

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

**Вступ:** В системі електричної тяги змінного струму необхідно досліджувати аварійні, тим більше стохастичні, перехідні електромагнітні або (і) електроенергетичні процеси завдяки методам математичного або комп'ютерного (імітаційного) моделювання. Це дозволяє спростити й скоротити натурні випробування, а також розширити можливості досліджень, тому що допускає широку варіацію значень та реальність параметрів елементів силових електричних кіл системи тяги без значних матеріальних витрат. **Мета:** З цією метою пропонується математична модель нелінійної динамічної системи «тягова підстанція – тягова мережа – електрорухомий склад» у вигляді пасивного двополюсника з заданими вхідними напругою та струмом. **Задача:** Задача ідентифікації пристрою, що досліджується, а отже двополюсника, полягає у визначенні електричних параметрів (активного опору індуктивності та ємності) пасивних елементів, які заміщують двополюсник, при чому схема заміщення його виглядає як послідовне з'єднання пасивних елементів. **Методологія:** Пропонується метод розв'язання такої задачі для пасивного двополюсника в режимі тяги зі змінними, несинусоїдними, детермінованими періодичними, вхідними напругою та струмом. Розрахунки виконано для електровозів ДСЗ і 2ЕС5К. **Результати:** Отримані результати параметрів можуть бути застосовані в подальших розрахунках більш складних систем електричної тяги змінного струму.

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

### Вступ

Ця робота є продовженням експериментально-теоретичних досліджень [1] по ідентифікації параметрів підсистем чи пристроїв систем електричної тяги і зокрема електрорухомого складу (ЕРС).

В [1] пасивний двополюсник, що заміщує ЕРС, представлявся паралельним контуром ко-

нтуром  $R-L$  або  $R-C$ , але він може бути заміщений і ділянкою з послідовним з'єднанням нелінійного резистора зі статичним опором  $R_2$  та параметричного елемента  $X_2$  (рис. 1, б), які виконують ті ж самі функції, що  $R$ ,  $L$  або  $R$ ,  $C$  в схемах паралельного з'єднання.

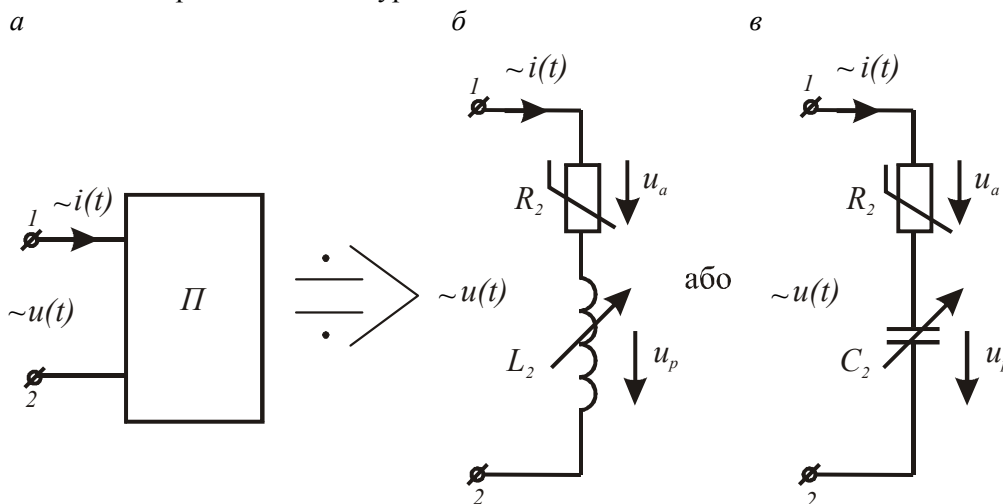


Рис. 1. Схема заміщення пасивного двополюсника ділянкою з послідовним з'єднанням нелінійних елементів

