

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.423.1:621.333–047.58

Т. М. МІЩЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (097) 485 68 21, ел. пошта mishchenko\_tn@ukr.net

### ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ. МЕТОД ЦИКЛІЧНОЇ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Мета.** Визначити особливості чисельних розрахунків математичної моделі з однією чи декількома циклічними вольт-амперними характеристиками (ВАХ). Це є актуальним, бо будь-який пристрій системи електричної тяги та і взагалі електрифікованої ділянки, як нелінійний пасивний або активний двополюсник, однозначно в даному режимі його роботи описується (характеризується) ВАХ, побудованою за заданими вхідними напругою та струмом. **Методика.** Задача розрахунку електромагнітних процесів в силових колах тягового електропостачання є імовірнісною задачею з розв'язанням нелінійних стохастичних диференціальних рівнянь, тому потребує розробки спеціального методу. Враховуючи складність розрахунків, їх доцільно здійснювати або з обходом графіка реальної ВАХ, або удаватися спершу до її еквівалентної наближеної заміни, наприклад, еліпсом. **Результати.** Чисельні розрахунки математичної моделі з однією чи декількома циклічними ВАХ можливо здійснювати або обходом «реальної» ВАХ, або удатися до «ідеалізації», тобто наближеної заміни реальної циклічної ВАХ. **Наукова новизна.** В роботі представлено динамічні ВАХ електровозів відповідно ДСЗ і 2ЕС5К при різних струмах їх навантаження. **Практична значимість.** Циклічна ВАХ може бути закономірно і однозначно використана в системі рівнянь електромагнітного стану при розрахунку перехідних режимів в системі тяги для найбільш «важкого та складного» (чи (та) найбільш «легкого») режиму.

*Ключові слова:* ідентифікація параметрів; електрифікована ділянка; моделювання; електромагнітні процеси; перехідні режими; електровоз; нелінійний, пасивний, активний двополюсник

Ця робота є продовженням досліджень [1, 2] по викладенню методів ідентифікації параметрів підсистем чи пристроїв систем електричної тяги і зокрема електрорухомого складу магістральних залізниць.

#### Вступ та передпосилки

Будь-який пристрій системи електричної тяги, та і взагалі електрифікованої ділянки, як нелінійний пасивний або активний двополюсник, однозначно в даному режимі його роботи описується (характеризується) вольт-амперною характеристикою (ВАХ), побудованою за заданими вхідни-

ми напругою та струмом. ВАХ може бути побудована за експериментально отриманими миттєвими величинами напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$  (динамічна ВАХ), для діючих значень  $U(I)$ , за середніми значеннями або для перших гармонік  $U^{(1)}$  та  $I^{(1)}$  [3]. Для аналізу процесів в перехідних режимах застосовується тільки динамічна ВАХ, тобто  $u(i)$ . Графічний вид цієї ВАХ залежить від характеру зміни  $u(t)$  та  $i(t)$ . Якщо  $u(t)$  та  $i(t)$  несинусоїдні, але періодичні, мають місце наступні випадки [4, 5]:

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

а) напруга та струм співпадають за фазою, існує пряма пропорційність між ними у часі і, як результат, миттєвий повний опір  $Z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} = \text{const}$ ; в цьому випадку  $u(i)$  – лінійна залежність (рис. 1). Зазначимо, що це характерно для лінійного пасивного двополюсника;

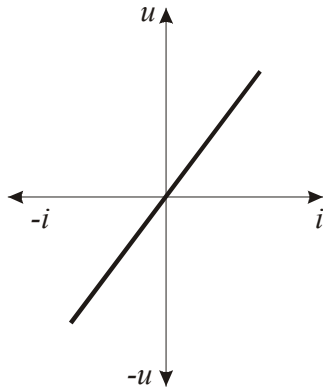


Рис. 1

б)  $u(t)$  та  $i(t)$  співпадають за фазою, але немає прямої пропорційності між ними, тобто  $Z(t) \neq \text{const}$ , однак і  $u(t)$ , і  $i(t)$  однаково симетричні відносно вісі ординат; в цьому випадку ВАХ  $u(i)$  – однозначна нелінійна залежність (рис. 2). Такі «властивості»  $u(t)$ ,  $i(t)$  та ВАХ характерні для нелінійного двополюсника;

