

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ. МЕТОД МИТТЄВИХ ПОТУЖНОСТЕЙ; ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ

Пропонується новий метод ідентифікації параметрів пристроїв систем електричної тяги. Представлені чисельні розрахунки часових і струмових залежностей еквівалентних параметрів двополюсника, схема заміщення якого виглядає як паралельне з'єднання пасивних елементів; розрахунки виконано для електровозів ДСЗ і 2ЕС5К.

Ключові слова: електровоз змінного струму, еквівалентна схема заміщення, ідентифікація параметрів, двополюсник, паралельне з'єднання елементів, математичне моделювання

Вступ

Рішення будь-якої «електричної» проблеми або задачі, що виникає в системах електричного транспорту та зокрема, в системі електричної тяги змінного струму неможливе без знання, а значить і необхідності досліджень електромагнітних або (і) електроенергетичних процесів. Як відомо, дослідження цих процесів у нелінійній динамічній системі «тягова підстанція – тягова мережа – електрорухомий склад» (ТП-ТМ-ЕРС) можливе: експериментальним шляхом у реальних умовах експлуатації; фізичним моделюванням на лабораторних стендах; методами математичного моделювання; методами комп'ютерного (імітаційного) моделювання.

Експериментальні методи дослідження вимагають значних матеріальних витрат, нерідко призводять до виходу з ладу елементів системи, вимагають додаткових умов і часу на випробування, виключають можливості дослідження випадкових процесів. Лабораторні стендові випробування (фізичне моделювання) також обмежені як матеріальними, так і об'ємом та вірогідністю отриманої інформації. При імітаційному (комп'ютерному) моделюванні реальні ТП, ТМ і ЕРС описуються віртуальними об'єктами з певними параметрами, що, істотно, обмежує достовірність отриманих результатів. Тому найбільш доцільним шляхом досліджень аварійних, тим більше стохастичних, перехідних електромагнітних процесів у системі електричної тяги є метод чисельного математичного моделювання на ЕОМ. Використання цього методу не тільки дозволяє спростити й скоротити наступні натурні випробування, але й розширює можливості досліджень, тому що допускає широку варіацію значень та реальність параме-

трів елементів силових електричних кіл системи тяги без значних матеріальних витрат. Однак, для математичного моделювання необхідна побудова схем заміщення та значення їх параметрів досліджуваних пристроїв.

Розробка, зображення (побудова) та використання при аналізі процесів схем заміщення реальних підсистем (пристроїв), зокрема, системи тяги (ТП, ТМ, ЕРС та ін.) суттєво ускладнює задачу аналізу, а в ряді випадків робить її навіть нездійсненною. Особливо це відноситься до схем заміщення електровозів. І якщо такі схеми для електровозів постійного струму типу ВЛ 8, ВЛ 10, ДЕ 1 відносно прості, то для електровозів з випрямлячами (однофазно-постійного струму) серії ВЛ 60, ВЛ 80 та особливо електровозів з асинхронним приводом, цього сказати неможна. Та і взагалі, якщо виникає задача дослідження процесів в режимах, коли на фідерній зоні розташовано декілька електровозів, а більш того, і на сусідній колії теж 3...4 електровози, тоді задача практично нерозв'язна. Тому в існуючих наукових публікаціях, на цю тему, навіть для більш простих задач, ЕРС враховують ідеальним джерелом струму з заданим струмом, в той час як струм електровоза є випадковим процесом. Тільки в найпростіших випадках врахування одного електровоза на фідерній зоні будують та враховують схему заміщення ЕРС. Аналогічні проблеми виникають і у випадку, якщо досліджуються процеси взаємовпливу ліній зовнішнього електропостачання та системи тяги, тобто процеси на всій електрифікованій ділянці.

Враховуючи викладене, задача спрощення схем заміщення пристроїв та підсистем електротяги або їх заміна іншим шляхом являється, безперечно, актуальною. Ця задача гостро не-

обхідна, оскільки для впровадження прискореного, швидкісного та високошвидкісного (та ваговитого) руху розробляються і будуть впроваджуватися в системи тяги більш потужні (йтим самим складніші) типи ЕРС та системи тягового електропостачання.

Перша спроба розв'язання такої задачі по спрощенню схем заміщення електровоза, на нашу думку, викладена в роботах [1–3], в яких запропоновано визначення параметрів пристроїв електричної тяги, точніше тільки електровоза, по так званим обмінним характеристикам $R(I)$, $L(I)$. Однак, запропонована в цих роботах, методика володіє, на нашу думку, деякими недоліками.