### Теоретичне обґрунтування методу

Розкладемо прикладену до двополюсника напругу  $u(t)$  на дві складові падіння напруги:

активну  $u_a(t)$  на резисторі  $R_2$ , яка співпадає за формою зі струмом  $i(t)$ , та реактивну (неакти-

вну)  $u_p(t)$  на реактивному елементі, ортогональну до  $i(t)$ , (рис. 1, б):

$$u(t) = u_a(t) + u_p(t). \quad (1)$$

Помноживши це рівняння на  $i(t)$ , отримаємо

$$u(t)i(t) = u_a(t)i(t) + u_p(t)i(t). \quad (2)$$

Ліва частина рівняння (2) являє собою повну миттєву потужність  $s(t)$ , а в правій частині – миттєві, відповідно, активна  $p(t)$  та реактивна  $q(t)$  потужності.

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

Підставивши в (3), згідно з рис. 1, б, вираз  $p(t) = u_a(t) = R_2 \cdot i^2(t)$ , та враховуючи ортогональність  $u_p(t)$  та  $i(t)$ , та проінтегрувавши отриманий вираз, отримаємо активну (середню за термін часу  $0 \dots \tau$ ) потужність, що споживається резистором  $R_2$  двополюсника:

$$P = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) dt + \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} q(t) dt =$$

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} R_2 i^2(t) dt = R_2 I^2$$

Звідки

$$R_2 = \frac{P}{I^2}, \quad (4)$$

де  $I$  – діюче значення струму двополюсника за період часу  $[0 \dots \tau]$ .

Визначимо миттєву реактивну потужність  $q(t)$ , вона дорівнює для рис. 1, б:

$$q(t) = u_p(t)i(t) = i(t)[u(t) - u_a(t)] =$$

$$= i(t)[u(t) - R_2 i(t)] = u(t)i(t) - R_2 i^2(t) =$$

$$= u(t)i(t) - \frac{P}{I^2} i^2(t) = u(t)i(t) - R_2 i^2(t). \quad (5)$$

Нехай реактивним елементом в схемі заміщення двополюсника буде індуктивність  $L_2$  (рис. 1, б); визначимо її.

Електромагнітна енергія, що запасається в магнітному полі індуктивності  $L_2$  (при початковій умові, що  $L_2 = const$ ) дорівнює

$$W_m(t) = \frac{L_2 i^2(t)}{2}, \quad (6)$$

де спочатку приймемо, що  $L_2 = const$ .

Її похідна дорівнює  $q(t)$ , тоді

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{2L_2 i(t)i'(t)}{2} = u(t)i(t) - \frac{P}{I^2} i^2(t), \quad (7)$$

Звідки  $L_2$ , як другий параметр (перший –  $R_2$  за формулою (4)) схеми заміщення двополюсника визначиться як

$$L_2(t) = \frac{u(t)i(t) - \frac{P}{I^2} i^2(t)}{i(t)i'(t)}. \quad (8)$$

Тепер нехай з самого початку  $L_2(t)$ , тоді енергія, що накопичується в  $L_2$  буде:

$$W_m(t) = \frac{L_2(t)i^2(t)}{2}. \quad (9)$$

Її похідна, яка дорівнює  $q(t)$ , буде

$$\frac{dW_m}{dt} = q(t) = \frac{2i(t)i'(t)L_2(t) + i^2(t)\frac{dL_2}{dt}}{2}. \quad (10)$$

Спростивши вираз (10) та прирівнявши його формулі (5) отримаємо остаточно диференціальне рівняння для шуканої функції  $L_2(t)$

$$\frac{dL_2}{dt} = 2 \frac{di}{dt} L_2(t) - 2 \frac{u(t)}{i(t)} + 2R_2 = 0. \quad (11)$$

Розглянемо варіант схеми заміщення двополюсника послідовного кола  $R_2 - C_2$  (рис. 1, в). Величина  $R_2$ , як і раніше, визначається за формулою (4); знайдемо  $C_2$ .