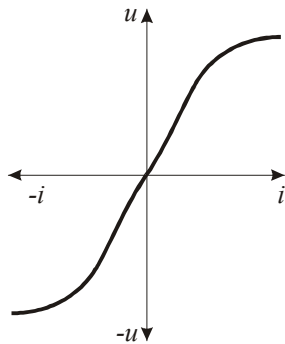


Рис. 2

в) те ж саме, що і випадку «б», але має місце симетрія  $u(t)$  та  $i(t)$  відносно початку координат, а не вісі ординат; в цьому випадку ВАХ представляє собою нелінійну неоднозначну петльово-циклічну залежність (рис. 3);

г) і, насамкінець, найбільш загальний випадок: напруга та струм не співпадають за фазою, немає прямої пропорційності між ними, тобто

$Z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \neq \text{const}$ , немає симетрії кривих  $u(t)$

та  $i(t)$ ; в цьому випадку динамічна ВАХ представляє собою нелінійну неоднозначну циклічну залежність (рис. 4).

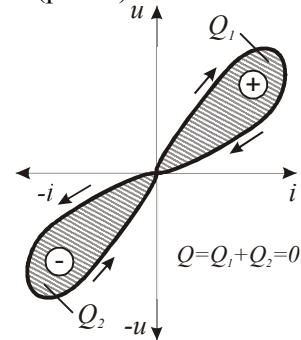


Рис. 3

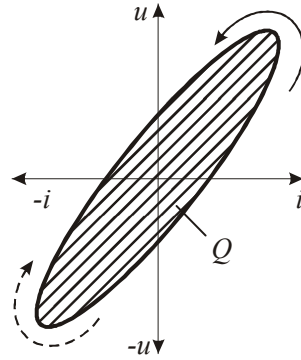


Рис. 4

Можливо довести, що реактивна потужність  $Q$ , що споживається (або генерується) двополюсником за період зміни  $u(t)$  та  $i(t)$ , пропорційна площі, що описується циклічною ВАХ за період повторності. Це справедливо у випадку «г» (рис. 4) і не має місця у випадку «в» (рис. 3). Площа циклічної ВАХ (рис. 4), що описується переміщенням робочої точки за ходом годинникової стрілки, відповідає споживаній (додатній) двополюсником реактивній потужності, а площа, що описується переміщенням проти ходу годинникової стрілки, відповідає реактивній потужності двополюсника, що генерується (від'ємній). Отже, циклічна ВАХ може бути закономірно і однозначно бути використана в системі рівнянь електромагнітного стану при розрахунку перехідних режимів в системі тяги. Її неоднозначність для всіх режимів роботи може бути скомпенсована тим, що в розрахунках використовується ВАХ, яка отримана

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

експериментально для найбільш «важкого та складного» (чи (та) найбільш «легкого»), за  $u(t)$  та  $i(t)$ , режиму.

Чисельні розрахунки математичної моделі з однією чи декількома циклічними ВАХ можливо здійснювати або обходом «реальної» ВАХ, або вдається до «ідеалізації», тобто наближеної заміни реальної циклічної ВАХ. Істотно, при ідеалізації ВАХ треба зберегти всі характерні основні риси процесу, що вивчається, виключивши, заради спрощення розрахунків, неістотні фактори. Наприклад, один із способів такої ідеалізації в задачах оцінки максимальних струмів в фідерах є нехтування гістерезисом в циклічній ВАХ, тобто перетворення її однозначною лінійною або нелінійною залежністю з наступною її апроксимацією ступеневим рядом. Істотно, що таку ідеалізацію ВАХ в задачах оцінки потужностей та втрат в елементах системи тяги проводити неможна.

