

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ЗМІННОГО СТРУМУ «ТЯГОВА МЕРЕЖА – ЕЛЕКТРОВОЗ»

1. ВМИКАННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЕЛЕКТРОВОЗА В РЕЖИМІ ХОЛОСТОГО ХОДУ; ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ

В статті наведено електричну схему заміщення і математичну модель системи змінного струму «тягова підстанція – тягова мережа – електровоз ДС 3» при вмиканні його силового трансформатора в режимі холостого ходу. Виконані чисельні визначення параметрів тягової підстанції, рейок, контактної мережі і трансформатора, при цьому особливу увагу приділено оцінці індуктивності розсіювання первинної обмотки трансформатора.

Ключові слова: математична модель, тягова підстанція, параметри тягової мережі, електровоз, трансформатор

В статье приведена электрическая схема замещения и математическая модель системы переменного тока «тяговая подстанция – тяговая сеть – электровоз ДС 3» при включении его силового трансформатора в режиме холостого хода. Выполнены численные определения параметров тяговой подстанции, рельсов, контактной сети и трансформатора, при этом особое внимание уделено оценке индуктивности рассеивания первичной обмотки трансформатора.

Ключевые слова: математическая модель, тяговая подстанция, параметры тяговой сети, электровоз, трансформатор

In the article the electric circuit of substitution and mathematical model of the system of alternating current «traction substation – traction mains – electric locomotive DS 3» at switching its power transformer on in the idle mode are presented. Numerical determinations of parameters of traction substation, rails, contact network and transformer are executed; in so doing a special attention is paid to the estimation of dispersion inductance for the primary winding of transformer.

Keywords: mathematical model, traction substation, parameters of traction mains, electric locomotive, transformer

Вступ

Математичне моделювання електромагнітних процесів в системі змінного струму «тягова мережа – електровоз» було і залишається актуальною проблемою, оскільки дозволяє вирішувати цілий ряд теоретичних і практичних завдань. Моделювання вказаної системи здійснювалося у ряді робіт, але в них автори не звертали увагу на перехідні процеси в режимі холостого ходу тягового трансформатора електровоза. У той же час з теорії трансформаторів відомо, що при вимиканні ненавантаженого трансформатора з феромагнітним осердям в мережу синусоїдальної напруги в його первинній обмотці можливий короточасний стрибок струму намагнічування, значення якого нерідко перевищують в 20 і більше разів амплітуду усталеного значення струму холостого ходу трансформатора. Такі сплески струму можуть викликати не тільки помилкове спрацювання деяких видів захисту, але і механічне руйнування обмотки, оскільки електродинамічні сили, що впливають на неї, пропорційні квадрату

струму. Знання величин зазначених стрибків струму також важливо при оцінці виникаючих перенапруг та електричних показників системи. Окрім цього, розробка адекватної математичної моделі дасть можливість створити необхідне програмне забезпечення для аналізу перехідних електромагнітних процесів в системі замість проведення вартісних натурних її випробувань.

І в той же час досліджуваний режим холостого ходу є нерідкісним режимом роботи електрорухомого складу: він виникає при зрушенні з місця електровоза і частково при переході його струмоприймачем нейтральної вставки контактної мережі.

Ця робота відрізняється від інших подібних публікацій, зокрема від [1-2], врахуванням впливу на перехідний процес режиму холостого ходу параметрів і режимів роботи власне системи тягового електропостачання, тобто, тим, що розглядається вся динамічна система «тягова мережа – електровоз».

Враховуючи важливість дослідження процесів у системі електротяги з новими українсь-

кими електровозами, ця робота виконана на прикладі електровозів ДС 3, що експлуатуються на Південно-Західній залізниці, зокрема на електрифікованій ділянці Боярка–Фастів. При цьому оцінимо вплив на перехідні процеси в системі: параметрів тягової мережі; коливання напруги на виході тягової підстанції; руху електровоза з поїздом; наявності та значень пара-

метрів установки поперечної ємнісної компенсації (УПЄК).

Математична модель системи

Спрощена структурна схема одноколіїної ділянки досліджуваної системи при її двосторонньому живленні представлена на рис. 1.