Енергія, що накопичується в  $C_2$ , яку спочатку приймемо постійною дорівнює

$$W_e(t) = \frac{C_2 u_c^2}{2} = \frac{C_2 u_p^2(t)}{2} = \frac{C_2 [u(t) - u_a(t)]^2}{2}. \quad (12)$$

Активне падіння напруги дорівнює

$$u_a(t) = R_2 i(t). \quad (13)$$

Підставивши (13) в(12) та узявши похідну від  $W_m$ , отримаємо

$$\frac{dW_e}{dt} = C_2 [u(t)u'(t) - R_2 u'(t)i(t) -$$

$$- R_2 u(t)i'(t) - R_2 i(t)i'(t)] \quad (14)$$

Прирівнявши (14) до виразу (5), отримаємо шуканий параметр

$$C_2(t) = \frac{u(t)i(t) - R_2 i^2(t)}{u(t)u'(t) - R_2 u'(t)i(t) - R_2 u(t)i'(t) + R_2^2 i(t)i'(t)} \quad (15)$$

Тепер розглянемо випадок, що, згідно з початковою умовою,  $C_2$ .

Тоді енергія, що, накопичується в такій ємності, згідно з рис. 1, в, буде:

$$\begin{aligned} \frac{dW_e}{dt} &= \frac{C_2(t)u_p^2(t)}{2} = \frac{C_2(t)}{2} [u(t) - R_2 i(t)]^2 = \\ &= \frac{C_2(t)}{2} [u^2(t) - 2u(t)R_2 i(t) + R_2^2 i^2(t)]. \quad (16) \end{aligned}$$

Взявши похідну від цього виразу і прирівнявши формулі (5), отримаємо рівняння

$$\begin{aligned} \frac{dC_2}{dt} &= \left[ \frac{u^2(t)}{2} - u(t)i(t)R_2 + \frac{R_2^2 i^2(t)}{2} \right] + \\ &+ \left[ \frac{u(t)u'(t) - R_2 u'(t)i(t) - R_2 u(t)i'(t) + R_2^2 i(t)i'(t)}{2} \right] C_2(t) - \\ &- u(t)i(t) + R_2 i^2(t) = 0, \quad (17) \end{aligned}$$

розв'язанням якого знаходимо параметр  $C_2(t)$ .

При ідентифікації не тільки ЕРС, а і всієї фідерної зони, в тому числі з ЕРС, необхідно враховувати пристрої поперечної компенсації, які містять конденсатори, а також треба врахувати ємність контактної мережі. Тому схемою заміщення такої фідерної зони повинна бути послідовне параметричне  $RLC$ -коло (рис. 2).

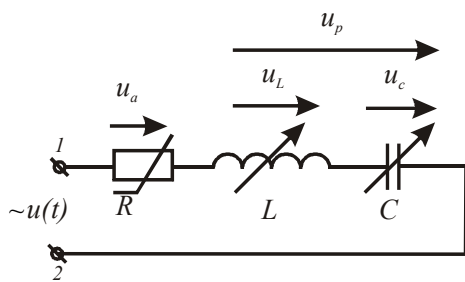


Рис. 2. Схема заміщення фідерної зони з врахуванням пристроїв поперечної компенсації та ємності контактної мережі

Вважаються відомими напруга  $u(t)$  і струм  $i(t)$  на вході фідерної зони (тобто на виході ТП).

Параметр  $R$  знаходиться за попередньо викладеною методикою; знайдемо  $L(t)$  та  $C(t)$ .

