

УДК 621.333.41:629.423:6213.025:519.2

А. В. НІКІТЕНКО^{1*}, М. О. КОСТІН¹

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта nikitenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-6426-5097

¹Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ORCID 0000-0002-0856-6397

ІМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНИЙ І КОРЕЛЯЦІЙНО-СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗИ СТРУМУ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета. У праці необхідно визначити та проаналізувати ймовірнісні й спектральні характеристики випадкового процесу струму рекуперації електрорухомого складу постійного струму різних типів. **Методика.** Використано елементи теорії, методи та методики теорії ймовірностей, зокрема, теорія стаціонарних і нестаціонарних випадкових процесів. Також застосовувались методи математичної статистики з обробкою на персональних ЕОМ масивів значень випадкової величини струму рекуперації. **Результати.** Наведено часові реалізації струму рекуперації електровозів, електропоїздів і трамваїв, які отримано шляхом моніторингу на діючих ділянках залізниць України. Встановлено, що струм має характер неперервних різкозмінних, особливо в трамваїв, часових коливань. Визначено функції математичного сподівання, середньоквадратичного відхилення та дисперсії випадкового процесу струму рекуперації, побудовано гістограми. Обчислено, побудовано й обговорено кореляційні та спектральні функції струму. У результаті встановлено, що струм рекуперації може вважатись стаціонарним неергодичним випадковим процесом. Спектральний аналіз реалізацій цього процесу та «хвоста» кореляційної функції виявив «слабко» періодичні, тобто низькочастотні, складові, які називають інтергармоніками. **Наукова новизна.** По-перше, до аналізу такого суттєво різкозмінного випадкового процесу, яким є струм рекуперації, адаптовано теорію нестаціонарних випадкових процесів. По-друге, вперше встановлено наявність інтергармонік у випадковому процесі струму рекуперації. І, нарешті, встановлено закономірності часової зміни кореляційної функції процесу струму, що дозволяє аргументовано застосувати метод кореляційних функцій при ідентифікації пристроїв системи електричної тяги. **Практична значимість.** Результати ймовірнісно-статистичного аналізу струму рекуперації дозволяють оцінювати якість рекуперованої електроенергії та енергетичні показники електрорухомого складу в режимі рекуперації. Тоді як кореляційно-спектральний аналіз необхідний при визначенні електромагнітної сумісності електрорухомого складу в режимі рекуперації з підсистемами та пристроями електричної тяги.

Ключові слова: метод; випадковий процес; напруга; струм; кореляційна функція; електричний транспорт; дисперсія; спектр; рекуперація

Вступ

Ця робота є продовженням досліджень з аналізу ймовірнісних характеристик випадкових процесів напруги і струму систем електричного транспорту постійного струму в режимах тяги та рекуперативного гальмування [5, 6, 12, 13]. І якщо характер зміни напруги на струмоприймачі вивчено відносно достатньо [9], найчастіше в детермінованому варіанті, то власне часову залежність струму рекуперації взагалі не розглядають в наукових публікаціях. В той же час і якість рекуперованої електроенергії, і енергетичні показники електрорухомого складу в режимі рекуперативного гальмування, як і в режи-

мі тяги [3, 4], неможливо дослідити без вивчення змін характерних параметрів струму рекуперації.

Мета

Оскільки струм рекуперації, згідно з попередніми дослідженнями, є випадковим процесом, то, цілком істотно, що потрібен докладний ймовірнісно-спектральний його аналіз, який дозволить більш правильно оцінити енергоефективність рекуперації [7, 10], що і є метою цієї роботи.

Методика

Ймовірнісно-статистичний та кореляційно-спектральний аналізи струму рекуперації $I(t)$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

виконано для електровозів ВЛ8 і ВЛ11^М, електропоїздів ЕПЛ2Т і трамваїв типу NGТ6 м. Краків (Польща) згідно з роботами [11, 14, 15]. Реалізації $I(t)$ в режимі тяги і рекуперативного гальмування електровозів ВЛ8 отримували на діючій ділянці Нижньодніпровськ-Вузол–Чаплино Придніпровської залізниці за допомогою апаратно-програмного комплексу [12], а для електровозів ВЛ11^М – на діючій ділянці Воловець–Батьово і Лавочне–Львів Львівської залізниці при тягово-енергетичних випробуваннях електровозів. Запис струмів рекуперації для електропоїздів ЕПЛ2Т здійснено на ділянці Сімферополь–Севастополь за допомогою робітників тягово-енергетичного вагона-лабораторії локомотивної служби Придніпровської залізниці. Отримання реалізацій $I(t)$ при рекуперації трамвая в [15] здійснювалось комплексом, блок-схема якого наведена на рис. 1, на якому LEM (I) – датчик досліджуваного струму, що увімкнений в силове коло трамвая і сигнал якого через адаптер А/С в режимі реального часу передається на портативний персональний комп'ютер.