В зв'язку з цим в цій роботі в розвиток досліджень [1–3], викладені та обгрунтовані нові методи ідентифікації параметрів пристроїв систем електричної тяги, які у подальшому дозволяють спростити метод математичного моделювання процесів в них.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ

З позицій теоретичної електротехніки будь-який пристрій будь-якої системи електричного транспорту, зокрема, будь-яка одиниця електро рухомого складу (електровоз, мотор-вагон метрополітену, трамвай, тролейбус) може бути представлений у вигляді параметричного або нелінійного, пасивного або активного двополюсника з заданими вхідними (змінними $u(t)$ $i(t)$ або постійними U , I) напругою та струмом (рис. 1).

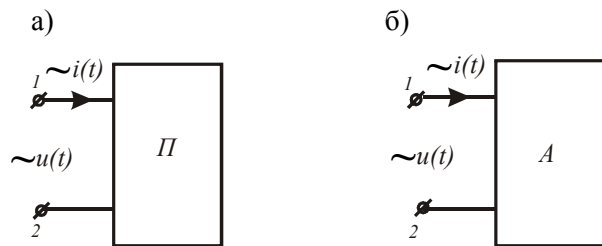


Рис. 1. Пасивний та активний двополюсники із заданими вхідними напругою та струмом

Зокрема, в ЕРС затискачем 1 в цьому двополюснику є точка торкання струмоприймача з контактним проводом, а затискач 2 – колеса ЕРС з рейкою.

Задача ідентифікації пристрою, що досліджується, а отже двополюсника, полягає у визначенні електричних параметрів R , L , C пасивних елементів, які заміщують двополюсник. Нижче пропонується методи розв'язання такої

задачі для пасивного двополюсника зі змінними, поки що несинусоїдними, але детермінованими періодичними, вхідними $u(t)$ та $i(t)$; хай це буде, наприклад, електровоз змінного струму в режимі тяги.

Найбільш повну інформацію про електроенергетичні процеси в будь-якому колі з будь-якою формою напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ містить повна миттєва потужність $s(t) = u(t) \cdot i(t)$ як реальна фізична величина. Тому скористаємося нею для розв'язання поставленої задачі.

Будь-який нелінійний або параметричний пасивний двополюсник, згідно з теоретичними основами електротехніки [4], представимо паралельним з'єднанням нелінійного резистивного елемента зі статичним опором R , яким споживається активна потужність P двополюсника, що досліджується, а також параметричним неактивним елементом X , який характеризує споживання неактивної складової повної потужності (рис. 2).

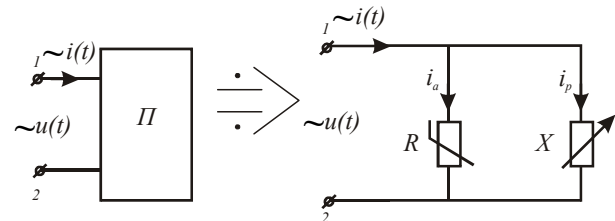


Рис. 2. – Схема заміщення пасивного двополюсника паралельним з'єднанням нелінійного резистивного елемента зі статичним опором R , а також параметричним неактивним елементом X

Вважається, що у вітці з елементом R протікає активна складова струму $i_a(t)$, яка співпадає за формою з прикладеною до двополюсника напругою $u(t)$. По елементу X протікає реактивна складова струму $i_p(t)$, що ортогональна до напруги $u(t)$. Тоді для довільного інтервалу часу $[0, \dots \tau]$, хай це буде тривалість періоду змінни T напруги $u(t)$, доби або поїздки поїзду між двома ТП, миттєвий струм $i(t)$ представимо у вигляді суми двох ортогональних складових – активного $i_a(t)$ та реактивного $i_p(t)$ струмів:

$$i(t) = i_a(t) + i_p(t). \quad (1)$$

Помножимо ліву та праву частини (1) на миттєву напругу $u(t)$

$$u(t)i(t) = u(t)i_a(t) + u(t)i_p(t). \quad (2)$$

Ліва частина виразу (2) є повною (або загальною) миттєвою потужністю $s(t)$, а права, відповідно, миттєвою активною $p(t)$ та миттєвою реактивною $q(t)$ потужностями [5]. Тоді

$$s(t) = u(t)i(t) = p(t) + q(t). \quad (3)$$

Миттєва активна потужність $p(t)$ може бути знайдена як потужність, яка обумовлена струмом $i_a(t)$ та споживана резистором R_1 (рис. 2):

$$p(t) = Ri_a^2(t) = u(t)i_a(t) = \frac{u^2(t)}{R}. \quad (4)$$

Тоді активна (середня за τ) потужність P , що споживається двополюсником з опором R буде