З одного боку, миттєва реактивна потужність  $q(t)$  кола схеми заміщення дорівнює

$$\begin{aligned} q(t) &= [u_L(t) + u_C(t)]i(t) = \\ &= [u(t) - u_a(t)]i(t) = \\ &= [u(t) - Ri(t)]i(t). \quad (18) \end{aligned}$$

З іншого боку,  $q(t)$  визначається швидкістю зміни електромагнітної енергії  $W$ , що накопичується в реактивних елементах

$$\begin{aligned} q(t) &= \frac{dW}{dt} = \frac{d[W_m(t) + W_e(t)]}{dt} = \\ &= \frac{d}{dt} \left[ \frac{\Psi(t)i(t)}{2} + \frac{Q(t)u_C(t)}{2} \right] = \\ &= \frac{d}{dt} \left[ \frac{L(t)i(t) \cdot i(t)}{2} + \frac{C(t)u_C(t)u_C(t)}{2} \right] = \\ &= \frac{d}{dt} \left[ \frac{L(t)i^2(t)}{2} + \frac{C(t)u_C^2(t)}{2} \right] = \\ &= \frac{2 \cdot L(t)i(t)i'(t)}{2} + \frac{L'(t)i^2(t)}{2} + \\ &+ \frac{2C(t)u_C(t)u_C'(t)}{2} + \frac{C'(t)u_C^2(t)}{2}. \quad (19) \end{aligned}$$

Як відомо, для вітки з ємнісним елементом

$$u_C(t) = \frac{1}{C(t)} \int i(t) dt, \quad (20)$$

а

$$u_C'(t) = \frac{i(t)}{C(t)}. \quad (21)$$

Тоді (19) прийме вигляд

$$\begin{aligned} q(t) &= L(t) \cdot i(t) \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} L(t) i^2(t) + \\ &+ \frac{i(t)}{C(t)} \int i(t) dt + \frac{1}{2C^2(t)} \int i^2(t) dt. \quad (22) \end{aligned}$$

Прирівняємо вирази (18) та (22)

$$\begin{aligned} [u(t) - Ri(t)]i(t) &= \\ &= L(t)i(t) \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} L(t) i^2(t) \\ &+ \frac{i(t)}{C(t)} \int i(t) dt + \frac{1}{2C^2(t)} \int i^2(t) dt. \quad (23) \end{aligned}$$

Рівняння (23) містить дві невідомі,  $L(t)$  та  $C(t)$ , тому необхідно до (23) отримати ще одне рівняння. Виконаємо це наступним чином.

Задані вхідні фідерні несинусоїдні напругу  $u(t)$  і струм  $i(t)$  розкладемо в ряд Фур'є, отримаємо діючі значення напруги  $U^{(k)}$  та струму  $I^{(k)}$  гармонік. Тоді можна записати повний опір  $Z^{(k)}$  для  $k$ -ї гармоніки послідовної  $RLC$ -кола (рис. 2), як

$$Z^{(k)} = \frac{U^{(k)}}{I^{(k)}} = \sqrt{R^2 + \left[ k\omega L(t) + \frac{1}{k\omega C(t)} \right]^2},$$

звідки

$$k \cdot \omega L(t) - \frac{1}{k\omega C(t)} = \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R^2}. \quad (24)$$

Це рівняння (24) і є другим (до рівняння (23)) рівнянням для визначення параметрів  $L(t)$  та  $C(t)$ . В (24):  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ c}^{-1}$ ; « $k$ » імовірно за все треба взяти рівною 1.

В попередніх методах приймалось, що за період  $T$  ЕРС, тобто пасивний двополюсник, споживає певну активну потужність  $P$  і тоді параметр  $R$  був прийнятий нелінійним, статистичний опір якою знаходився як

$$R = \frac{P}{I^2} \text{ або } R = \frac{U^2}{P}$$

і тоді індуктивність  $L$  визначали за виразами (8) та (11).