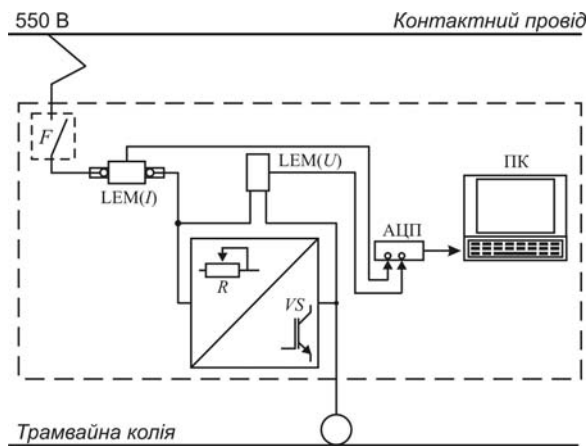


Рис. 1

Fig. 1

Для отримання імовірнісних характеристик випадкового процесу струму рекуперації $I(t)$ його реалізації квантували (дискретизували) за часом. Величину часового інтервалу квантування Δt визначали залежно від спектрального складу $I(t)$, користуючись виразом [1]:

$$\Delta t = \frac{T_{\min}}{5 \dots 10},$$

де T_{\min} – період високочастотних складових процесу $I(t)$.

При визначенні кореляційної функції струму $K_I(\tau)$ поточний зсув часу $\tau = t_1 - t_2$ приймали в інтервалі $0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$, де τ_{\max} вибирали рівним періоду складової найменшої частоти [2]. Також не буде похибкою, якщо τ_{\max} приймати рівним часу кореляції τ_K випадкового процесу $I(t)$, який знаходиться за умови, що нормована кореляційна функція $\rho(\tau = \tau_K) = 0,05$ або $\rho(\tau = \tau_K) = 0,1$.

Результати

На рис. 2–4 наведено по одній реалізації випадкових (за одну поїздки на певній ділянці) часових залежностей тягового струму з фазами тяги і рекуперативного гальмування для електровоза ВЛ8, а на рис. 5 і 6 – «зібраний за усіма фазами» лише струм рекуперації. Як впливає із цих рисунків і гістограм, побудованих для струму рекуперації (рис. 7–9), незалежно від типу електрорухомого складу (електровоз, електропоїзд чи трамвай), фактичні поточні значення струму рекуперації $I(t)$ протягом фази рекуперації характеризуються неперервними значними коливаннями в часі в широкому інтервалі від нуля до: 1640 А в електровозі ВЛ8; 981 А – електровозі ВЛ11^М; 335 А – електропоїзді ЕПЛ2Т; 500 А – трамваї. Реалізації $I(t)$ трамваїв (рис. 4) мають більш різкий, більш коливальний нерівномірний характер. Це зумовлено тим, що трамваї є менш інерційною системою, ніж електровози і електропоїзди, бо необхідний режим керування ними в умовах міського руху робить трамваї для тягової мережі більш динамічною, різко змінною системою.

Вигляд гістограм (рис. 7–9), а також, як правило, додатні знаки та значення коефіцієнта асиметрії As та ексцесу Ex (табл. 1) свідчать про те, що імовірнісний закон розподілення струмів рекуперації найчастіше не є законом Гаусса. Розподілення струму мають чіткі явні скошення вліво, у бік менших значень струму, що й підкреслюється додатним знаком коефіцієнта As , винятком є значення As у поїздки № 6 ($As = -2,68$, скошеність у бік більших значень струму). При цьому також у значній більшості

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

фаз рекуперації різних поїздок характеристика крутості розподілення струму, тобто значення коефіцієнта E_x , далека від нуля (що повинно бути за нормальним законом), найчастіше вона додатна і має великі значення (табл. 1). Винятком є поїздки № 3 і 4. Вигляд гістограм (рис. 7–9), значення A_s і E_x ($A_s = 0,95$; $0,079$;

$E_x = 0,25$; $0,64$), а також величина імовірності $p = 0,13 \dots 0,17$ за критерієм Пірсона дозволяють зробити висновок, що в цих поїздках (випадках) струм рекуперації розподіляється за законом Гаусса.