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau s(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau [p(t) + q(t)] dt = \\ &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau u(t)i_a(t) dt + \int_0^\tau u(t)i_p(t) dt = \\ &= \int_0^\tau u(t) \cdot i_a(t) dt = \int_0^\tau \frac{u^2(t)}{R} dt = \frac{U^2}{R}, \end{aligned} \quad (5)$$

оскільки другий інтеграл в (5) дорівнює нулю внаслідок ортогональності $u(t)$ та $i_p(t)$. З (5) маємо:

$$R = \frac{U^2}{P}, \quad (6)$$

де U – діюче значення напруги на двополюснику за інтервал τ , що дорівнює

$$U = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau u^2(t) dt}.$$

З врахуванням підстановки (6) в (4) вираз (3) прийме вигляд

$$s(t) = \frac{P}{U^2} u^2(t) + q(t), \quad (7)$$

звідки миттєва реактивна потужність двополюсника визначається як

$$q(t) = u(t)i(t) - \frac{P}{U^2} u^2(t) = u(t) \left[i(t) - \frac{P}{U^2} u(t) \right]. \quad (8)$$

З (8) випливає, що вираз у квадратних дужках є миттєвим реактивним струмом двополюсника, тобто

$$i_p(t) = i(t) - \frac{P}{U^2} u(t), \quad (9)$$

а з цього, і згідно (8), випливає, що миттєвий активний струм, як було зазначено вище, у точності повторює форму прикладеної напруги і визначається виразом

$$i_a(t) = \frac{P}{U^2} u(t). \quad (10)$$

Користуючись виразами (7) та (9), отримаємо співвідношення

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau u(t)i_p(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau q(t) dt = 0, \quad (11)$$

яке обумовлено тим, що, як було зазначено вище, функції $u(t)$ та $i_p(t)$ взаємно ортогональні.

Нехай опір двополюсника (рис. 2) має активно-індуктивний характер, тобто елемент X є «чисто» індуктивним з шуканою індуктивністю L ; знайдемо її.

Енергія W_m , що накопичується в магнітному полі цієї індуктивності L (при початковій умові, що $L = const$) визначається за відомою формулою як

$$W_m(t) = \frac{Li_p^2(t)}{2}. \quad (12)$$

Підставимо в (12) вираз (10) для $i_p(t)$, отримаємо

$$\begin{aligned} W_m(t) &= \frac{L}{2} \left[i(t) - \frac{u(t)}{R} \right]^2 = \\ &= \frac{L}{2} \cdot \left[i^2(t) - \frac{2 \cdot i(t)u(t)}{R} + \frac{u^2(t)}{R^2} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Як відомо, швидкість зміни електромагнітної енергії, що накопичується в реактивному елементі (в даному випадку $\frac{dW_m}{dt}$) дорівнює миттєвій реактивній потужності цього елемента (в даному випадку $q(t)$). Тобто, враховуючи вираз (8), можна записати як

$$\frac{dW_m}{dt} = q(t) = u(t)i(t) - \frac{P}{U^2} u^2(t). \quad (14)$$

Взявши похідну від виразу (13) і підставивши в (14), а також враховуючи, що, згідно (6), $\frac{P}{U^2} = \frac{1}{R}$, отримаємо вираз індуктивності L , як

другого шуканого параметра досліджуваного двополюсника, у вигляді:

$$L(t) = \frac{u(t)i(t) - \frac{u^2(t)}{R}}{i(t)i'(t) - \frac{u'(t)i(t)}{R} - \frac{u(t)i'(t)}{R} + \frac{u(t)u'(t)}{R^2}}. \quad (15)$$

Тепер прийемо, що за початковою умовою L змінна в часі, тобто $L(t)$.