Тепер миттєву реактивну потужність запишемо як

$$q(t) = s(t) - p(t) = ui - R(t)i^2$$

і

$$q(t) = \frac{dW_m}{dt} = \frac{d\left(\frac{Li^2}{2}\right)}{dt} = L(t)ii'. \quad (25)$$

Маємо:

$$ui - R(t)i^2 = L(t)ii'. \quad (26)$$

Із осцилограми  $u(t)$  і  $i(t)$  знаходимо  $\varphi$ , а із трикутника опорів для моменту  $t$ :  $\frac{\omega L}{R} = \text{tg}\varphi$ .

$$\text{Звідки } R = \frac{\omega L}{\text{tg}\varphi} = \frac{314}{\text{tg}\varphi} \cdot L;$$

$$R(t) = \frac{314}{\text{tg}\varphi} L(t). \quad (27)$$

Після підстановки маємо

$$L(t) = \frac{u}{i' + \frac{314i}{\text{tg}\varphi}}. \quad (28)$$

### Результати чисельних розрахунків параметрів

На рис. 3 і рис. 4 приведені отримані за наведеними формулами значення еквівалентних параметрів  $L(t)$  та  $C(t)$  за період, а в таблиці подані значення статичного еквівалентного опору  $R(I)$ .

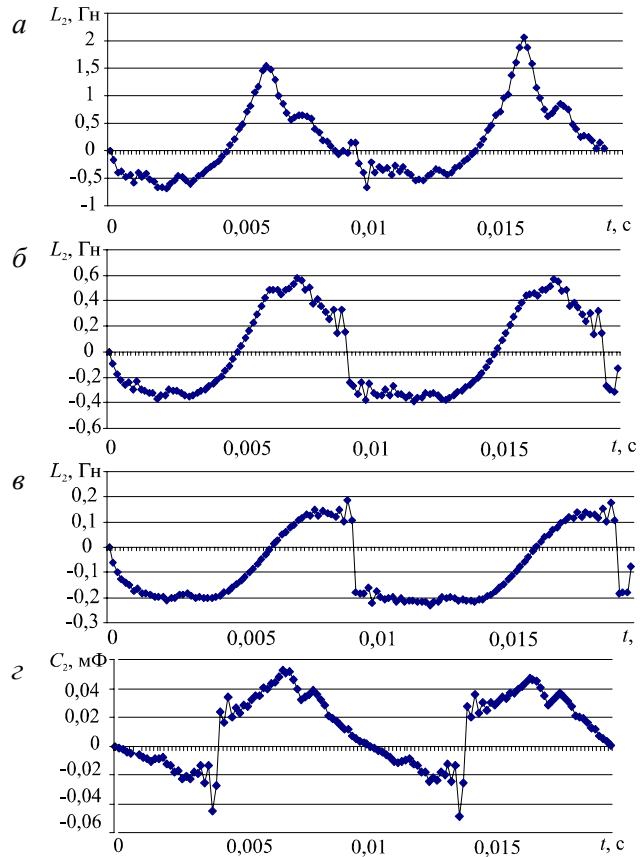


Рис. 3. Залежність параметричних параметрів  $L$  та  $C$  від часу, розрахованих шляхом розв'язання диференціальних рівнянь для електровозу типу ДСЗ при діючих значеннях струму навантаження: а – 20А; б – 50А; в) – 100А; г) 100А

Таблиця

|                           |             |         |         |        |        |
|---------------------------|-------------|---------|---------|--------|--------|
| Електро-<br>ровоз<br>ДСЗ  | $I$ ,<br>А  | 10,44   | 21,79   | 50,7   | 100,2  |
|                           | $R$ ,<br>Ом | 4574,88 | 1406,63 | 585,65 | 292,16 |
| Електр-<br>ровоз<br>2ЕС5к | $I$ ,<br>А  | 10,1    | 21,18   | 47,48  | 101,78 |
|                           | $R$ ,<br>Ом | 8396,98 | 1997,17 | 742,08 | 285,67 |

Як впливає із рис. 3 і рис. 4 і роботи [1], еквівалентні параметри  $R$ ,  $L$  та  $C$  пасивного двополюсника, як схеми заміщення ЕРС (елек-

тровозів ДСЗ та 2ЕС5к), являються різними при зміні електронавантаження, тобто діючого значення тягового струму  $I$ .