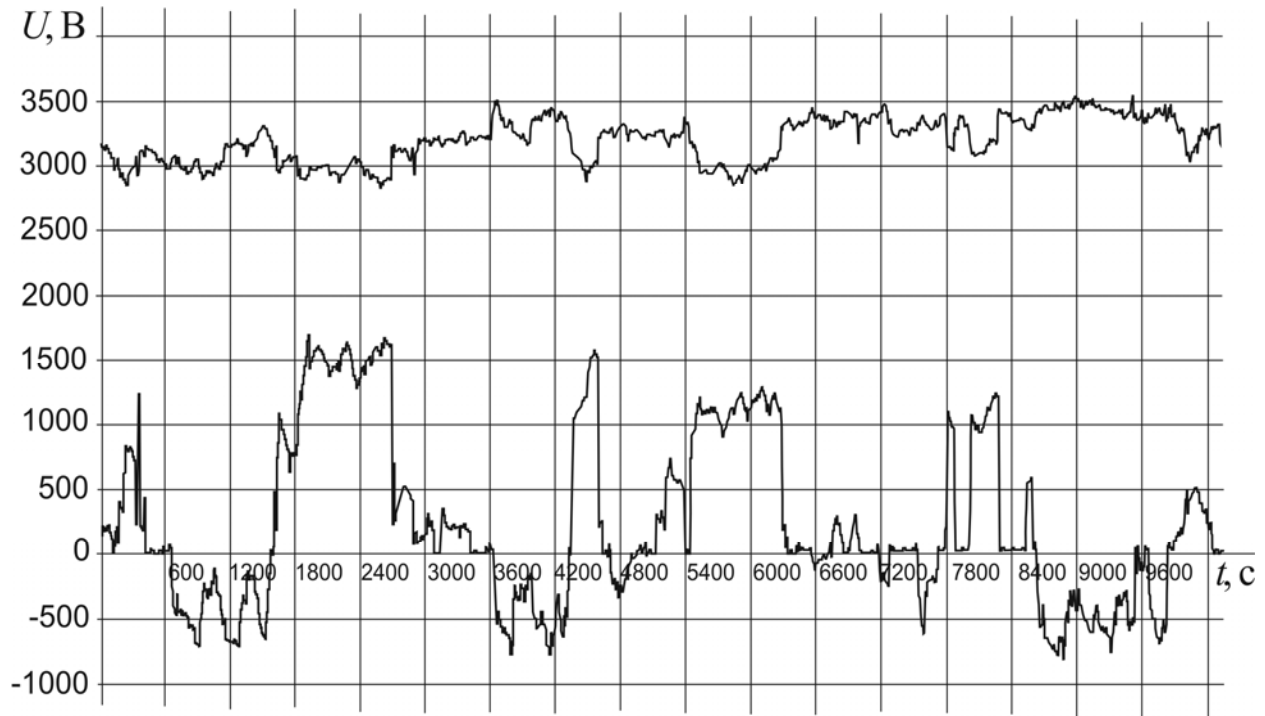


Рис. 2

Fig. 2

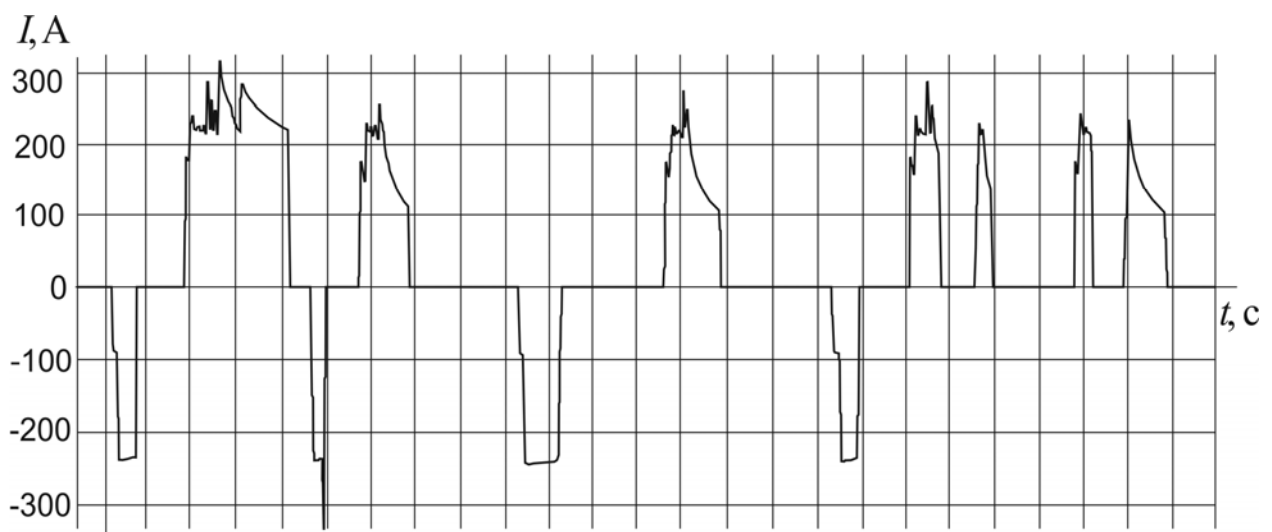


Рис. 3

Fig. 3

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

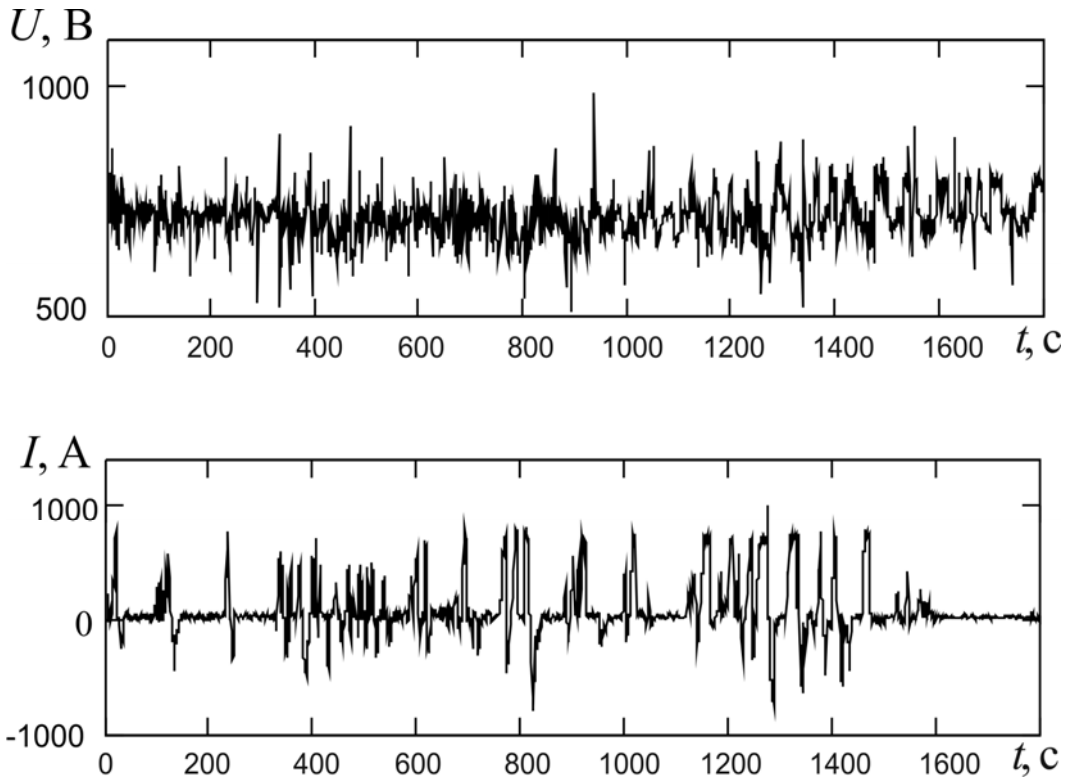


Рис. 4

Fig. 4

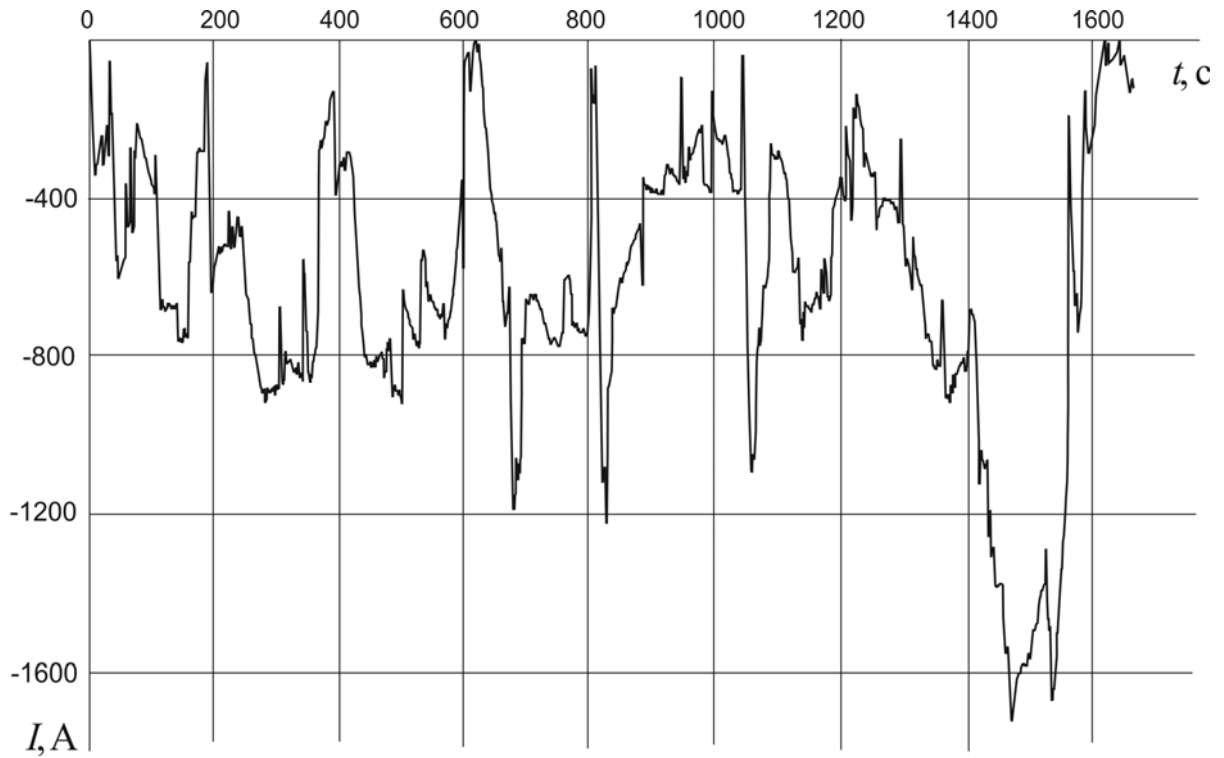


Рис. 5

Fig. 5

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

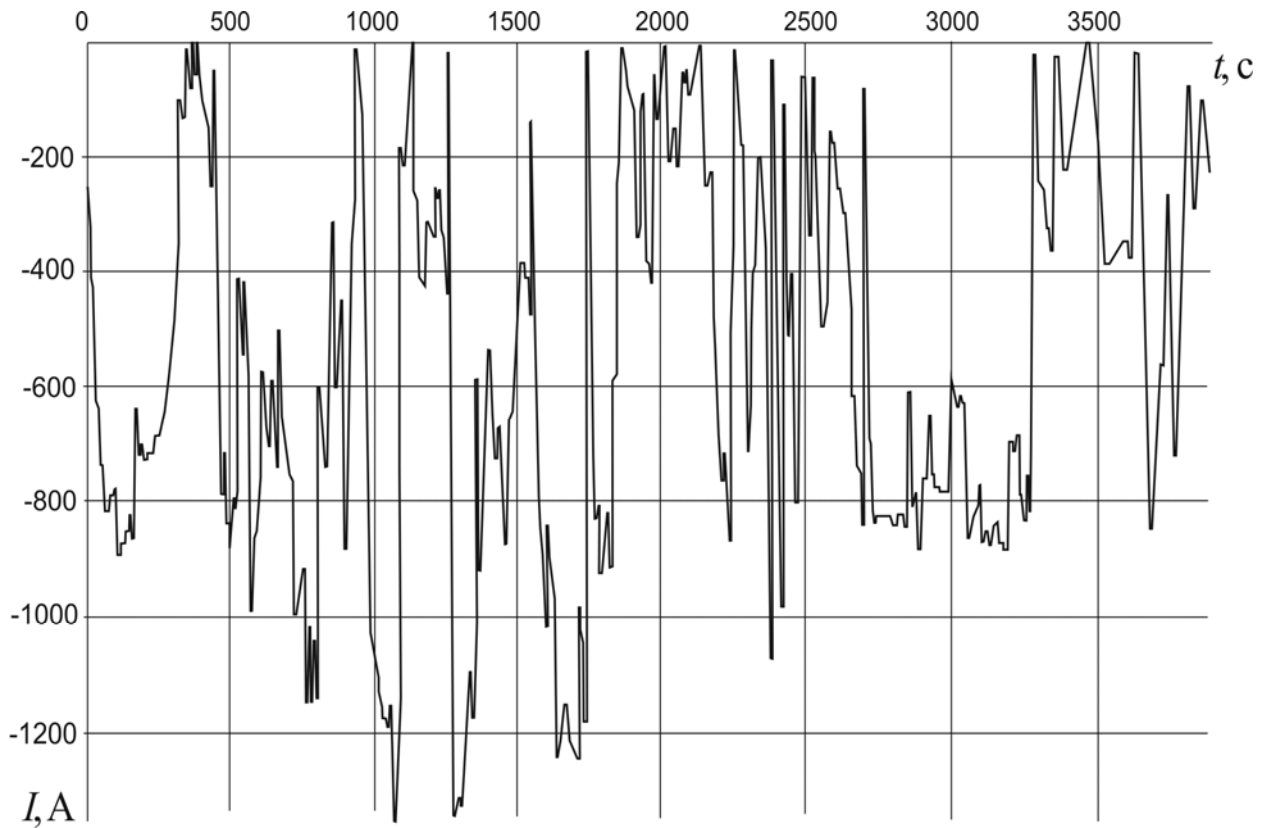


Рис. 6

Fig. 6

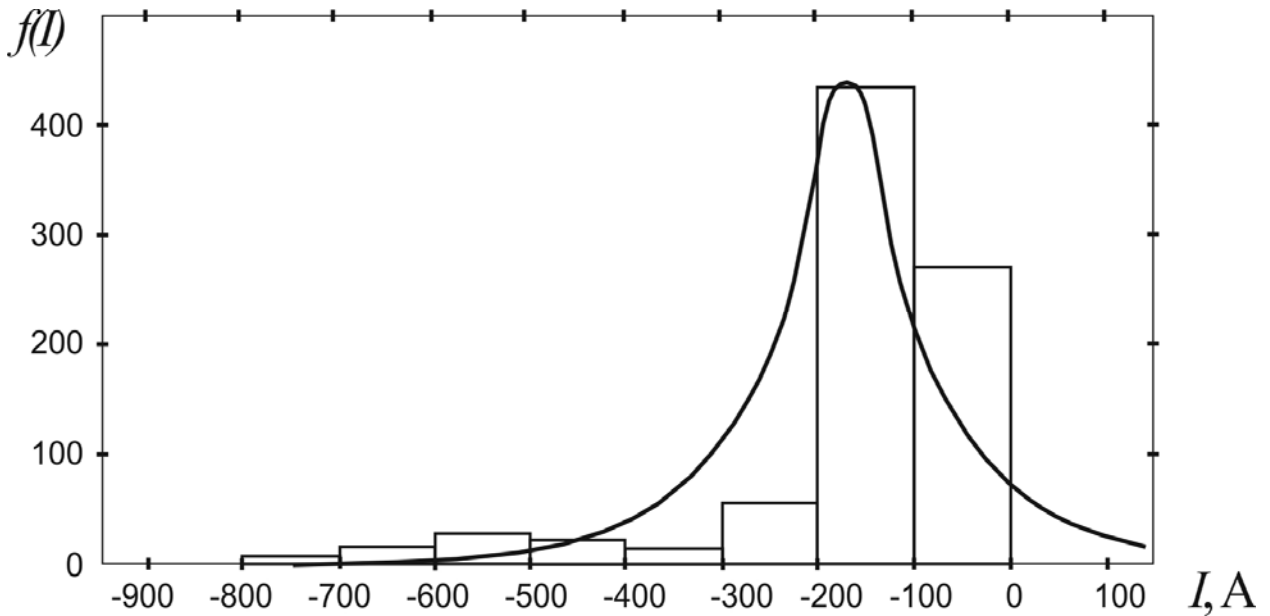


Рис. 7

Fig. 7

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

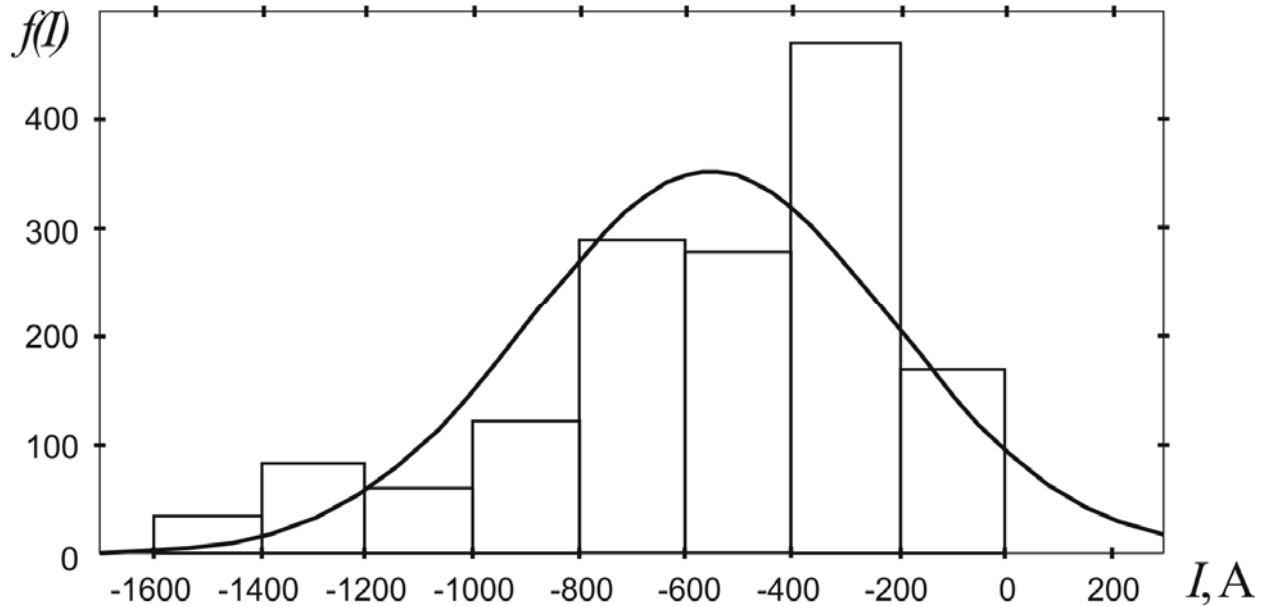


Рис. 8

Fig. 8