Ще одним способом ідеалізації циклічної ВАХ є представлення її еквівалентним класичним еліпсом. Для цього, перш за все, необхідно вхідні до двополюсника напругу  $u(t)$  та струм  $i(t)$  замінити еквівалентними синусоїдами, користуючись відомим методом еквівалентних синусоїд [3, 6]. Далі, можна записати рівняння еліпса, еквівалентного «горизонтальній» циклічній ВАХ (рис. 5) як

$$\frac{y^2}{b^2} + \frac{x^2}{a^2} = \frac{u^2(t)}{b^2} + \frac{i^2(t)}{a^2} = 1 \quad (1)$$

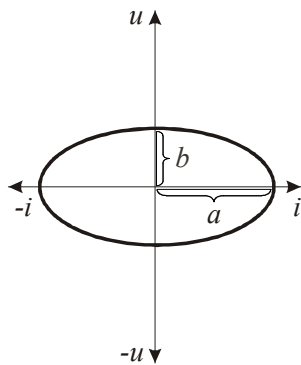


Рис. 5

Але реальні значення  $u(t)$  та  $i(t)$  такі, що циклічна ВАХ може зайняти будь-яке положення в системі координат  $u-i$ . Тому у подальшому потрібно трансформувати рівняння (1) в рівняння еліпса іншого виду. Потім з цього

рівняння отримати функцію  $u(i)$  та використати в математичній моделі як характеристику двополюсника.

Математичне перетворення рівняння (1) еліпса вигляду рис. 5 в рівняння еліпса вигляду рис. 6 полягає в наступному.

Згідно з [7], маємо

$$\begin{aligned} x &= X \cos \alpha - Y \sin \alpha, \\ y &= X \sin \alpha + Y \cos \alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

підставляємо (2) в рівняння (1), отримаємо

$$\frac{(X \sin \alpha + Y \cos \alpha)^2}{b^2} + \frac{(X \cos \alpha - Y \sin \alpha)^2}{a^2} = 1. \quad (3)$$

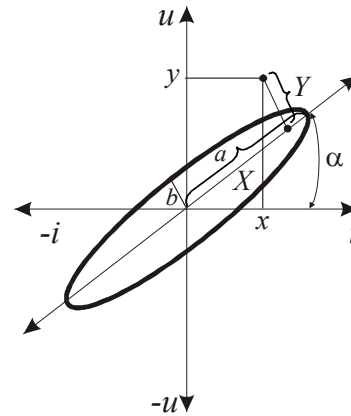


Рис. 6

Перетворимо (3) відносно  $Y$ , маємо:

$$Y = \frac{1}{2} \frac{-2b^2 X \cos \alpha \sin \alpha + 2a^2 X \cos \alpha \sin \alpha - \sqrt{a^4 X^2 \cos^2 \alpha^2 \sin^2 \alpha^2 - 2a^2 X^2 \cos^2 \alpha^2 \sin^2 \alpha^2 b^2 + b^4 X^2 \cos^2 \alpha^2 \sin^2 \alpha^2 + b^4 \sin^2 \alpha^2 a^2 - b^4 \sin^2 \alpha^2 X^2 + b^4 \sin^4 \alpha^2 X^2 - 2b^2 \sin^4 \alpha^2 a^2 X^2 + a^4 b^2 - a^2 b^2 X^2 + 2a^2 b^2 X^2 \sin^2 \alpha^2 - a^4 X^2 \sin^2 \alpha^2 - a^4 \sin^2 \alpha^2 b^2 + a^4 \sin^4 \alpha^2 X^2}}{-b^2 \sin^2 \alpha^2 - a^2 + a^2 \sin^2 \alpha^2}. \quad (4)$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

## Циклічні ВАХ електровозів

На рис. 7-10 представлено динамічні ВАХ електровозів відповідно ДС3 і 2ЕС5К, із яких випливає наступне.

