

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.259.12

А. Ю. ЖУРАВЛЬОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067 0 990 76 51, ел. пошта anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

ПРО МЕТОД РОЗРАХУНКУ РЕЙКОВИХ КІЛ ІЗ УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНЕТИКІВ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЗАВАД ТЯГОВОГО СТРУМУ

Мета. У роботі необхідно дослідити електромагнітні процеси в дросель-трансформаторі з метою підвищення завадостійкості рейкових кіл (РК) та, як наслідок, підвищення безпеки руху на залізниці. **Методика.** Для досягнення поставленої мети застосовано методи наукового аналізу, математичного моделювання, експериментального дослідження, масштабного моделювання. **Результати.** Розглянуто перешкоди, що впливають на нормальну працездатність рейкових кіл. Значною мірою частина пошкоджень у рейковому колі доводиться на відмову в його апаратурі. Апаратура рейкового кола підключена безпосередньо до рейкової лінії, схильної до впливу перешкод тягового струму, які викликають у них зміну електричних характеристик та електромагнітних властивостей. Нормальна працездатність при виконанні основних режимів роботи рейкового кола визначається попереднім розрахунком її характеристик та складанням регулювальних нормативних таблиць. Проаналізовано класичний метод визначення параметрів рейкового ланцюга. Класичний метод розрахунку передбачає подання окремих ділянок електричної схеми рейкових кіл чотириполісниками з відомими коефіцієнтами, зазвичай в А-формі. Відшукування коефіцієнтів схем із лінійними елементами не представляє метрологічних та математичних труднощів. Разом із тим, у ланцюгах, що містять нелінійні феромагнетики (ФМ), отримання коефіцієнтів на всьому діапазоні зміни індукцій у сердечниках – досить важке завдання, оскільки класичні методи холостого ходу (ХХ) та короткого замикання (КЗ) стають неприйнятними. Це призводить до ускладнення методів визначення, як модуля, так і аргументів коефіцієнтів чотириполісників. Замість класичного методу запропонований метод розрахунку рейкового кола з урахуванням нелінійної характеристики феромагнетиків. **Наукова новизна.** У статті розглянуто новий підхід до розрахунку рейкового кола з урахуванням втрат у феромагнетиках без пошуку коефіцієнтів чотириполісників схеми заміщення. При побудові моделі перемагнічування ФМ у паралельних магнітних полях найбільш точними є апроксимаційні методи, що враховують не тільки зміни величин b і h у часі, а ще й їх похідні. З розвитком обчислювальної техніки та програмного забезпечення математичні методи розрахунку РК при значній зміні індуктивності феромагнетиків, включаючи ділянки насичення, стають реальними. При цьому важливим є пошук апроксимуючого аналітичного виразу, що описує динамічну граничну петлю гістерезису (ПГ). **Практична значимість.** Проведено аналіз зміни електричних параметрів одного й того ж РК при розрахунку класичним і новим методом: різниця склала не більше 10 %. Наведено деякі заходи з підвищення експлуатаційної завадостійкості РК.

Ключові слова: рейкове коло; дросель-трансформатор; чотириполісник; феромагнетик; гістерезис; спектр; вихрові струми; магнітна в'язкість; крива намагнічення; моделювання

Вступ

Досвід експлуатації показав, що за певних умов і режимів роботи тягової мережі створюється вплив потужних завад тягового струму на роботу електричних рейкових кіл (РК). Результатом такого впливу є намагнічування нелінійних феромагнетиків (трансформатори, дросель-трансформатори та елементи, які містять феромагнітне осереддя) в схемах РК і, як наслідок,

відмови РК і систем СЦБ. Неприятливі умови [11, 12, 13] для роботи РК створюються у випадках:

- 1) при певній схемі комутації тягової мережі постійного струму станцій стикування у рейкової мережі підвищується рівень потенціалів постійного тягового струму «рейка-земля». У результаті зростають **струми витоку** в перегінній колії електротяги змінного струму,

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

що викликає намагнічування дросель-трансформаторів і колійних трансформаторів, і порушення роботи коротких (менше 500 м) рейкових кіл;

2) на ділянках електрифікованих доріг змінного струму при ожеледиці на контактній мережі на струмоприймачі створюється електрична дуга, що супроводжується електричним перехідним процесом у силовому колі електро-воза. Постійна складова цього струму при асиметрії рейкової лінії також викликає насичення феромагнетиків;

3) при включенні головного вмикача ГВ електровоза в певній фазі напруги живильної мережі в колії також виникає перехідний процес з наслідками, наведеними вище;

4) при в'їзді навантаженого електровоза в зону нейтральної вставки на струмознімачі виникає кілька електричних дуг, які аперіодично повторюються і це призводить, як зазначалося вище, до виникнення перехідних процесів і відмов РК. З викладеного випливає, що підвищення заводостійкості рейкових кіл систем СЦБ в умовах впливу зворотного постійного тягового струму є актуальною науково-технічною проблемою.

Мета

Розглянути причини заважаючого впливу тягового струму на роботу РК, створити методику розрахунку РК з нелінійними феромагнетиками (ФМ) і висунути технічні рішення для підвищення надійності роботи РК і систем залізничної автоматики.

Методика

Порушення нормальної роботи РК. Зупинимося на одній із причин порушення нормальної роботи РК – поздовжньої асиметрії рейкових ліній. Вимірювання показують, що величина коефіцієнта асиметрії є найбільшою взимку через підвищення опору ізоляції. Встановлено, що розподіл опору струмопровідних стиків найкраще може бути апроксимованим несиметричним законом Вейбула, розкид опорів досягає 1,8–15 м.д.р. (метрів цілої рейки); коефіцієнт поздовжньої асиметрії коливається від 10 до 12 % – влітку, до 18 % – взимку [1, 6].