Тоді енергія W_m , що накопичується в такій індуктивності, згідно з (13) буде

$$W_m = \frac{L(t)}{2} \left[i^2(t) - \frac{2i(t)u(t)}{R} + \frac{u^2(t)}{R^2} \right].$$

Взявши похідну від цього виразу і прирівнявши його формулі (14), остаточно отримаємо диференціальне рівняння, розв'язанням якого отримаємо шуканий параметр $L(t)$:

$$\begin{aligned} & \frac{dL}{dt} \left[\frac{i^2(t)}{2} - \frac{u(t)i(t)}{R} + \frac{u^2(t)}{2R^2} \right] + \\ & + \left[i(t)i'(t) - \frac{u(t)i'(t) + u'(t)i(t)}{R} + \frac{u(t)u'(t)}{R^2} \right] \times \\ & \times L(t) - u(t)i(t) + \frac{u^2(t)}{R} = 0. \quad (16) \end{aligned}$$

Тепер уявимо собі, що пасивний двополюсник (рис. 2) замінюється не паралельним R - L -контуром, а паралельним R - C -контуром (рис. 3).

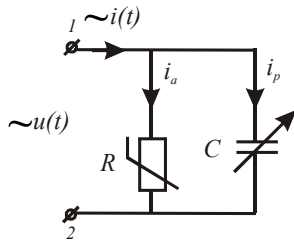


Рис. 3. Схема заміщення пасивного двополюсника паралельним R - C -контуром

Методика та вирази для визначення R ті ж самі, що і вище викладені, а параметр C знайдемо, виходячи з наступних міркувань.

Енергія, що накопичується в електричному полі ємнісного елемента C (при первинних умовах, що $C = const$) дорівнює

$$W_e(t) = \frac{Cu_c^2}{2},$$

або, так як $u_c(t) = u(t)$, маємо

$$W_e(t) = \frac{Cu^2}{2}. \quad (17)$$

Її похідна дорівнює $q(t)$ за (8), тобто

$$\frac{dW_e}{dt} = \frac{2Cu(t)u'(t)}{2} = u(t)i(t) - \frac{u^2(t)}{R}.$$

Звідки

$$C_1(t) = \frac{u(t) \cdot i(t) - \frac{P}{U^2} \cdot u^2(t)}{u(t) \cdot u'(t)}. \quad (18)$$

Тепер прийемо, що $C(t)$, тобто $C = \text{varia}$ у часі.

Тоді енергія, що накопичується в C буде $W_e(t) = \frac{C(t)u_c^2(t)}{2}$. Її похідна, яка дорівнює $q(t)$, запишеться у вигляді

$$\frac{dW_e}{dt} = \frac{2 \cdot C(t)u_c(t)u_c'(t)}{2} + \frac{u_c^2(t)}{2} \frac{dC}{dt}. \quad (19)$$

Після спрощення цього виразу та прирівняння його формулі (14) остаточно отримаємо диференціальне рівняння, з якого можемо визначити $C(t)$:

$$\frac{dC}{dt} + 2 \frac{du_c}{u_c(t)} C(t) - 2 \frac{i(t)}{u(t)} + \frac{2}{R} = 0, \quad (20)$$

де R – визначається виразом (6).

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ

Чисельні розрахунки часових і струмових залежностей еквівалентних параметрів R , L , C двополюсників (як схем заміщення ЕРС) за отриманими вище формулами здійснено в цій роботі для електровозів змінного струму ДСЗ та 2ЕС5К (2ЕЛ5к). Необхідні для розрахунків експериментальні дані вхідних (до електровозів) напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ запозичені із роботи [3].

На рис. 4 приведені залежності еквівалентної індуктивності $L(t)$, що отримані розрахунками за виразом (15), тобто при початковій умові, що $L = const$ для рівняння (1). Як впливає із цього рис. 4, значення L занадто великі (більше 150 Гн), щоб можна було прийняти їх практично існуючими, достовірними. Якщо ж з самого початку, як це і коректно, приймається умова параметричності параметрів

L і C , тобто, що вони є $L(t)$ і $C(t)$, і розрахунки виконуються шляхом розв'язання диференціальних рівнянь (16) і (20), то отримаємо результати, що представлені на рис. 5 та 6.