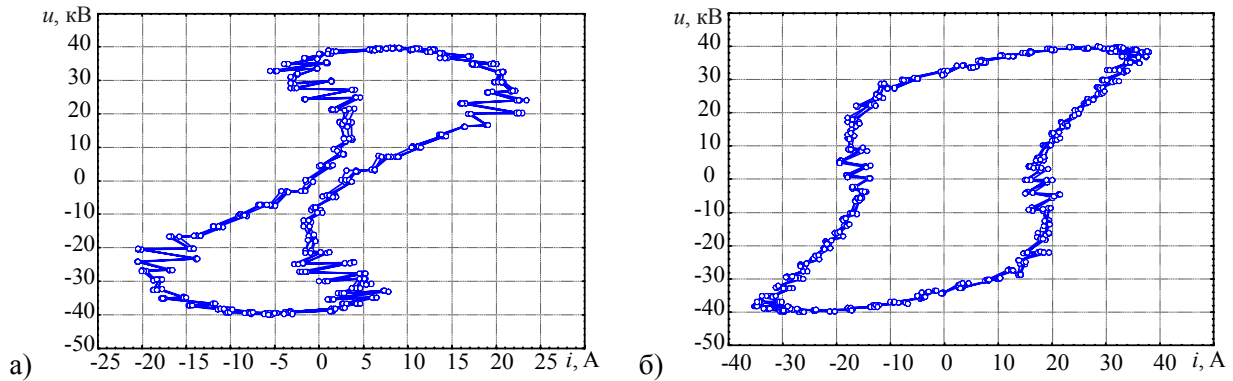


Рис. 7. Циклічні динамічні ВАХ електровоза ДС3 при струмі навантаження  $I$  (А): а) 10; б) 20

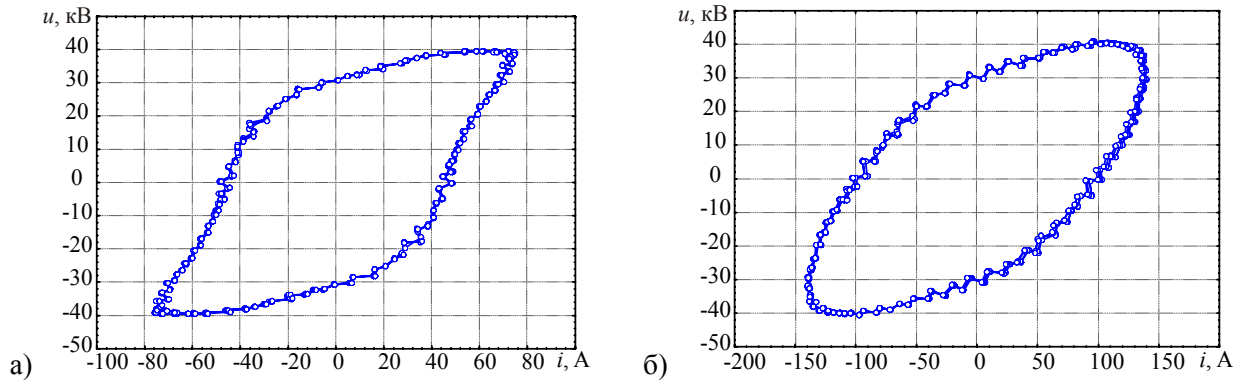


Рис. 8. Циклічні динамічні ВАХ електровоза ДС3 при струмі навантаження  $I$  (А): а) 50; б) 100