З рівняння для ЕРС по контуру схеми заміщення рейкового кола (рис. 1), складеної з двох рейок, опорів апаратури $Z'_{ВХН}$, $Z_{ВХК}$ і дросельних перемичок, для різниці струмів можна записати вираз:

$$\Delta I = \frac{\Delta Z' + 2(R_{ДП1} - R_{ДП2})}{\left[Z + Z'_{ВХН} + Z_{ВХК} + 2(R_{ДП1} + R_{ДП2}) + Z_{ДР} \right]} I_{ЭЛ}, \quad (1)$$

де $I_{ЭЛ}$ – струм електровоза; $\Delta Z = Z_1 - Z_2$ – різниця опорів рейок, Ом; Z – опір рейкової петлі, Ом/км; $Z_{ДР}$ – опір основної обмотки ДТ.1, Ом; $R_{ДП(2)}$ – опір дросельних перемичок, Ом.

Із (1) випливає, що $Z'_{ВХН}$, $Z_{ВХК}$ здійснюють симетруючу дію, проте їх опори для сигнального струму за умов контролю цілісності рейки невеликі, і ними можна знехтувати.

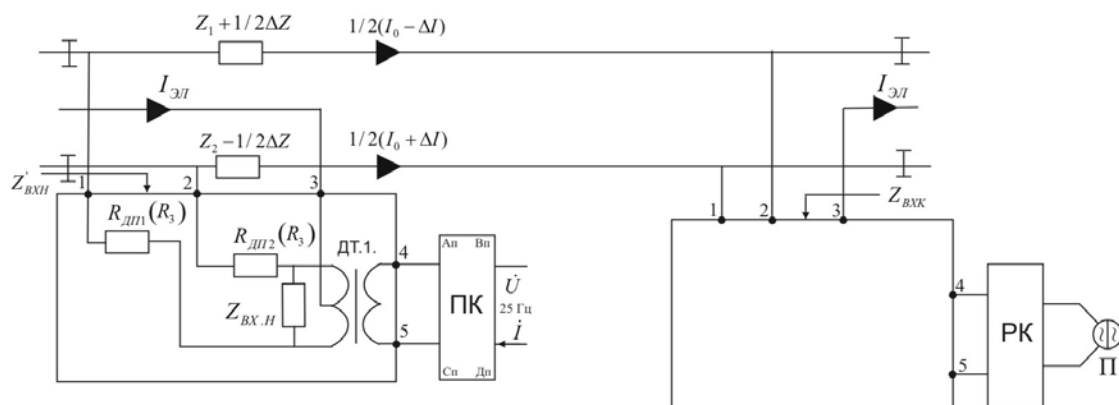


Рис. 1. Схема заміщення рейкової лінії

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Для постійного струму рівняння (1) можна записати так:

$$\Delta I = \frac{\Delta R_{CC} + 2(R_{ДП1} - R_{ДП2})}{R_p + 2(R_{ДП1} + R_{ДП2}) + R_{ДР}} I_{ЭЛ},$$

або

$$\Delta I = K_a \cdot I_{ЭЛ}. \quad (2)$$

Звідки коефіцієнт поздовжньої асиметрії рейкової лінії дорівнює:

$$K_a = \frac{\Delta R_{CC} + 2(R_{ДП1} - R_{ДП2})}{R_p + 2(R_{ДП1} + R_{ДП2}) + \Delta R_{ДР}}, \quad (3)$$

де ΔR_{CC} – різниця опорів рейок за рахунок опорів з'єднувачів.

В коротких РК (менше 500 м) поздовжня асиметрія є однією з головних причин асиметрії тягового струму $K_a = I_1 - I_2 / I_1 + I_2$, де $I_{1,2}$ – тягові струми у рейках 1 та 2.

Вимірювання показують, що опір сталевих рейкового з'єднувача постійному струму розподілено між його складовими так [4, 3]:

$$R_{CC} = R_{ТР} + (R_M + R_{СВ}) = \frac{2}{5} R_{CC} + \frac{3}{5} R_{CC},$$

де R_M – опір переходів манжети – трос; $R_{ТР}$ – опір сталевих троса; $R_{СВ}$ – опір зварного шва.

Для з'єднувача зі сталі перерізом 100 мм², що широко використовується у практиці, виявилось, що середні величини $R_{ТР} = 295$ мкОм; $R_M + R_{СВ} = 437$ мкОм; $R_{CC} = 232$ мкОм; для з'єднувача перерізом 90 мм² – $R_{CC} = 770$ мкОм [8].

Правила по захисту металевих споруд від корозії блукаючими струмами допускають збільшення опору рейок за рахунок стиків не більше ніж на 20 %, тоді коефіцієнт асиметрії по постійному струму $K_a = \Delta R / R_p = 0,12 - 0,13$. Наближений розрахунок асиметрії для тягового змінного струму виконаємо при допущеннях [3, 8]:

- опір рейок відрізняється між собою на величину опору з'єднувачів;
- втрати у з'єднувачах не залежать від частоти;
- опір в місцях зварювання і переходів трос – манжета – штепсель – рейка залежить від

частоти в такій же мірі, як і внутрішній опір рейок.

– при цьому мінімальний коефіцієнт поздовжньої асиметрії:

$$|K_Z| = K_a \left| \frac{R_{ТР}}{R_C \cdot Z} + \frac{(R_M + R_{СВ}) Z_i}{R_C \cdot Z} \right| \leq \leq 0,008 \%, \text{ або } > 8,0 \%, \quad (4)$$

де Z_i – внутрішній опір рейок, $0,35e^{i35}$ Ом/км; опір рейкової петлі $R_p = 0,1$ Ом; $Z = 0,8e^{i65}$ Ом/км – опір рейок струму 50 Гц. Для більш високих частот коефіцієнт $|K_Z|$ знижується до 1,608 % для частоти 420 Гц і до 1,376 % при 780 Гц.