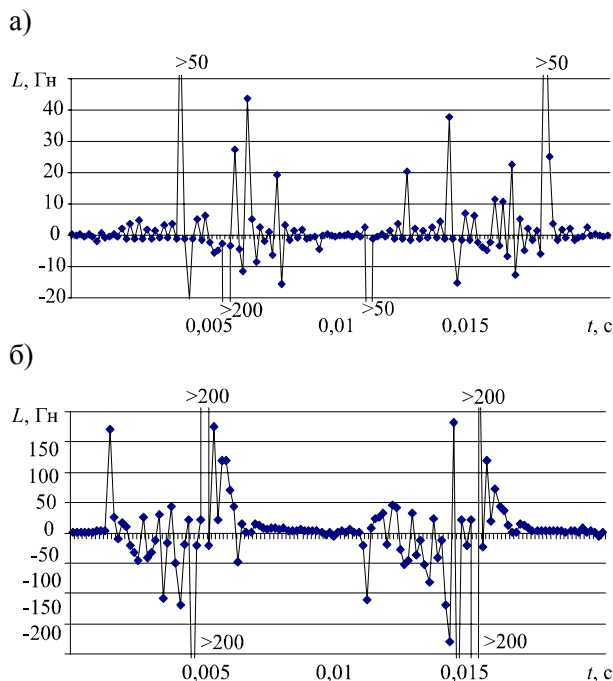


Рис. 4. Залежності еквівалентної індуктивності $L(t)$ для електровозів типу (А): а) ДСЗ при 100; б) 2ЕС5К при 10

Струмова залежність статичного еквівалентного опору R пасивного двополюсника (електровозів) представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Електро- воз ДСЗ	I, A	10,44	21,79	50,7	100,2
	$R, Ом$	4574,88	1406,63	585,65	292,16
Електро- воз 2ЕС5К	I, A	10,1	21,18	47,48	101,78
	$R, Ом$	8396,98	1997,17	742,08	285,67

Як впливає із рис. 5 і 6, еквівалентні індуктивність і ємність приймають і від'ємні значення. Вони визначаються умовами роботи первинного кола електровоза у відповідній області (квадранті) змін напруги $u(t)$ і струму $i(t)$. Ці значення фізичного змісту не мають, а лише розрахункові. Однак, від'ємну індуктивність (у першому наближенні) можна прийняти як якийсь ємнісний елемент і, навпаки, від'ємну ємність – як якийсь індуктивний елемент.

Достовірність схеми заміщення ЕРС, як пасивного двополюсника, а отже й отриманих значень $R(I)$, $L(t)$, $C(t)$ перевірена їх підста-

новкою у рівняння (16) і (20) для кожного моменту часу; ці рівняння справджуються з помилкою 0,3...0,4 %.

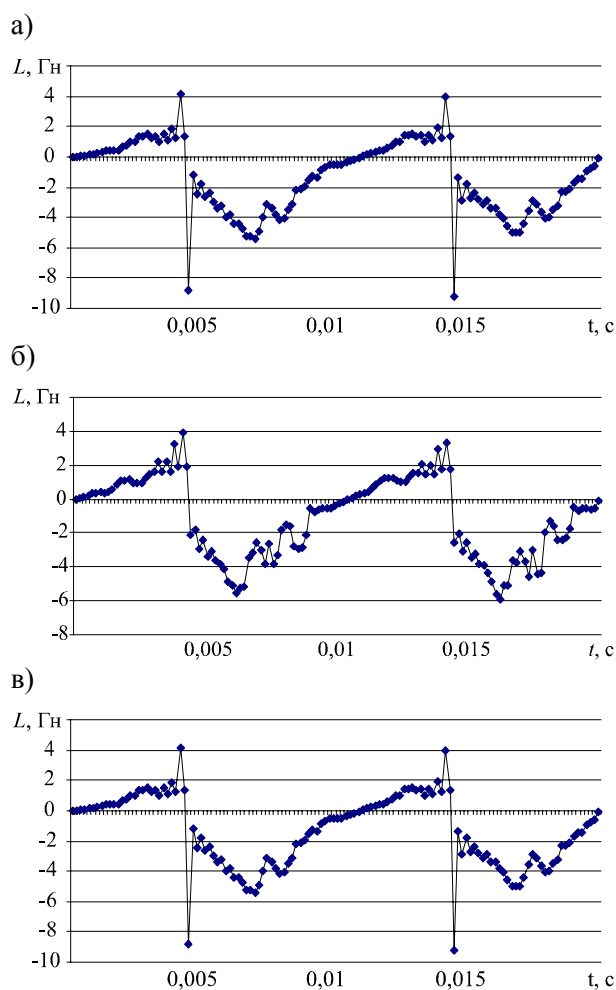


Рис. 5. Залежність параметричного параметру L від часу, розрахованого шляхом розв'язання диференціальних рівнянь для електровозу типу ДСЗ при діючих значеннях струму навантаження (А): а) 20; б) 50; в) 100

Отримані параметри $R(I)$, $L(t)$ і $C(t)$ можуть бути використані у схемі заміщення відповідного ЕРС (у вигляді двополюсника) при математичному моделюванні електромагнітних і електроенергетичних процесів в системі електричної тяги, а запропонований метод ідентифікації може бути застосований для ідентифікації параметрів схем заміщення будь-якого пристрою чи підсистеми системи електротяги.