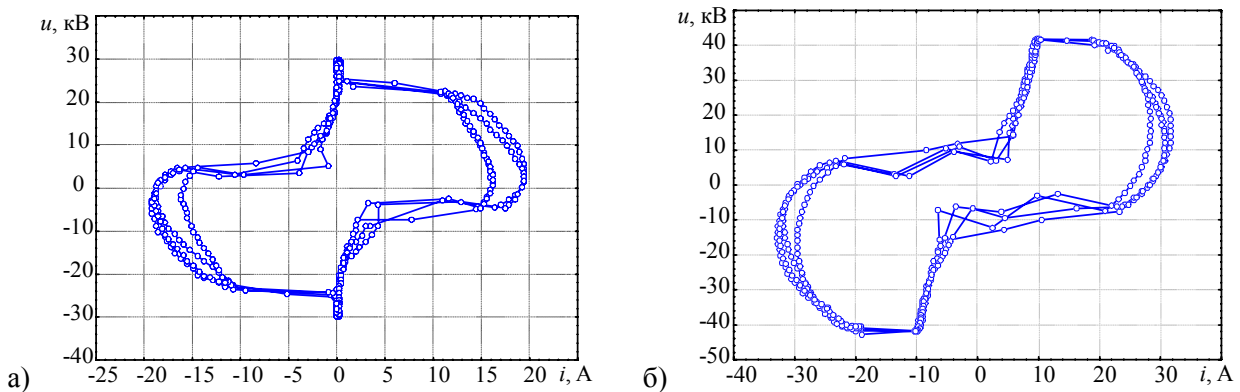


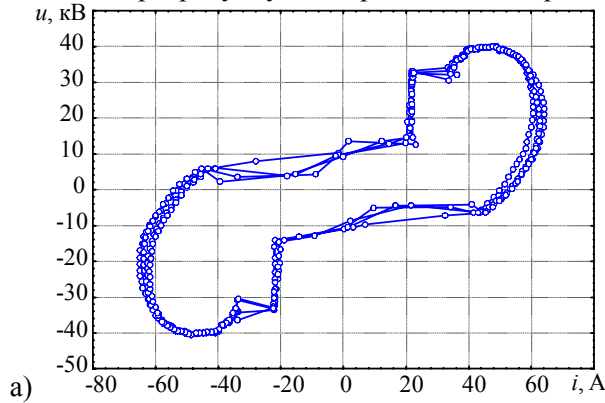
Рис. 9. Циклічні динамічні ВАХ електровоза 2ЕС5К при струмі навантаження  $I$  (А): а) 10; б) 20

По-перше, вони відповідають найбільш загальному випадку «г» і рис. 4, тобто, являються нелінійними неоднозначними. По-друге, ці ВАХ є циклічними і різними за формою при різних значеннях струму  $I$  електровоза, тобто залежать від електротягового навантаження. А оскільки тяговий струм електровоза є випадко-

вою величиною, то і ВАХ є випадковою за формою і значеннями на ній напруги  $u$  та струму  $i$  (рис. 7-10) в усьому діапазоні зміни струму навантаження  $I$  при веденні, особливо швидкісному [8, 9], поїзда на даній фідерній зоні. Отже, як і в попередніх методах [1, 2], і ця задача ідентифікації є імовірно-статистичною іденти-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

фікацією. А враховуючи ще й те, що напруга і на струмоприймачі електровоза, і на тяговій підстанції, і в тяговій мережі є теж випадковою величиною (більш того, випадковим процесом), то задача розрахунку електромагнітних проце-



сів в силових колах тягового електропостачання є імовірнісною задачею з розв'язанням нелінійних стохастичних диференціальних рівнянь, а, отже, потребує розробки спеціального методу.

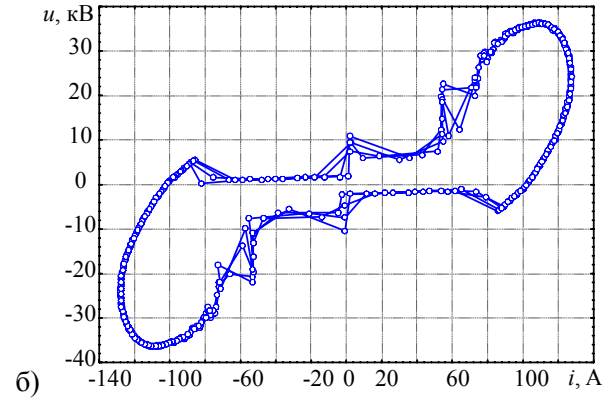


Рис. 10. Циклічні динамічні ВАХ електровоза 2ЕС5К при струмі навантаження  $I$  (А): а) 50; б) 100

## Практичне застосування методу ВАХ

В якості прикладу застосування (поки що без чисельних розрахунків) методу ВАХ для аналізу процесів в системі електричної тяги розглянемо режим короткого замикання в тяговій мережі при одному поїзді (електровозі, ЕРС) на фідерній зоні (рис. 11), де  $R_T$ ,  $L_T$ ,  $R_p$ ,  $L_p$  – активні опори і індуктивності відповідно тягової мережі і рельса.