Виконаємо оцінку чисельника дроби (3) для РК довжиною 0,25–0,5 км, що найчастіше відмовляють. Прийемо, що $R_{CC} = 770 \cdot 10^{-6}$ Ом, $R_{ДП1} = 8000 \cdot 10^{-6}$ Ом ($\ell_{ДП} = 3,25$ м), $R_{ДП2} = 3076 \cdot 10^{-6}$ Ом ($\ell_{ДП} = 1,25$ м), рейкова ланка 25 м, опір рейок 0,1 Ом/км, $n_{СТ} = \ell_{РЦ} / 0,025 - 2$. Виявилось, що $\Delta R = 0,026 - 0,056$ Ом, а величина K_a знаходиться в межах 30,2–38,6 %. Зауважимо, що опір нитки довжиною 300 м струму 50 Гц не перевищує 0,1 Ом/км і з'єднаний із сумарним опором контактних з'єднувачів «трос–штепсель–манжета–вусовик ДТ» (норма 60–80).

Зупинимося на запропонованій методиці розрахунку РК при нелінійних режимах ФМ схем РК, побудованій з використанням математичної моделі переміщення феромагнетиків [2, 4].

Наукова новизна та практична значимість

Математичний опис моделі. Прийемо, що при насиченні феромагнетиків індукція (напруженість) магнітного поля осердя ДТ.1.150 змінюється по складному закону

$$b = b_0 + \sum_{k=1}^m \left[b_{k \sin} \sin(k\omega t) + b_{k \cos} \cos(k\omega t) \right], \quad (5)$$

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

де $k = 1, 2, \dots, m$, і вимірювання коефіцієнтів чотириполюсників відомими методами ХХ і КЗ є занадто важкими [2].

Відомо, що при циклічній зміні зовнішнього магнітного поля індукція, що виникає у феромагнетику, відстає по фазі від напруженості і дає цикл динамічної петлі гістерезису (ПГ) (рис. 2,(а)). Площа ПГ характеризує втрати потужності від перемагнічування, вихрових струмів і від магнітної в'язкості [3].

Математична модель, що досить точно описує дослідну ПГ, має вигляд:

$$h = \left(A e^{-\gamma^2 b m^2} \right) \alpha_1 \sinh(\beta_1 b) + \alpha_2 \frac{db}{dt} \cosh(\beta_2 b),$$

$$b = b_0 + b_m \sin(\omega t)$$

$$(b = b_m \sin(\omega t)), \quad (6)$$

($A e^{-\gamma^2 b m^2}$ – має сенс при побудові виходу з приватних циклів і залежить від конструктивних особливостей об'єкта, що досліджується) і дозволяє врахувати вплив спектра гармонік вхідного струму перемагнічування феромагнетика. Параметри A , γ , α_1 , β_1 , α_2 , β_2 – коефіцієнти апроксимації функції (6), знаходять за допомогою числових методів по експериментальній граничній ПГ і кривій намагнічування, знятій при максимальних величинах індукції і частоти сигналу. Перший доданок (6) характеризує основну криву намагнічування (ОКН), другий – описує дисипативні процеси і на гістерезис, і на вихрові струми, і залежить від магнітної в'язкості.

Коефіцієнти α_1 і β_1 безгістерезисної складової (6) визначаються методом вибраних точок по кривій ОКН, параметри A і γ визначаються з виразів [1]

$$\ln(A) = \gamma^2 b_m^2 \max ;$$

$$\gamma^2 = \frac{\ln(h_0 / \alpha_1 \cdot \sinh(\beta_1 b_0))}{b_m^2 \max - b_0^2},$$

причому точки b_0 , h_0 беремо поблизу максимального значення індукції b_m , а індукція $b_m \max$ відповідає максимальному робочому значенню. Коефіцієнти α_2 і β_2 знаходяться

з формул:

$$\alpha_2 = h_c / \Omega \cdot b_m ,$$

$$\beta_2 = 1 / b_m ,$$

де h_c – коерцитивна сила, А/м.

Розглянемо процес перемагнічування феромагнетику при впливі на нього осердя індукції, що створюється $b = b_0 + b_m \sin(\Omega t)$ полем постійного струму і сигнального струму 25 Гц (рис. 2, (б)). Підставимо цей вираз як аргумент у формулу (6) і перетворимо її, опустивши експоненційний множник $A e^{-\gamma^2 b m^2}$, що не впливає на кількісний результат першого доданку. Оскільки аргумент b змінюється по періодичному закону, то функції $\sinh(\beta_1 b)$ і $\cosh(\beta_2 b)$ також періодичні і можуть бути подані рядами Фур'є [10], в яких коефіцієнтами при тригонометричних функціях будуть функції Бесселя різних порядків від уявного аргументу jx_m . У результаті отримуємо:

$$h = \alpha_1 \sinh(\beta_1 b_0) \cdot \cosh(\beta_1 b_m \sin(\omega t)) +$$

$$+ \alpha_1 \cosh(\beta_1 b_0) \cdot \sinh(\beta_1 b_m \sin(\omega t)) +$$

$$+ \alpha_2 \cdot \omega b_m \cos(\omega t) \times$$

$$\times \left[\cosh(\beta_2 b_0) \cdot \cosh(\beta_2 b_m \sin(\omega t)) + \right.$$

$$\left. + \sinh(\beta_2 b_0) \cdot \sinh(\beta_2 b_m \sin(\omega t)) \right]. \quad (7)$$