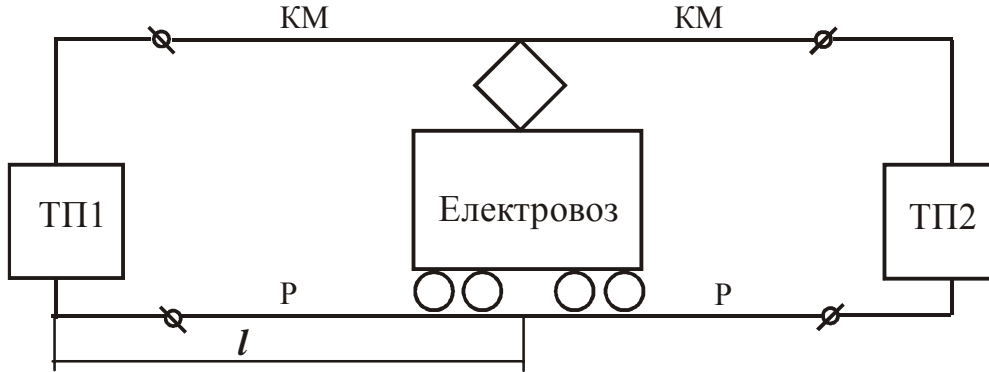


Рис. 1. ТП – тягові підстанції; КМ – контактна мережа; Р – рейка

Принципова схема вхідного кола електровоза ДС 3 з первинною обмоткою його тягового трансформатора у режимі холостого ходу наведена на рис. 2.

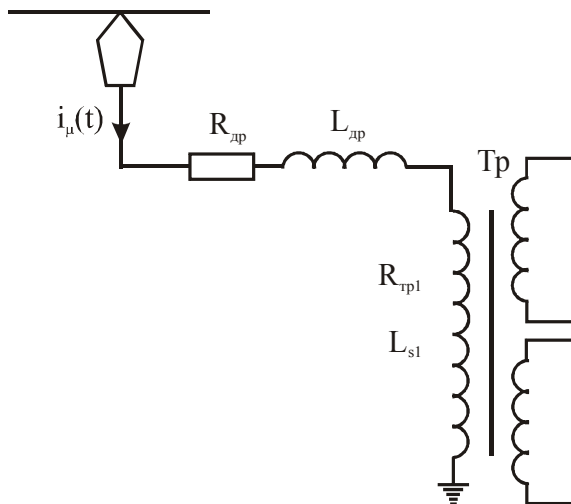


Рис. 2. Електрична схема заміщення ДС 3 в режимі холостого ходу трансформатора

Згідно з рис. 1 та 2, а також з урахуванням ряду припущень, електрична схема заміщення системи «тягова мережа – електровоз» (поки що без урахування УПЄК) приймає вигляд, що наведено на рис. 3, а математична модель перехідних електромагнітних процесів являє собою систему нелінійних рівнянь:

$$(R_{\text{кп}} + R_{\text{р}}) \cdot i_1(t) + (L_{\text{кп}} + L_{\text{р}}) \cdot \frac{di_1}{dt} + (R_{\text{др}} + R_{\text{тр}}) \cdot i_{\mu}(t) + L_{\text{др}} \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} +$$

$$+ w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = u_1(t); \quad (1)$$

$$(R'_{\text{кп}} + R'_{\text{р}}) \cdot i_2(t) + (L'_{\text{кп}} + L'_{\text{р}}) \cdot \frac{di_2}{dt} + (R_{\text{др}} + R_{\text{тр}}) \cdot i_{\mu}(t) + L_{\text{др}} \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} +$$

$$+ w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = u_2(t); \quad (2)$$

$$i_1(t) + i_2(t) - i_{\mu}(t) = 0, \quad (3)$$

де індекси «кп», «р», «др» і «тр» позначають відношення параметрів елементів схеми відповідно до контактної мережі, рейки, дроселю на електровозі і до трансформатора; w_1 та Φ – кількість витків первинної обмотки і магнітний потік трансформатора; L_{s1} – індуктивність розсіювання первинної обмотки трансформатора; $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ – напруга тягової підстанції.

Оцінка параметрів системи

Для чисельного розрахунку процесів в системі рис. 3 за моделлю (1)–(3) при вмиканні електровоза необхідно визначити значення параметрів цієї схеми, що й зробимо у подальшому.