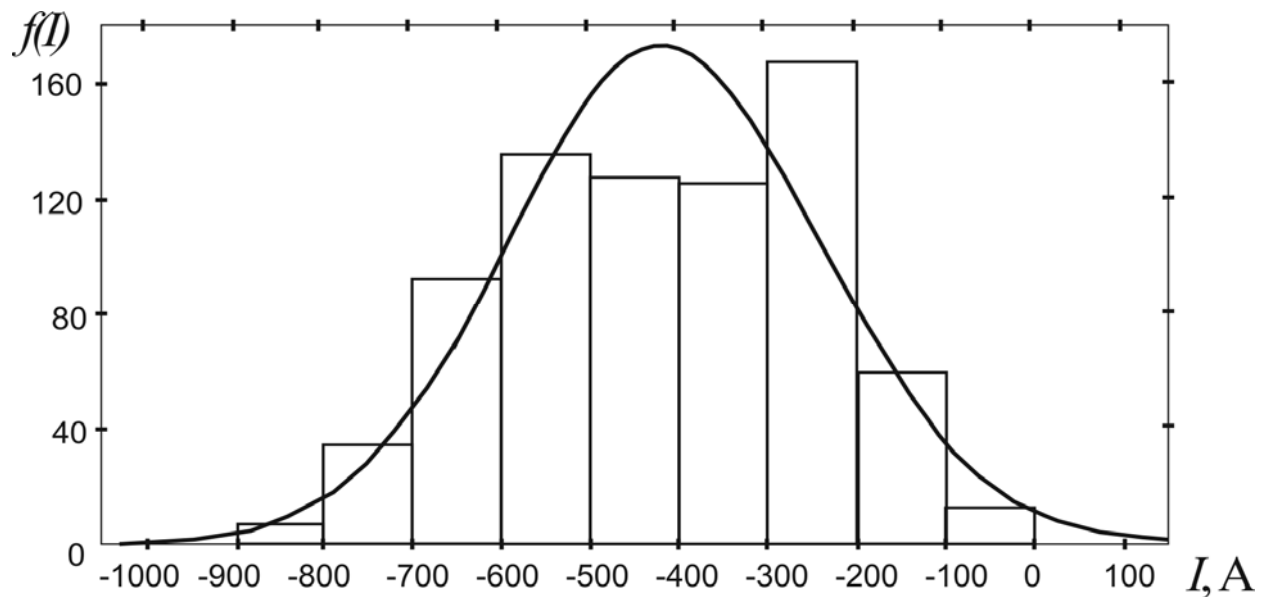


Рис. 9

Fig. 9

Судячи з вигляду часових миттєвих залежностей струму $I(t)$ (рис. 2–6), а також зі нестаціонарного характеру функцій математичного сподівання $m_I(t)$ і дисперсії $D_I(t)$ (рис. 10 і 11), можна зробити висновок, що струм рекуперації є нестаціонарним випадковим процесом. Однак, перша необхідна умова стаціонарності, щоб $m_I(t) = m_I = \text{const}$, згідно з [1], не є суттє-

вою, оскільки від випадкової функції $I(t)$ можна перейти до центрованої функції $\overset{\circ}{I}(t) = I(t) - m_I(t)$, для якої математичне