Подано в (7) гіперболічні функції рядами:

$$sh(x_m \sin(\omega t)) = 2 \left[-j J_1(jx_m) \right] \cdot \sin(\omega t) -$$

$$- 2 \left[j J_3(jx_m) \right] \cdot \sin(3\omega t) - \dots,$$

$$ch(x_m \sin(\omega t)) = \left[J_0(jx_m) \right] +$$

$$+ 2 \left[J_2(jx_m) \right] \cdot \cos(2\omega t) + \dots$$

і, утримуючи гармоніки не вище другої, після перетворень отримуємо:

$$h = h_0 + m_1 \sin(\omega t) + n_2 \sin(2\omega t) +$$

$$+ m_2 \cos(\omega t) + n_1 \cos(2\omega t), \quad (8)$$

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

де

$$\begin{aligned}
 h_0 &= \alpha_1 \cdot \sinh(\beta_1 b_0) \cdot [J_0(j\beta_1 b_m)]; \\
 m_1 &= \alpha_1 \cdot \cosh(\beta_1 b_0) \cdot 2[-J_1(j\beta_1 b_m)]; \\
 n_1 &= \alpha_1 \cdot \sinh(\beta_1 b_0) \cdot 2[J_2(j\beta_1 b_m)]; \\
 m_2 &= \alpha_2 \omega b_m \cdot \cosh(\beta_2 b_0) \cdot J_0(j\beta_2 b_m) + \\
 &\quad + \alpha_2 \omega b_m \cdot \sinh(\beta_2 b_0) \cdot [-J_0(j\beta_2 b_m)]; \\
 n_2 &= \alpha_2 \omega b_m \cdot \sinh(\beta_2 b_0) \cdot [-J_1(j\beta_2 b_m)].
 \end{aligned}$$

Досліджуємо доданок h_0 у формулі (8), оскільки саме ця складова напруженості магнітного поля призводить до насичення осердя дроселя і, в кінцевому результаті, до відмови роботи приймача РК.

При кількісній оцінці залежностей напруженості поля від індукцій у формулі (6) і (8) використовуються параметри: $\alpha_1 = 2,1 \text{ А/м}$, $\beta_1 = 4,51/\text{Тл}$, $\alpha_2 = 0,26 \text{ А/м}$, $\beta_2 = 0,771/\text{Тл}$, $\gamma = 0,921/\text{Тл}$, $A = 5,92$ (сталь марки 2412), площа перерізу осердя дроселя ДТ.1.150 $29,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, середня довжина магнітної силової лінії $\ell = 0,58 \text{ м}$, кількість витків робочої обмотки $W_0 = 16$. Максимальні значення індукції b_m для різних довжин РК розраховані за формулою $b_m = \frac{U_{\text{Дmax}}}{4,44 f W S}$, де $U_{\text{Дmax}}$ – напруга на основній обмотці дроселя, приймається за довідковими

даними та регульовальними таблицями фазочутливих РК 25 Гц [10]. Для РК довжиною 250–500 м $U_{\text{Дmax}} = 1,45\text{--}2,5 \text{ В}$, $b_m = 0,28\text{--}0,42 \text{ Тл}$; гранична напруженість поля $h_{\text{опр}}$ знаходиться у діапазоні 240–280 А/м, струм підмагнічення $I_0 = h_{\text{опр}} \cdot 0,036 = 8,5\text{--}9,5 \text{ А}$, а струм асиметрії 17–19 А.

Стендові випробування схеми РК показали, що граничний струм намагнічування дроселів, при якому приймач переходить в нульовий стан, досягає 8,4–9,25 А.

На рис. 2, б зображена крива ОКН, апроксимована виразом (6), і петля гістерезису при індукції постійного поля (зсуву) $b_0 = 1,1 \text{ Тл}$; також зображена крива реверсивної магнітної проникності $\mu_r(h_0)$, розрахована по формулі $\mu_r \leq \tan(\alpha) = \Delta b_0 / \Delta h_0 \cdot m_h / m_b$, де Δb_0 , Δh_0 – приращення індукції і напруженості поля в i -й точці кривої $b_0(h_0)$; m_b , m_h – масштаби по осях координат.

Коерцитивна сила h_c ПГ визначена з урахуванням того, що безгістерезисна складова (6) дорівнює нулю, тоді $h_c = \alpha_2 \omega b \cdot \cosh(\beta_2 b_m) = 62,2 \text{ А/м}$, і максимальна індукція петлі відповідає $b_m = b_0 + b_c = 1,4 \text{ Тл}$. По заданому значенню μ_r легко визначається індуктивність L_0 і опір Z_0 основної обмотки, а по ОКН – струм намагнічування.

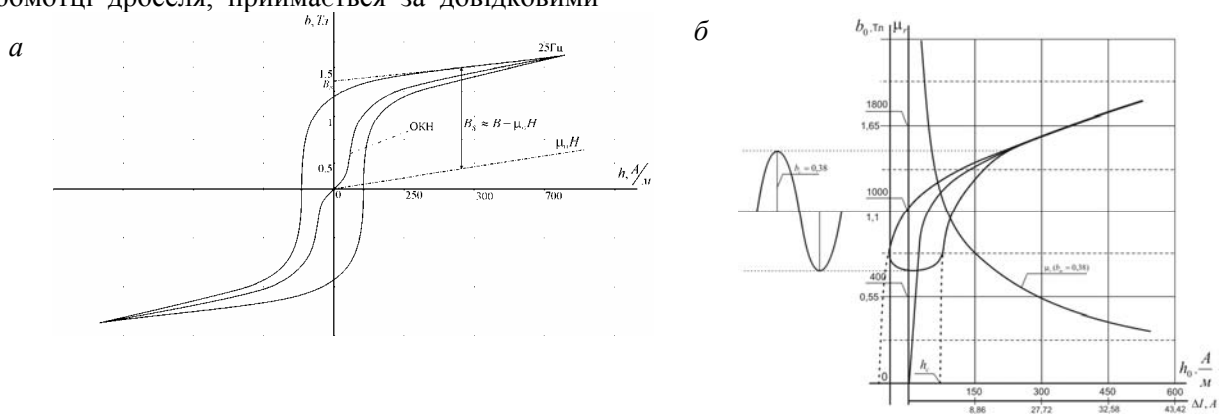


Рис. 2. Залежності напруженості поля від індукції при частоті 25 Гц: а – гармонійний сигнал; б – гармонійний сигнал з підмагнічуванням