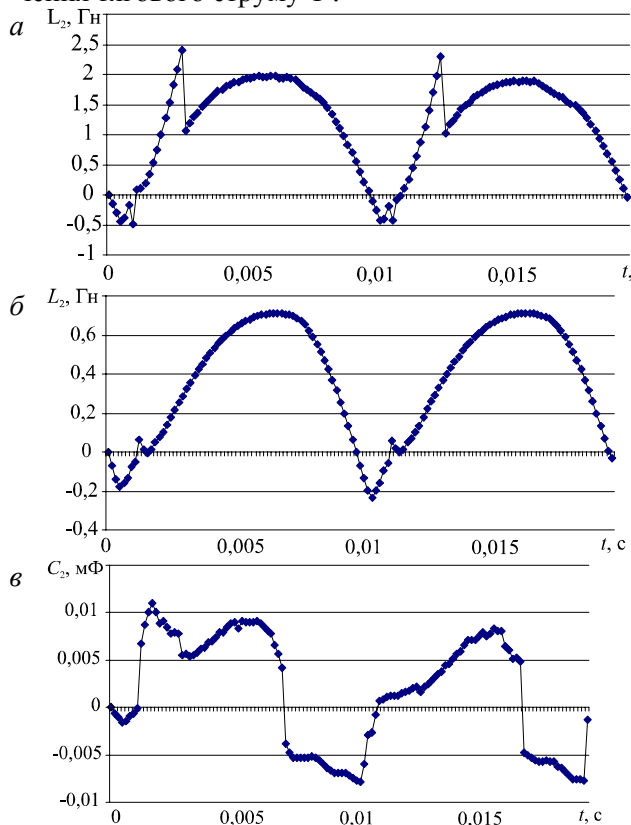


Рис. 4. Залежність параметричних параметрів  $L$  та  $C$  від часу, розрахованих шляхом розв'язання диференціальних рівнянь для електровозу типу 2ЕС5к при діючих значеннях струму навантаження: а) – 50А; б) – 100А; в) – 50А

І в той же час, як відомо, тяговий струм  $I$  є випадковою величиною. Тому і параметри  $R$ ,  $L$  та  $C$  будуть випадковими величинами. В результаті розглядувана задача є задачею імовірно-статистичної ідентифікації параметрів, випадковий характер значень яких обумовить формування і розв'язання системи стохастичних диференціальних рівнянь електромагнітного стану досліджуваної підсистеми чи пристрою електричної тяги.

### Висновки

1. Згідно з запропонованим методом ідентифікації, схема заміщення пасивного двополосника, як одиниці ЕРС, може бути представлена ділянкою з послідовним з'єднанням статистичного опору та параметричної індуктивності чи ємності.

2. Згідно з виконаними розрахунками, отримані для електровозів ДСЗ та 2ЕС5к пара-

метри  $R$ ,  $L$  та  $C$  являються нелінійно-параметричними величинами.