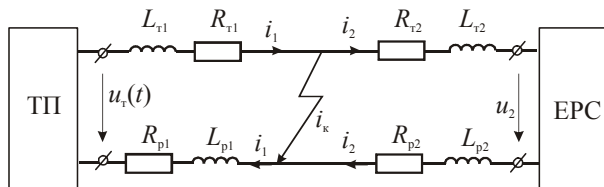


Рис. 11. Система електричної тяги в режимі короткого замикання

Математична модель системи тяги, згідно з рис. 11, являє собою систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_{T1}i_1(t) + L_{T1} \frac{di_1}{dt} + R_{p1}i_1(t) + L_{p1} \frac{di_1}{dt} = u_T(t), \\ R_{T2}i_2(t) + L_{T2} \frac{di_2}{dt} + R_{p2}i_2(t) + L_{p2} \frac{di_2}{dt} + u_2(i_2) = 0, \\ i_1(t) - i_k(t) - i_2(t) = 0, \end{cases}$$

де  $u_2(i_2)$  – циклічна ВАХ електровозу;  
 $u_T(t)$  – напруга на тяговій підстанції (ТП).

## Висновки

1. Метод циклічних ВАХ, як і інші методи ідентифікації, є імовірнісно-статистичним методом, який вимагає розробки, у свою чергу, імовірнісного методу розв'язання випадкових диференціальних рівнянь стану електротягового постачання.

2. Чисельні розрахунки математичних моделей з циклічними ВАХ доцільно здійснювати або обходом графіка реальної ВАХ, або удаватися спершу до її еквівалентної наближеної заміни, наприклад, еліпсом.

## 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. – Вип. 41. – С. 86–91.
2. Міщенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; послідовне з'єднання елементів / Т. М. Міщенко // Вісник ДНУЗТ Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д. : ДНУЗТ, 2012. – Вип. 42. – С. 121–126.
3. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Д. : ДНУЗТ, 2011. – Т. 3. – 236 с.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

4. Маевский, О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский. – М. : Энергия, 1978. – 320 с.
5. Маевский, О. А. Методы определения реактивной мощности нелинейных электрических цепей с помощью их циклических вольт-амперных характеристик / О. А. Маевский // Вестник НТУ «ХПИ». – Х. : ХПИ, 1970. – № 45(93) : Преобразовательная техника. – Вып. 4. – С. 9–7.
6. Simonyi, K. Theoretische Elektrotechnik / K. Simonyi. – Berlin : VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1964. – 773 p.
7. Привалов, И. И. Аналитическая геометрия / И. И. Привалов. – М. : Наука, 1966. – 2752 с.
8. Lingen, J. Strombelastbarkeit von Oberleitungen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs / J. Lingen, P. Schmidt. // Elektrische Bahnen 94 (1996), ½ : P. 38–44.
9. Milz, K. Elektrifizierungssysteme für den Hochgeschwindigkeitsverkehr / K. Milz // Elektrische Bahnen. – 1991. – № 11. – P. 323–325.

Т. Н. МИЩЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электроснабжения железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (097) 485 68 21, эл. почта mishchenko\_tn@ukr.net

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ. МЕТОД ЦИКЛИЧЕСКОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Цель.** Определить особенности численных расчетов математической модели с одним или несколькими циклическими вольт-амперных характеристик (ВАХ). Это актуально, так как любое устройство системы электрической тяги, да и вообще электрифицированного участка, как нелинейный пассивный или активный двухполюсник, однозначно в данном режиме его работы описывается (характеризуется) вольт-амперной характеристикой (ВАХ), построенной по данным входных напряжений и тока. **Методика.** Задача расчета электромагнитных процессов в силовых цепях тягового электроснабжения является вероятностной задачей с решением нелинейных стохастических дифференциальных уравнений, потому нуждается в разработке специального метода. Учитывая сложность расчетов, их целесообразно осуществлять или с обходом графика реальной ВАХ, или прибегать сначала к ее эквивалентной приближенной замене, например, эллипсом. **Результаты.** Численные расчеты математической модели с одной или несколькими циклическими ВАХ осуществляют или обходом «реальной» ВАХ, или прибегают к «идеализации», то есть приближенной замене реальной циклической ВАХ. **Научная новизна.** В работе представлено динамические ВАХ электровозов соответственно ДСЗ и 2ЭС5К при разных токах их нагрузки. **Практическая ценность.** Циклическая ВАХ может быть закономерно и однозначно использована в системе уравнений электромагнитного состояния при расчете переходных режимов в системе тяги для наиболее «тяжелого и сложного» (наиболее «легкого») режима.