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Аргумент опору Z_0 можна визначити за величиною потужності втрат на вихрові струми та гістерезис [5]:

$$P_{B.T.} = Vf_c \int_0^{2\pi} HdB, \quad (9)$$

де V – об'єм осердя. Зсув фаз між першими гармоніками ЕРС і струмом обмотки визначається при напруженості $u = U_m \sin \Omega t$, якщо індукція і напруженість задані функціями:

$$B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_{m_n} \sin(n\Omega t - \gamma_n),$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{m_n} \sin(n\Omega t + \psi_n). \quad (10)$$

Із (10) і рівняння намагнічуючого кола обмотки дротів ДТ.1 опором r :

$$ri + W_0 S \frac{dB}{dt} = u \quad (11)$$

для першої гармоніки отримуємо ЕРС і фазу: $E_1 = \Omega W_0 \Phi$; $\psi_1 = \gamma_1 + \pi/2$. Підстановкою напруженості $H_0 = iW/l$ та об'єму осердя $V = S \cdot l$ в (9) знаходимо, що

$$P_{B.T.} = \Omega W_0 S [I_1 B_1 \sin(\gamma_1 - \psi_1)]. \quad (12)$$

Якщо індукція

$$b_1 = b_0 + b_{1m} \sin(\Omega t - \gamma_1) =$$

$$= 1,1 + 0,38 \cdot \sqrt{2} \sin(157t - \gamma_1),$$

струм $i_{\Omega} = 2,6$ А прийнятий по ОКН для $b_0 = 1,1$ Тл, $b_{1m} = 0,521$ Тл, $r = 0,003$ Ом, то з (11) знаходимо, що $E_{1m} = 2,174$ В; втрати на пруги на опорі кола $7,8 \cdot 10^{-3}$ В, напруга $u = 2,7178$ В, а повна потужність $S = 2,7178 \cdot 2,6 = 7,066$ ВА, звідки отримуємо, що $P_{B.T.} = 7,0563$ Вт.

Аргумент опору Z_0 складає $\varphi = \arcsin \frac{P_{B.T.}}{S} = 86^{\circ}57'$. Аргумент Z_0 можна знайти іншим способом. Магнітний потік (11), що проходить через листові полоси осердя,

$$\dot{\Phi} = \frac{2\mu b h_0}{(1+j)\beta d} \tanh\left(\beta(1+j)\frac{d}{2}\right), \quad (13)$$

де $h_0 = \frac{iW}{l}$, $\beta = \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \gamma}$, γ – провідність сталі ($7 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{мм}}$), μ_r – магнітна проникність сталі приймається 500, $d = 0,055$ м, $b = 0,18$ м – товщина і ширина пакета пластин осердя [6].

Розрахунок приросту комплексного опору обмотки осердя ДТ.1.150 за рахунок струмових ефектів є можливим завдяки використанню (13):

$$0,2 \leftarrow \Delta Z = \frac{2j \cdot \mu_r S_{II} \Omega W^2}{(1+j)\beta \cdot l \cdot d} \times$$

$$\times \tanh\left(\beta(1+j)\frac{d}{2}\right), \quad (14)$$

де $S_{II} = a \cdot b$ – площа перерізу пакета, яку обтікає потік; $a = 0,175$ м – висота пакета сталі.

Для низьких частот (менше ніж 900 Гц) $L_0 = \mu_0 \mu_r S W^2 / l$, де L_0 – індуктивність обмотки по постійному струму; $S = 29,2 \cdot 10^{-4}$ м² – площа перерізу магнітопроводу, що охоплюється обмотками; $l = 0,58$ м – середня довжина магнітної лінії для потоків. Тоді (14) можна записати у вигляді

$$\Delta Z = L_0 \frac{2j \cdot \Omega}{(1+j)\beta \cdot d} \times \tanh\left((1+j)\frac{d}{2}\right)$$

і розкласти на дійсну та уявну частини. В результаті отримаємо формули для оцінки індуктивності $\Delta L = L_0 \frac{1}{x} \cdot \frac{\text{sh}(x) + \sin(x)}{\text{sh}(x) + \cos(x)}$ і активного

опору обмотки $\Delta R = \omega L_0 \frac{1}{x} \cdot \frac{\text{sh}(x) - \sin(x)}{\text{sh}(x) + \cos(x)}$. По-

вна індуктивність обмотки $L = L_0 + \Delta L$, а повний опір $R = R_0 + \Delta R$, де $R_0 = \rho \ell_n / S_n$, ℓ_n , S_n – довжина та переріз проводу.

Зупинимося на особливостях розрахунку рейкового кола з нелінійними феромагнетиками.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Результати

Розрахунки режимів роботи РК здійснюються з використанням структурної схеми заміщення (рис. 3) дросель-трансформатора, наведеної схемою Г-подібного чотириполюсника та ідеального трансформатора.

Знаходження коефіцієнтів чотириполюсників (зазвичай в А-формі), що містять нелінійні ФМ на всьому діапазоні зміни в осердях індукції, що перевищує область насичення, є досить важкою задачею, оскільки класичні методи ХХ і КЗ не є прийнятними. Запропонована методика розрахунку РК спрощує вирішення названої проблеми.