3. Враховуючи випадковий характер величин  $R$ ,  $L$  та  $C$ , розглядувана задача ідентифікації є задачею імовірно-статистичної ідентифікації.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міщенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; паралельне з'єднання елементів / Т.М. Міщенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2012.
2. Активные и обменные характеристики электрических цепей при несинусоидальном токе и напряжениях / Б.И. Косарев, А.И. Щуров, А.В. Фролов, А.Н. Силкин // Электричество. – 1989. – № 9. – С.43–47.
3. Определение параметров устройств электрической тяги по временным характеристикам / Б.И. Косарев, С.В. Ключников, А.В. Фролов, А.И. Щуров // Вестник ВНИИЖТа. – 1990. – № 3. – С.15–17.
4. Босий, Д.О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму / Д. О. Босий, В.Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. – 2009. – Ч. 3. – С.86–89
5. Теоретические основы электротехники : учебник / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – Москва–Санкт-Петербург : Питер, 2004. – Т. 1. – 463 с.
6. Саенко, Ю. Л. Реактивная мощность в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками : дис. ... доктора техн. наук / Ю. Л. Саенко. – Мариуполь, 2002. – 349 с.
7. Kotelnikov, A. Basic requirements for systems and devices of high and very high speed lines traction supply systems /A. Kotelnikov // Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe : proceedings of the 6th International Conference (September 25 – 27, 2003). – Warszawa, 2003. – P. 35-40.
8. Fryze, S. Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusformigen Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // Elektrotechnische Zeitschrift. – 1932. – Т. 25. – S. 596–599; Т. 26. – S. 625–627; Т.29. – S. 700–702.
9. Kostin N. A. Development of phase integrals method for problems of non-linear electrical engineerings / N.A. Kostin // Computational Problems of Electrical Engineering : proceedings of IVth International Workshop (September 2–5, 2002). – Zakopane, 2002. – P. 145-147.

Надійшла до редколегії 17.12.2012.

Прийнята до друку 19.12.2012.

Т. Н. МИЩЕНКО

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ. МЕТОД МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ; ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

**Введение:** В системе электрической тяги переменного тока необходимо исследовать аварийные, тем более стохастические, переходные электромагнитные или (и) электроэнергетические процессы благодаря математическому или компьютерному (имитационному) моделированию. Это позволяет упростить и сократить натурные испытания, а также расширить возможности исследований, потому что допускает широкую вариацию значений и реальность параметров элементов силовых электрических цепей системы тяги без значительных материальных расходов. **Цель:** С этой целью предлагается математическая модель нелинейной динамической системы «тяговая подстанция – тяговая сеть – электроподвижной состав» в виде пассивного двухполюсника с заданными входными напряжением и током. **Задача:** Задача идентификации устройства, которое исследуется, а следовательно двухполюсника, заключается в определении электрических параметров (активного сопротивления индуктивности и емкости) пассивных элементов, которые замещают двухполюсник, при чем схема замещения его выглядит как последовательное соединение пассивных элементов. **Методология:** Предлагается метод решения такой задачи для пассивного двухполюсника в режиме тяги с переменными, несинусоидными, детерминированными периодическими, входными напряжением и током. Расчеты выполнены для электровозов ДС3 и 2ЭС5К. **Результаты:** Полученные результаты параметров могут быть применены в последующих расчетах более сложных систем электрической тяги переменного тока.

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

T. M. MISHCHENKO

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

**Introduction:** By means of the mathematical or computer (imitating) modeling the emergency, especially stochastic, transient electromagnetic and / or electro energetic processes in the electric traction system of the alternating current should be investigated. It allows expanding the research opportunities, as well as simplifying and reducing the actual testing, because it permits the wide variation of values and parameters reality of the elements of electric power circuits in the traction system without considerable material costs. **Purpose:** For this purpose the mathematical model of the nonlinear dynamical system "traction substation – electric traction network – electric rolling stock» as a passive two-terminal network with the given input voltage and input current is proposed. **Task:** The identification problem of the device under study, therefore the two-terminal network, is the determination electrical parameters (active resistance to inductance and capacity) of the passive elements, which substitute the two-terminal network. The scheme of its substitution looks like the series connection of passive elements. **Methodology:** The method of solving this problem for the passive two-terminal network in the traction mode with alternating, nonsinusoidal, deterministic periodic input voltage and input current is proposed. The calculations are executed for the electric locomotives DS3 and 2ES5K. **Results:** The results for the parameters can be applied in the further calculations of the more complex electric traction systems of the alternating current.

*Keywords:* alternating current electric locomotive, equivalent replacement scheme, parameters identification, two-terminal network, series connection of elements, mathematical modeling