Електрифікована двоколіїна ділянка Боярка-Фастів довжиною 39 км має контактний провід типу МФ-100, несучий трос ПБСМ1-95 та рейка типу R 65, відстань від Боярки до пункту секціонування 23 км. Опір 1 км тягової мережі (з роздільною роботою контактних підвісок) однієї колії цієї ділянки визначимо за формулою [3]:

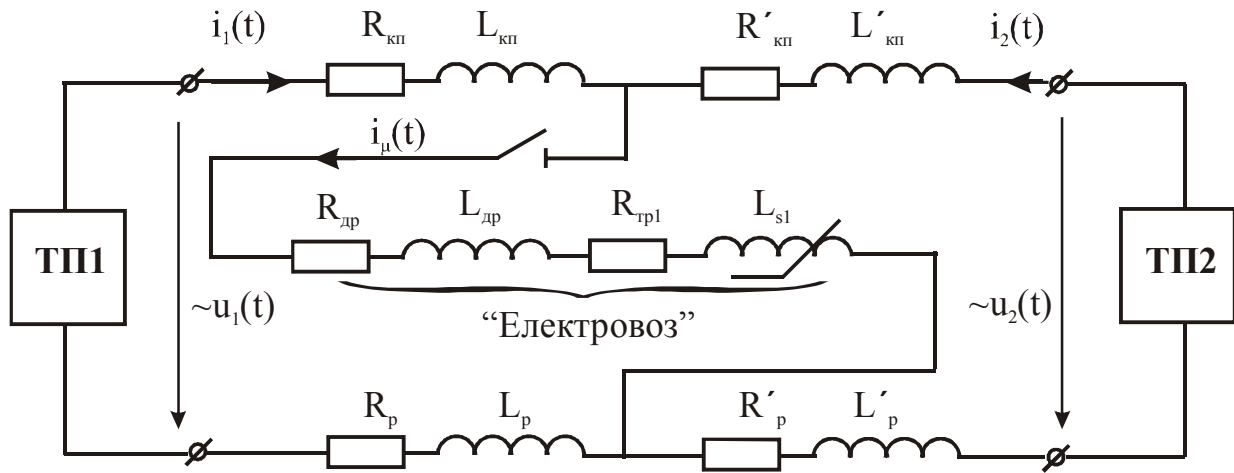


Рис. 3. Схема заміщення системи «тягова мережа – електровоз» в режимі холостого ходу електровоза

$$\underline{Z}_1 = (r_{кп} + jx_{кп}) + \eta_2(r_{p2} + jx_{p2}), \quad (4)$$

де $r_{кп}$, $x_{кп}$ – активний та реактивний опори контактної підвіски однієї колії, Ом/км; r_p , x_p – активний та реактивний опори рейкової ділянки, Ом/км. Ці величини знаходимо за виразами [3]:

$$r_{кп} = \frac{r_k r_T + 0,126}{r_k r_T + 0,504/(r_k + r_T)}; \quad (5)$$

$$x_{кп} = \frac{0,355(r_k^2 + r_T^2) + 0,09}{(r_k + r_T)^2 + 0,504} + 0,106; \quad (6)$$

$$r_{p2} = 0,5r_{pa}; \quad (7)$$

$$x_{p2} = 0,375r_{pa} + 0,0628 \ln(a_{кр} / \sqrt{R_p a_{12}}); \quad (8)$$

де r_k – активний опір 1 км контактного проводу, Ом/км; r_T – активний опір 1 км несучого тросу, Ом/км; r_{pa} – активний опір 1 км однієї рейки при змінному струмі; $a_{кр}$ – висота еквівалентного контактного проводу відносно головки рейок, м; R_p – еквівалентний радіус рейки (радіус кола, яке дорівнює периметру поперечного перетину рейки), м; a_{12} – відстань між осями рейок, м.

Коефіцієнт η_2 визначається за виразом:

$$\eta_2 = a_2 + jb_2, \quad (9)$$

де a_2 , b_2 – середнього струму в рейках для двоколійної ділянки, дійсна та мінлива складова відповідно [3].