Для розрахунків необхідно мати петлю гістерезису (рис. 2, а) ФМ, зняту при максимальній індукції, і залежність магнітної проникності $\mu_r(h_0)$ від струму (напруженості) намагнічування. Далі, враховуючи (8), визначається напруженість h_0 , опір Z_0 гілки намагнічування при заданій індукції та коефіцієнти А-матриці чотириполюсника розрахункової схеми заміщення ДТ.1.150 (рис. 3):

$$\begin{aligned} A_T &= n(1 + r_1/z_0), \quad B_T = nr_1, \\ C_T &= 1/nz_0, \quad D_T = 1/n. \end{aligned} \quad (15)$$

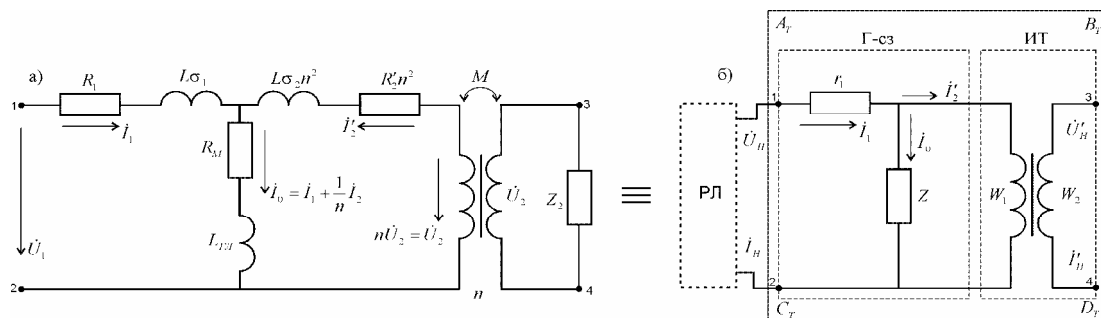


Рис. 3. Схема заміщення трансформатора:
а – реального; б – розрахункова

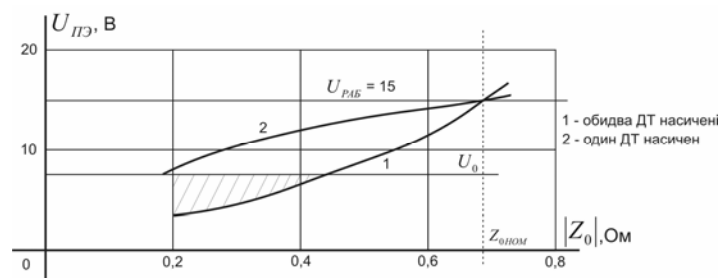


Рис. 4. Залежності напруги на приймачі від модуля опору Z_0

З розрахункової схеми заміщення дроселя виключені індуктивності розсіювання обмоток і приведений опір додаткової обмотки, що впливають на точність розрахунків незначною мірою.

За результатами розрахунків двониткового фазочутливого РК частотою 25 Гц із використанням коефіцієнтів (15) при підмагнічуванні дроселів по кінцях РК виявлено збіг з даними, отриманими звичайним методом.

У табл. 1 наведені порівняльні розрахункові параметри для однієї і тієї ж РК, отримані двома методами розрахунку – класичним і новим, із застосуванням математичної моделі перемагнічування феромагнетиків.

На рис. 4 наведені залежності напруги на вході приймача від модуля опору Z_0 . Бачимо, що гранична величина опору при насиченні обох дроселів досягне 0,44 Ом, що в 1,6 разу менше, ніж номінальне значення. Перехід приймача в нульовий стан можливий при насиченні одного дроселя до опору $Z_0 = 0,2$ Ом (рис. 4).

Результати розрахунків РК

Методи розрахунку	$\dot{U}_{\text{ДТ}}$	$\dot{I}_{\text{ДТ}}$	$\dot{U}_{\text{ТР}}$	S	β_p
	В	А	В	ВА	град
Класичний	$3,75e^{j95.5^\circ}$	$0,82e^{j60^\circ}$	$5,1e^{j78.6^\circ}$	4,58	$6^\circ 32'$
Новий	$4,1e^{j89^\circ}$	$0,77e^{j54^\circ}$	$5,5e^{j78^\circ}$	4,23	6°
Різниця в розрахунках, %	9,3	9,3	7,8	7,64	–

Примітка: різниця результатів викликана, в основному, обліком опорів ДП зі сталі. Параметри наведено без поправок на кут β_p

Висновки

Для вирішення проблеми забезпечення завадостійкості РК в умовах впливу потужних завад тягового струму запропоновано декілька рішень.

Перше рішення полягає у застосуванні на станціях дроселів-трансформаторів з повітряним зазором типу ДТ.06.500С, що застосовуються на станціях стикування [2, 3].

Друге рішення полягає у застосуванні комутуючих блоків [9], що виключають шлях розтікання тягового постійного струму з рейкової мережі станції стикування в сторону полігону електротяги змінного струму, що, крім насичення ДТ, виключить електрокорозію опор і металевих елементів на відстані до 30 км від джерела перешкоди. Пристрій випробувано в лабораторії ДНУЗТ і в польових умовах на станції стикування П'ятихатки Придніпровської залізниці.

Третє рішення полягає в установці симетруючих резистивних ($R_{\text{ДП1}}$ чи $R_{\text{ДП2}}$) блоків [2, 8] в коротких РК при електротязі змінного струму. Величини опорів резисторів блоків розраховані так, щоб істотно перевищувати суму всіх опорів у схемі моста (рис. 1) рейкової лінії. Резистори блоків (рис. 1) включаються послідовно з дросельними перемичками на одному з кінців рейкової лінії, що значно дешевше, ніж у випадку заміни дроселів.

Встановлено, що причиною відмов РК є насичення магнітопроводу феромагнетиків в умовах асиметрії рейкової лінії, при цьому асиметрія по постійному струму, що намагнічує ФМ, у 4–5 разів перевищує асиметрію по змінному струму.

За допомогою нового методу розрахунку РК із застосуванням математичної моделі перемагнічування феромагнетиків отримана кількісна оцінка гранично-допустимих струмів асиметрії і вхідних опорів по кінцях кола, що викликають відмову пристроїв СЦБ.