сподівання дорівнює нулю й тим самим ця умова виконується. Друга умова стаціонарності, щоб $D_I(t) = D_I = \text{const}$, є частковим випадком третьої умови, згідно з якою кореляційна функція струму повинна бути функцією лише одного

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

аргументу $\tau = t_1 - t_2$. Як бачимо з аналізу кореляційної функції (рис. 13–15), вона є функцією одного аргументу, тобто $K_I(t, t') = K(t, t + \tau) = K(\tau)$. В результаті цього виконується друга умова стаціонарності, оскільки $D_I(t) = K_I(t, t') = K(\tau = 0) = \text{const}$.

Таблиця 1

Table 1

Номер поїздки	Значення коефіцієнта	
	A_s	E_x
1	2,41	5,31
2	0,95	0,25
3	0,079	-0,64
4	0,84	0,86
5	0,128	-0,82
6	-2,68	7,72

До зазначених вище факторів треба додати наступне. Беручи до уваги обмежену кількість опрацьованих реалізацій струму $I(t)$ ($n=14$) і у зв'язку з наявністю значного елемента випадковості в отриманих оцінках функцій математичного сподівання $m_I(t)$ (рис. 10), дисперсії $D_I(t)$ (рис. 11) і середньоквадратичного відхилення $\sigma_I(t)$ (рис. 12), ці відступи на рис. 10–12 від стаціонарності власне випадкового процесу $I(t)$ не