ВИСНОВКИ

1. Запропонований метод ідентифікації, метод миттєвих потужностей, параметрів підсистем системи електротяги є ефективним засобом математичного моделювання електромагнітних і електроенергетичних процесів.

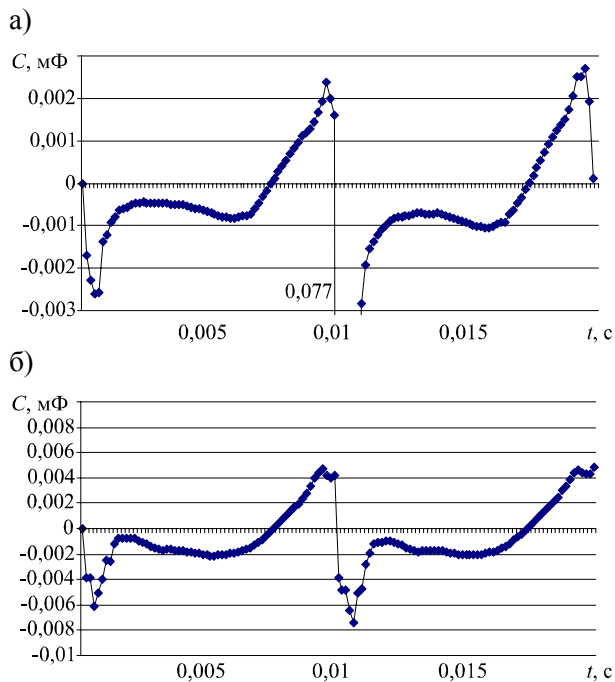


Рис. 6. Залежність параметричного параметру C від часу, розрахованого шляхом розв'язання диференціальних рівнянь для електровозу типу 2ЕС5К при діючих значеннях струму навантаження (A): а) 10; б) 50

2. Отримані чисельними розрахунками параметри $R(I)$, $L(t)$ і $C(t)$ електровозів ДС3 і

2ЕС5К можуть бути практично використані при аналізі процесів на електрифікованих ділянках, де експлуатуються зазначені електровози.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Активные и обменные характеристики электрических цепей при несинусоидальном токе и напряжениях [Текст] / Б. И. Косарев [и др.] // Электричество. – 1989. – № 9. – С. 43–47.
2. Определение параметров устройств электрической тяги по временным характеристикам [Текст] / Б. И. Косарев [и др.] // Вестник ВНИИЖТа. – 1990. – № 3. – С. 15–17.
3. Босий, Д. О. Математичне моделювання електроотягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму [Текст] / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. Тематичн. вип. – 2009. – Ч. 3. – С. 86–89.
4. Теоретические основы электротехники [Текст]: учебник / К. С. Демерчан [и др.]. – М.-СПб.: Питер, 2004. – Т. 1. – 463 с.
5. Саенко, Ю. Л. Реактивная мощность в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Ю. Л. Саенко. – Мариуполь, 2002. – 349 с.

Надійшла до редколегії 05.12.2011.
Прийнята до друку 14.12.2011.

Т. Н. МИЩЕНКО

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ. МЕТОД МГНОВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ; ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Предлагается новый метод идентификации параметров устройств систем электрической тяги. Представлены численные расчеты часовых и токовых зависимостей эквивалентных параметров двухполюсника, схема замещения которого выглядит как параллельное соединение пассивных элементов; расчеты выполнены для электровозов ДС3 и 2ЕС5К.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, эквивалентная схема замещения, идентификация параметров, двухполюсник, параллельное соединение элементов, математическое моделирование

T. M. MISHCHENKO

THEORETICAL ASPECTS AND METHODS OF PARAMETERS IDENTIFICATION OF DEVICES OF THE ELECTRIC TRACTION SYSTEM. METHOD OF INSTANTANEOUS POWERS; PARALLEL CONNECTION OF ELEMENTS

A new method for parameters identification of devices of the electric traction systems is offered. The numerical calculations of time and current dependences of equivalent parameters of two-terminal networks, which equivalent circuit looks as parallel connection of passive elements, are presented; the related calculations are executed for the electric locomotives DC3 and 2ЕС5К.

Keywords: electric locomotive of alternating current, equivalent circuit, identification of parameters, two-terminal network, parallel connection of elements, mathematical simulation