Сформульовано технічні заходи щодо підвищення завадостійкості та захисту РК в умовах дії потужних завад тягового струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Болдов, Б. А. Аппроксимация симметричных петель гистерезиса ферромагнитных материалов / Б. А. Болдов // Тр. МЭИ. – Москва, 1975. – № 232. – С. 55–60.
2. Брылеев, А. М. Устройства и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, А. В. Шишляков, Ю. А. Кравцов. – Москва : Транспорт, 1966. – 264 с.
3. Вахнин, М. И. Устройства СЦБ при электрической тяге переменного тока / М. И. Вахнин, Н. Ф. Пенкин, М. А. Покровский // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1956. – Вып. 126. – 217 с.
4. Купфмюллер, К. Основы теоретической электротехники / К. Купфмюллер. – Москва : ГЭИ, 1960. – 217 с.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

5. Патент 33376 України. МПК G 01 R 31/02. Пристрій захисту рейкових кіл ділянок тяги змінного струму від впливу зворотного постійного тягового струму / Разгонов А. П., Дьяков В. О., Гілевич О. І., Журавльов А. Ю. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № у 2008 00018 ; заявл. 02.01.08 ; опубл. 25.06.08. Бюл. № 12. – 5 с.
6. Патент 84968 України. МПК В 61 L 1/00. Пристрій захисту рейкових кіл ділянки тяги змінного струму від впливу зворотного постійного струму / Разгонов А. П., Журавльов А. Ю., Лебедєв А. Ю. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № у 2013 04391 ; заявл. 08.04.13 ; опубл. 11.11.13. Бюл. № 21. – 6 с.
7. Разгонов, А. П. Математическая модель перемагничивания ферромагнетиков в рельсовых цепях / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, С. А. Разгонов // Транспорт Урала. – 2008. – № 1. – С. 35–39.
8. Разгонов, А. П. О влиянии электрической дуги на токосъемники электровоза при гололёде на рельсовые цепи / А. П. Разгонов // Информ.-керуючі системи на заліз. трансп. – 1998. – № 6. – С. 36–39.
9. Разгонов, А. П. О надежности работы токопроводящих стыков с тарельчатыми пружинами и с соединителями / А. П. Разгонов, М. А. Кавригин // Автоматика, телемеханика и связь. – 1994. – № 8. – С. 32–34.
10. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / под ред. В. С. Аркатова. – Москва : Миссия-М, 2006. – 496 с.
11. Щека, В. І. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 24–28.
12. Ogunsola, A. Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti // Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 528 p.
13. Rhee, E. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem / E. Rhee, C. Kim // Intern. J. of Software Engineering & Its Applications. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 115–126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10.

А. Ю. ЖУРАВЛЕВ^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010 Днепропетровск, Украина, тел. +38 (067) 990 76 51, эл. почта anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

О МЕТОДАХ РАСЧЕТА РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ ТЯГОВОГО ТОКА

Цель. В работе необходимо исследовать электромагнитные процессы в дроссель-трансформаторе с целью повышения помехоустойчивости рельсовых цепей (РЦ) и, как следствие, повышения безопасности движения на железной дороге. **Методика.** Для достижения поставленной цели применены методы научного анализа, математического моделирования, экспериментального исследования, масштабного моделирования. **Результаты.** Рассмотрены помехи, влияющие на нормальную работоспособность рельсовых цепей. В значительной мере часть повреждений в рельсовой цепи приходится на отказ в его аппаратуре. Аппаратура рельсовой цепи подключена непосредственно к рельсовой линии, подверженной влиянию помех тягового тока, что вызывает в них изменение электрических характеристик и электромагнитных свойств. Нормальная работоспособность при выполнении основных режимов работы рельсовой цепи определяется предварительным расчетом ее характеристик и составлением регулировочных нормативных таблиц. Проанализирован классический метод определения параметров рельсовой цепи. Классический метод расчета предполагает представление отдельных участков электрической схемы рельсовых цепей четырехполюсниками с известными коэффициентами, обычно в А-форме. Поиск коэффициентов схем с линейными элементами не представляет метрологических и математических затруднений. Вместе с тем, в цепях, содержащих нелинейные ферромагнетики (ФМ), получение коэффициентов на всем диапазоне изменения индукций в сердечниках – довольно трудная задача, поскольку классические методы холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) становятся неприемлемыми. Это приводит к усложнению методов определения, как модуля,

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

так и аргументов коэффициентов четырехполосников. Вместо классического метода предложен метод расчета рельсовой цепи с учетом нелинейной характеристики ферромагнетиков. **Научная новизна.** В статью рассмотрен новый подход к расчету РЦ с учетом потерь в ферромагнетиках, без поиска коэффициентов четырехполосников схемы замещения. При построении модели перемагничивания ФМ в параллельных магнитных полях наиболее точными являются аппроксимационные методы, учитывающие не только изменения величин b и h во времени, но и их производные. С развитием вычислительной техники и программного обеспечения математические методы расчета РЦ при значительном изменении индуктивности ферромагнетиков, включая участки насыщения, становятся реальными. При этом важным является поиск аппроксимирующего аналитического выражения, описывающего динамическую предельную петлю гистерезиса (ПГ). **Практическая значимость.** Проведен анализ изменения электрических параметров одной и той же РЦ при расчете классическим и новым методом: разница составила не более 10 %. Приведены некоторые мероприятия по повышению эксплуатационной помехоустойчивости РЦ.