В загальному вигляді, згідно з (4), опір \underline{Z}_1 можна записати

$$\underline{Z}_1 = (r_{a1} + jx_1), \quad (10)$$

де r_{a1} , x_1 – результуючі активний та реактивний опори 1 км тягової мережі, Ом/км, що дорівнюють:

$$r_{a1} = r_k + a_2 r_{p2} - b_2 x_{p2}, \quad (11)$$

$$x_1 = x_k + a_2 x_{p2} + b_2 r_{p2}. \quad (12)$$

Взаємний опір розглядуваної тягової мережі визначимо за формулою

$$\underline{Z}_{12} = (\underline{Z}_{кк} + \eta_2 \underline{Z}_{p2}) = r_{12} + jx_{12}, \quad (13)$$

де $\underline{Z}_{кк}$ – опір взаємної індукції між контактними підвісками:

$$\underline{Z}_{кк} = j\omega \cdot 10^{-4} \cdot 2 \ln(a_{кр} / a_{кк}), \quad (14)$$

$$r_{12} = a_2 r_{p2} - b_2 x_{p2}, \quad (15)$$

$$x_{12} = 0,033 + b_2 r_{p2} + a_2 x_{p2} \quad (16)$$

де $a_{кк}$ – відстань між підвісками різних колій; $a_{кр}$ – визначається за виразом (8).

Після підстановки вищенаведених параметрів тягової мережі у вирази (4)–(16), отримаємо реальні значення тягового кола змінного струмі: $r_{a1} = 0,204$ Ом/км, $x_1 = 0,437$ Ом/км, $r_{12} = 0,045$; $x_{12} = 0,163$.

Для того щоб отримати реальні параметри тягового кола скористаємося наступними формулами:

$$R_{a1} = r_{a1}, R_{12} = r_{12}; \quad (17)$$

$$L_1 = x_1 / \omega, L_{12} = x_{12} / \omega; \quad (18)$$

$$R_{тм} = (R_{a1} + R_{12}) \cdot l, \quad (19)$$

$$L_{тм} = (L_1 + L_{12}) \cdot l. \quad (20)$$

де $l = 20,6$ км – відстань від тягової підстанції до поста секціонування.

Після підстановки отриманих раніше загальних параметрів тягового кола у формули (17)–(20), одержимо $R_{тм} = 5,13$ Ом, $L_{тм} = 0,039$ Гн.

Згідно з рис. 2, для розрахунку режиму холостого ходу трансформатора за рівняннями (1)–(3) потрібно також знати параметри первинного кола трансформатора електровоза ДС 3, вони дорівнюють: активний опір дроселя $R_d = 0,0075 \text{ Ом}$; індуктивність – $L_d = 200 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; активний опір трансформатора – $R_{T1} = 1,282967 \text{ Ом}$; кількість витків первинної обмотки трансформатора – $w_{T1} = 1038$; основна крива намагнічування магнітопроводу

з листової сталі 0,3-Н-А-3407 приведена на рис. 3 і апроксимована виразом:

$$\Phi(t) = 0,1234 + 0,0003 \cdot i_{\mu}(t). \quad (21)$$

Як впливає із рис. 3, для розрахунків прийнятні не гістерезисні залежності, а основна крива намагнічування. Це обумовлено тим, що, згідно з [4], з похибкою, яка не перебільшує $\pm 3\%$ по індукції та $\pm 10\%$ по магнітному потоку, матеріал магнітопроводу трансформатора достатньо характеризувати основною кривою намагнічування.

