ 25–ЭТ50 (АЛС 25, 75) – С–88.

Таблиця 1. Результати розрахунків напруг живлення та дорожнього приймача

Режим ДТ1								
U_K , В	I_K , А	U_H , В	I_H , А	$U'_{\Pi T}$, В	$I'_{\Pi T}$, А	β	$U_{\Pi E}$, В	Стан реле
Без підмагнічування								
0.33	1.22	0.58	1.56	4.54	0.75	2.0	15.6	1.0
$I_0 < 10\text{А}$								
0.36	1.25	0.66	1.6	8.6	1.1	9.0	8.2	1.0
$I_0 < 20\text{А}$								
0.38	1.69	0.68	1.62	12.0	2.27	36.0	5.88	0

Видно, що максимальне зниження напруги на колійному приймачі рейкового ланцюга при дії перешкоди перевищує 50 ... 60 %. Цього цілком достатньо для перемикаання показань світлофорів з вогнів, що дозволяють, на забороняючі.

Висновок

Наприкінці відзначимо прийнятність описаного авторського методу на вирішення електротехнічних нелінійних проблем у системах автоматики і телемеханіки.

Список літератури:

- 1) Г. П. Балан, П. О. Кравченко, Ю. Ф. Свергун, О. Є. Щербаков (2007) *Теоретичні основи електротехніки : [підруч.]* К. : Інтас.
- 2) . Hughes, W. L. (William Lewis). (1960). *Nonlinear electrical networks*. New York: Ronald Press.
- 3) Разгонов С.А. (2011) *Підвищення надійності роботи рейкових ланцюгів* (автореф. дис. к.т.н., ДІПТ. Дніпропетровськ. Україна).
- 4) Разгонов А.П. (1990) *Методологія підвищення надійності систем залізничної автоматики та телемеханіки* (автореф. дис. д.т.н., ХІПТ. Харків. Україна).
- 5) Вахнін М.И., Пенкін Н.Ф., Покровский М.А (1956) Пристрої СЦБ при електротязі змінного струму. ТЖД.220с.
- 6) В. Х. Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко, Ю. В. Місєєва (2012) *Основи електричної тяги: навч. посібник* . Х.:Харк. нац. акад.міськ. госп-ва.ISBN 978-966-695-246-5
- 7) Даренський О.М., Бугасць Н.В., Вітольберг В.Г., Потапов Д.О., Саяпін О.С., Талавіра

Г.М. (2010) *Експлуатація залізничних колій: Навчальний посібник*. Харків: УкрДАЗТ.

8) Бойко В. С., Бойко В. В., Видолоб Ю. Ф. та ін. (2004) *Теоретичні основи електротехніки : [підруч. для студ. техн. спец. вищ. навч. закл. : У 3 т.] Т. 1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами*. К. : Політехніка.

9) Журавлев А.Ю. (2016) *Підвищення експлуатаційної надійності рейкових ланцюгів полігону ЕТ змінного струму, що примикає до станції стикування* (автореф. дис. к.т.н., ДІТ. Дніпропетровськ. Україна).

10) Жуковицький І.В., Разгонов С.А. (2005) Про підвищення ефективності режимів роботи рейкових ланцюгів . *Інформаційно-керуючі системи на транспорті*. №5/6. 19-22.

11) Корн Г., Корн Т. (1970) *Довідник з математики для науковців та інженерів. Перекладачі Ісаак Араманович, Ісаак Березман, Ісаак Вайнштейн, Лев Румишський*. Наука.

12) Разгонов А.П., Ящук Е.И., Разгонов С.А. (2014) *Параметричний генератор частоти для живлення та захисту навантаження від перешкод . Залізничний транспорт України*. К.-Дн Дц-Уз, 38-41.

13) Методичні вказівки щодо проектування двониткового плану станції И-89-78. (1978) Гіпотрансигналізв'язок.

14) Патент 95486 25.12.2014. Пристрій живлення та захисту апаратури систем залізничної автоматики від впливу атмосферних та комутаційних перенапруг // А.П. Разгонов, А.Ю. Журавльов, К.І. Ящук, О.Ю. Лебедєв, С.А. Разгонов. ДП "Український інститут промислової власності", м. Київ. 2014

15) Патент 98014 10.04.2012. Пристрій електроживлення та захисту від завад апаратури систем залізничної автоматики і телемеханіки // А.П. Разгонов, С.А. Разгонов, В.І. Жадан, А.Ю. Журавльов, К.І. Ящук. ДП "Український інститут промислової власності", Київ. 2012.

Assessment of the influence of traction current on the operation of rail circles in the non-linear mode of operation of choke-transformers

Serghii Razghonov

Department of Transport Technologies and International Logistics / Faculty of Innovative Technologies, University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine
ORCID 0000-0002-1244-2047

Anton Zhuravlev

Department of «Automation and Telecommunications» / Faculty of «Computer Technologies and Systems», Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID 0000-0001-6885-5177

Kateryna Yashchuk

Department of «Automation and Telecommunications» / Faculty of «Computer Technologies and Systems», Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID 0000-0002-8606-5790

Abstract: Modern Ukrzaliznytsia is a complex transport system that has a clear hierarchical structure of construction and combines a large number of interdependent subsystems. Specific tasks of the functioning of individual elements are subject to the common purpose of the functioning of Ukrzaliznytsia as a whole. The article examines the impact of traction current on the operation of rail circles in a nonlinear mode of operation of throttle-transformers, created by traction current in conditions of ice phenomena on the contact network, and lists the reasons for the transition of the throttle-transformer into a nonlinear mode of operation. The issue of increasing reliability is well traced to the development of technical means of automatic management and control of trains on railway transport. In particular, in the development and construction of distillation base systems of

automation and telemechanics (AiT) and Station SCB systems. The share of rail chains falls an exceptional role in ensuring train safety. The measurements found that the main reason for failures of the signaling, centralization and lock systems of the SCB during the ice on the contact network are the impulses that occur, a constant component of current in the traction current spectrum, which magnetizes the magnetic pipelines of the throttle-transformers; Some parameters of reliability of AIT devices and their impact on the performance of railway tracks are given. For the first time in the industry, the method of solving a nonlinear differential equation of the rail circle is presented with the example of calculating the real rail track of the LCD. This method, through the submission of the solution in the form of an exponential series, allows for an extension of the transformation of Laplace into nonlinear processes observed in the physical system of electrical rail circuits. Thus, the method makes it possible to bring the resulting equation to a linear appearance and to solve it by conventional methods.

Keywords: traction current, rail circuit, differential equation of choke-transformer, operating mode, operational indicators.