Ключевые слова: рельсовая цепь; дроссель-трансформатор; четырехполосник; ферромагнетик; гистерезис; спектр; вихревые токи; магнитная вязкость; кривая намагничивания; моделирование

A. Y. ZHURAVLEV^{1*}

^{1*}Dep. «Automation, Remote Control and Communication», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel +38 (067) 990 76 51, e-mail anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

ABOUT TRACK CIRCUIT CALCULATION METHOD DEPENDENT ON FERROMAGNET PROPERTIES IN CONDITIONS OF TRACTION CURRENT NOISE INFLUENCE

Purpose. The work is intended to investigate the electromagnetic processes in impedance bond in order to improve noise immunity of track circuits (TC) for safe railway operation. **Methodology.** To achieve this purpose the methods of scientific analysis, mathematical modelling, experimental study, a large-scale simulation were used. **Findings.** The work examined the interference affecting the normal performance of track circuits. To a large extent, part of track circuit damages account for failures in track circuit equipment. Track circuit equipment is connected directly to the track line susceptible to traction current interference, which causes changes in its electrical characteristics and electromagnetic properties. Normal operability, performance of the main operating modes of the track circuit is determined by previous calculation of its performance and compilation of regulatory tables. The classical method for determination of track circuit parameters was analyzed. The classical calculation method assumes representation of individual sections of the electrical track circuit using the quadripole network with known coefficients, usually in the A-form. Determining the coefficients of linear element circuit creates no metrological or mathematical difficulties. However, in circuits containing nonlinear ferromagnets (FM), obtaining the coefficients on the entire induction change range in the cores is quite a difficult task because the classical methods of idling (I) and short circuit (SC) are not acceptable. This leads to complicated methods for determining both the module and the arguments of quadripole network coefficients. Instead of the classical method, the work proposed the method for calculating the track circuit dependent on nonlinear properties of ferromagnets. **Originality.** The article examines a new approach to the calculation of TC taking into account the losses in ferromagnets (FM), without determination of equivalent circuit quadripole network coefficients. When building the FM reversal model in parallel magnetic fields, the most accurate methods are the approximation ones that take into account not only the changes in values and over time, but also their derivatives. The development of computer hardware and software makes real the mathematical methods for calculating TC with significant change in ferromagnetic inductance, including the saturation areas. Herewith, it is important to search for approximating analytical expression that describes the dynamic limit hysteresis loop (HL). **Practical value.** The changes in the electrical parameters of the same TC were analysed using the classical and the new calculation methods, the difference made less than 10%. The work introduced some measures to increase operational noise immunity of TC.

Keywords: track circuit; impedance bond; quadripole network; ferromagnet; hysteresis; spectrum; vortical currents; magnetic viscosity; magnetizing curve; simulation

REFERENCES

1. Boldov B.A. *Аппроксимация симметричных петел гистерезиса ферромагнитных материалов* [Approximation of the symmetric hysteresis loops of ferromagnetic materials]. *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta* [Proc. of Moscow Power Engineering Institute]. Moscow, 1975, no. 232, pp.55-60.
2. Bryleyev A.M., Shishlyakov A.V., Kravtsov Yu.A. *Устройства и работа релсовых тсепей* [Devices and operation of rail circuits]. Moscow, Transport Publ., 1966. 264 p.
3. Vakhnin M.I., Penkin N.F., Pokrovskiy M.A. *Устройства СТсВ при электрической тяге переменного тока* [Installation of signaling equipment in electric traction AC]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proc. of All-Russian Research Institute of Railway Transport]. Moscow, 1956, issue 126, 217 p.
4. Kupfmyuller K. *Osnovy teoreticheskoy elektrotekhniki* [Fundamentals of theoretical electrical engineering]. Moscow, GEI Publ., 1960. 217 p.
5. Razghonov A.P., Diakov V.O., Hilievich O.I., Zhuravlov A.Yu. *Присудии зakhstanу рейковых кил дилианок тiahу зминного струму вид вplyву зворотного постийного тiahового струму* [Devices protecting the track circuit sections of AC traction from the permanent influence of return traction current]. Patent UA, no. u 2008 00018. 2008.
6. Razghonov A.P., Zhuravlov A.Yu., Lebediev A.Yu. *Присудии зakhstanу рейковых кил дилианкы тiahу зминного струму вид вplyву зворотного постийного струму* [Devices protecting the track circuit section of AC traction from the influence of reverse DC]. Patent UA, no. u 2013 04391. 2013.
7. Razgonov A.P., Zhuravlev A.Yu., Razgonov S.A. *Matematicheskaya model peremagnichivaniya ferromagnetikov v relsovykh tsepyakh* [A mathematical model of the remagnetization of ferromagnetics in the track circuits]. *Transport Urala –Transport of Urals*, 2008, no. 1, pp. 35-39.
8. Razgonov A.P. *O vliyaniy elektricheskoy dugi na tokosemniki elektrovoza pri gololede na relsovykh tsepi* [About the influence of the electric arc on the current collectors of an electric locomotive at the ice on the track circuit]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information Management Systems in Railway Transport*, 1998, no. 6, pp. 36-39.
9. Razgonov A.P., Kavrigin M.A. *O nadezhnosti raboty tokoprovodyashchikh stykov s tarechatymi pruzhinami i s soyedinitelyami* [About the reliability of conductive joints with disc springs and connectors]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz – Automation, Telemechanics and Communications*, 1994, no. 8, pp. 32-34.
10. Arkatov V.S. *Relsovyye tsepi magistralnykh zheleznykh dorog* [Track circuit of main railways]. Moscow, Misisiya-M Publ., 2006. 496 p.
11. Shcheka V.I., Romantsev I.O., Yashchuk K.I. *Doslidzhennia vplyvu zворотного тiahового струму на rezhimy roboty tonalnykh рейковых кил* [The investigation of reverse traction current influence on tone track circuit modes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 24-28.
12. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2013. 528 p.
13. Rhee E., Kim C. *Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem*. *Intern. Journal of Software Engineering & Its Applications*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 115-126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10.

Стаття рекомендована до друку д.фіз-мат.н., проф. В. І. Гаврилюком (Україна); д.т.н., проф. М. М. Бабасвим (Україна)

Надійшла до редколегії: 05.12.2015

Прийнята до друку: 04.02.2016