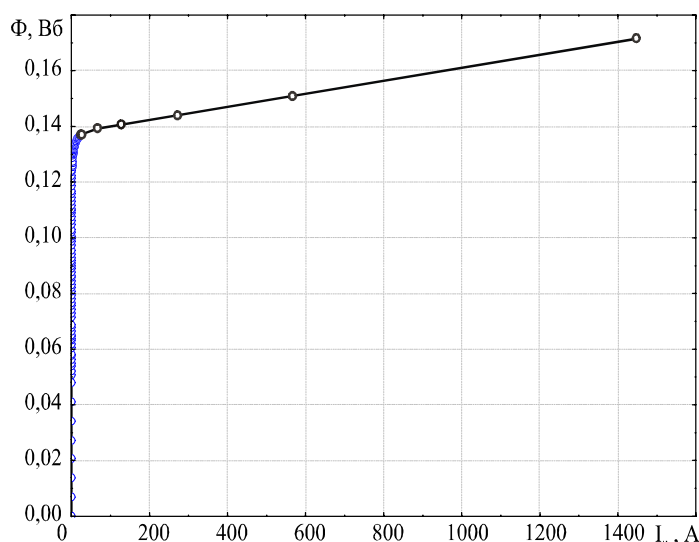


Рис. 4. Основна крива намагнічення магнітопроводу трансформатора електровоза ДС 3

Суттєвий вплив на досліджувані електромагнітні процеси чинить індуктивність розсіювання первинної обмотки трансформатора L_{s1} ; визначимо її. Для її визначення необхідно знати просторове розподілення магнітного потоку розсіювання в осерді трансформатора. Для цього спочатку визначимо повне потокозчеплення вторинної обмотки за виразом [5]:

$$\sum_1^{n_1} \Phi_{s2} \cdot W_{s2} = L_{s2} \cdot I_2 = \mu \cdot \frac{W_2^2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{2}}{l_s} \times \quad (22)$$

$$\times l_{w2} \cdot \left(\frac{a_2}{3} + \frac{\delta_{12}}{2} \right),$$

де Φ_{s2} – магнітний потік розсіювання елементарної трубки; $W_{s2} = W_2 \cdot x/a_2$ – повна кількість витків вторинної обмотки; I_2 – струм у вторинній обмотці; μ – магнітна проникність матеріалу осердя. Оскільки основна частина магнітного опору кожної трубки зосереджена в тій частині трубки, яка знаходиться зовні осердя трансформатора, то магнітна проникність дорівнює μ_0 ; $l_s = l_1/K_p = 0,65155 \text{ м}$ – середня довжина трубок потоків розсіювання обох обмоток;

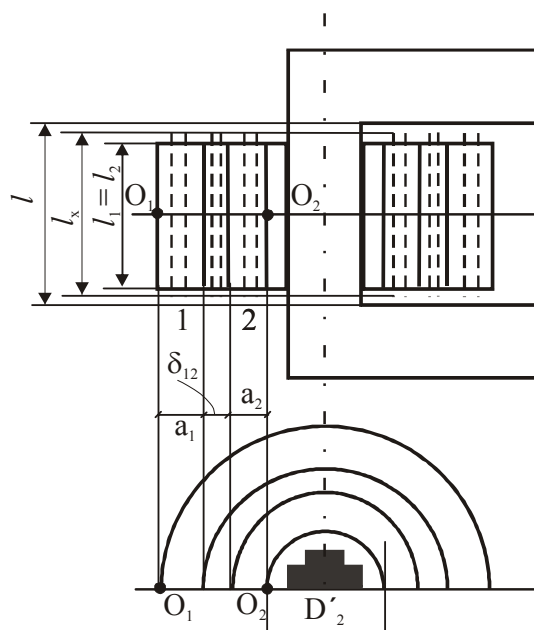


Рис. 5. Обмотка та осердя трансформатора

$l_1 = l_2 = 632 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – довжина обмоток вздовж вікна трансформатора електровоза ДС 3; l_{w2} – середня довжина витка вторинної обмотки помножена на π , яка визначається за формулою:

$$l_{w2} = \pi \cdot \left(D'_2 + \frac{3}{2} \cdot a_2 \right) \approx \pi \cdot \left(D'_2 + 2a_2 + \frac{\delta_{12}}{2} \right), \quad (23)$$

де $D'_2 = 335 \cdot 10^{-3}$ м – внутрішній діаметр вторинної обмотки, $a_2 = (D_{22} - D'_2)/2$ – товщина всієї обмотки 2, $D_{22} = 535 \cdot 10^{-3}$ м – зовнішній діаметри другого шару обмотки 2, $\delta_{12} = (D_1 - D_{22})/2$ – зазор між первинною та вторинною обмотками, $D_1 = 560 \cdot 10^{-3}$ м – внутрішній діаметр первинної обмотки.