**Ключевые слова:** идентификация параметров; электрифицированный участок; моделирование; электромагнитные процессы; переходные режимы; электровоз; нелинейный, пассивный, активный двухполюсник

Т. М. MISHCHENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Department of Electric Power Supply of Railroads of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 485 68 21, e-mail mishchenko\_tn@ukr.net

## THEORETICAL ASPECTS AND METHODS OF PARAMETERS IDENTIFICATION OF THE ELECTRIC TRACTION SYSTEM DEVICES. METHOD OF CYCLIC CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS

**Purpose.** To define the characteristics of numerical calculations of mathematical model with one or more cyclic current voltage characteristics (CVC). This is an urgent problem, since any electric traction system device and elec-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

trified track in general, like non-linear passive or active two-terminal network in the present operating mode is described by current-voltage characteristic (CVC), which is based on the given input voltage and input current. **Methodology.** The electromagnetic process calculation in the power circuits of traction electric energy supply is the probabilistic task with solving nonlinear stochastic differential equations requiring for the development of special methods. Given the calculation difficulty, it is reasonable to perform them either by real CVC graph bypass or initially by applying its equivalent replacement with, for example, an ellipse. **Findings.** Numerical calculations of the mathematical model with one or more cyclic CVC can be performed by “real” CVC bypass or by “idealization” i. e. approximate replacement of real cyclic CVC. **Originality.** This paper presents the dynamic CVC of the DS3 and 2ES5K electric locomotives at different currents of electric locomotives. **Practical value.** Cyclic CVC normally and definitely can be applied in the system of electromagnetic state equations while transient state calculating in the traction system. Therefore while calculating the experimentally obtained CVC for the most “difficult and complex” (or/and the “easiest”) mode is applied.

*Keywords:* identification of parameters, electrified track; modeling; electromagnetic processes; transient state; electric locomotive; non-linear passive or active two-terminal network

## REFERENCES

1. Mishchenko T.M. Teoretychni aspekty ta metody identifikatsii parametriv pristroiv systemy elektrichnoi tiagy. Metod mittievykh potuzhnostey; paralelne ziednannia elementiv [Theoretical aspects and methods of the parameters identification of the electric propulsion devices the swing capacity method; the parallel connection of the elements]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 86-91.
2. Mishchenko T.M. Teoretychni aspekty ta metody identifikatsii parametriv pristroiv systemy elektrichnoi tiagy. Metod mittievykh potuzhnostey; paralelne ziednannia elementiv [Theoretical aspects and methods of the parameters identification of the electric propulsion devices the swing capacity method; the series connection of the elements]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 121-126.
3. Kostin M.O., Sheikina O.G. *Teoretychni osnovy elektrotekhniki. T. 3* (Theoretical foundations of electrical engineering, Vol. 3.), Dnepropetrovsk: DNUZT, 2011. 236 p.
4. Maevskiy O.A. *Energeticheskie pokazateli ventilnykh preobrazovateley* [Energetic indices of the valve inverter]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 320 p.
5. Maevskiy O.A. Metody opredeleniya reaktivnoy moshchnosti nelineynykh elektricheskikh tsepey s pomoshchyu ikh tsyklicheskykh kharakteristik [Methods of reactive power determination of non-linear electric circuits by their cyclic characteristics]. *Vestnik Kharkovskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute], 1970, no. 45, vol. 4, pp. 9-17.
6. Simonyi K. *Theoretische Elektrotechnik*. Berlin, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Publ., 1964. 773 p.
7. Privalov I.I. *Analiticheskaya geometriya* [Analytic geometry]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 272 p.
8. Lingen J., Schmidt P. Strombelastbarkeit von Oberleitungen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs. *Elektrische Bahnen*, 1996, no. 94, pp. 38–44.
9. Milz K. Elektrifizierungssysteme für den Hochgeschwindigkeitsverkehr. *Elektrische Bahnen*, 1991, no. 89. pp. 323– 325.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. О. Костіним (Україна); д.т.н., проф. С. І. Випанасенко (Україна)*

Надійшла до редколегії 13.12.2012

Прийнята до друку 21.02.2013