Тоді елементарний магнітний потік розсіювання трубки дорівнює:

$$d\Phi_{s2} = \frac{w_{s2} \cdot I_2 \cdot \sqrt{2}}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l_s}{\pi \cdot (D'_2 + 2x) dx}} = \mu \cdot \pi \cdot \frac{D'_2 + 2x}{l_s} \cdot w_{s2} \cdot I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot dx, \quad (24)$$

а елементарне потокозчеплення:

$$w_{s2} \cdot d\Phi_{s2} = \mu \cdot \pi \cdot \frac{D'_2 + 2x}{l_s} \times w_{s2}^2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot dx, \quad (25)$$

Тоді повне потокозчеплення для всієї вторинної обмотки дорівнює:

$$\begin{aligned} \int_0^{a_2} w_{s2} \cdot d\Phi_{s2} &= \int_0^{a_2} \mu \cdot \pi \cdot \frac{D'_2 + 2x}{l_s} \cdot w_{s2}^2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot dx = \\ &= \frac{\mu \cdot \pi \cdot w_{s2}^2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{2}}{l_s \cdot a_2^2} \int_0^{a_2} (D'_2 + 2x) \cdot x^2 \cdot dx = \\ &= \frac{\mu \cdot \pi \cdot w_{s2}^2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{2}}{l_s \cdot a_2^2} \cdot \left(D'_2 \frac{a_2^3}{3} + \frac{a_2^4}{2} \right) = \\ &= \frac{\mu \cdot \pi \cdot w_{s2}^2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{2}}{l_s} \cdot \frac{a_2}{3} \left(D'_2 + \frac{3a_2}{2} \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Для визначення індуктивності розсіювання первинної обмотки звертаємося до формули:

$$L_{s1} = \frac{\sum_1^{n_1} \Phi_{s1} \cdot w_{s1}}{I_1}, \quad (27)$$

де $\sum_1^{n_1} \Phi_{s1} \cdot w_{s1}$ – повне магнітне потокозчеплення первинної обмотки знаходиться за виразом [5]:

$$\sum_1^{n_1} \Phi_{s1} \cdot w_{s1} = \sum_1^{n_1} \Phi_{s2} \cdot w_{s2} \cdot \frac{E_{s1}}{E_{s2}}, \quad (28)$$

де E_{s1} , E_{s2} – е.р.с. розсіювання первинної та вторинної обмоток трансформатора відповідно, які визначаються за формулами:

$$E_{s1} = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot I_1 \cdot \frac{l_{w1}}{l_s} \left(\frac{a_1}{3} + \frac{\delta_{12}}{2} \right), \quad (29)$$

$$E_{s2} = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot w_2^2 \cdot I_2 \cdot \frac{l_{w2}}{l_s} \left(\frac{a_2}{3} + \frac{\delta_{12}}{2} \right), \quad (30)$$

де для трансформатора електровоза ДС 3 $I_1 = 252$ А, $I_2 = 937$ А – струми в первинній та вторинній обмотках.

Після підстановки чисельних даних в (22) – (30) остаточно отримуємо: $L_{s1} = 0,13$ Гн.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бахвалов, Ю. А. Моделирование электромагнитных процессов в цепи силового трансформатора электровоза [Текст] / Ю. А. Бахвалов, Д. А. Лебедев // Тезисы докл. IV междунауч. конф. «Состояние и перспективы развития ЭПС». – 2003. – С. 287-288.
2. Данилов, Д. Й. Переходный процесс при включении тягового трансформатора на холостой ход [Текст] / Д. Й. Данилов // Тезисы докл. 2-го междунауч. симп. «Электрификация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте». – 2003. – С. 122-123.
3. Справочник по электроснабжению железных дорог [Текст] : Т. 1 / под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
4. Лозановский, А. Л. Исследование токовых нестационарных режимов в силовых цепях электровозов методом физического моделирования [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Л. Лозановский. – М.: Всесоюз. науч.-иссл. ин-т, 1963. – 20 с.
5. Костенко, М. П. Электрические машины [Текст] / М. П. Костенко. – М.: Гос. энергетическое изд-во, 1944. – 328 с.

Надійшла до редколегії 18.11.2010.

Прийнята до друку 23.11.2010.