можна вважати значними, тим більше, що вони не мають закономірного характеру. Тому цілком доцільною буде наближена заміна випадкової функції $I(t)$ стаціонарною. Для цього осереднюємо за часом функції $m_I(t)$, $D_I(t)$ і $\sigma_I(t)$, що наведені на рис. 10–12. В результаті отримаємо: $m_I(t) = 530$ А, $D_I(t) = 10\,050$ А², $\sigma_I(t) = 320$ А.

Отже, із зазначеного вище випливає, що випадкова функція струму рекуперації має всі ознаки стаціонарного процесу.

Аналіз будь-якого випадкового процесу не є повним, якщо відсутній його кореляційно-спектральний аналіз, що й виконаємо для процесу $I(t)$.

На рис. 13–15 наведені графічні залежності кореляційної функції $K_I(t)$ струму рекуперації

для електровоза ВЛ8 при його експлуатації на ділянках Придніпровської залізниці. Вони апроксимовані виразами відповідно:

$$K_I(\tau) = 30\,620 e^{-0,03\tau};$$

$$K_I(\tau) = 124\,900 e^{-0,02\tau};$$

$$K_I(\tau) = 111\,200 e^{-0,02\tau}.$$

Як випливає із рис. 13–15, спостерігається відносно повільне загасання $K_I(\tau)$, що вказує на збереження зв'язку між миттєвими значеннями $I(t)$ при значних величинах τ . Наявні від'ємні значення $K_I(\tau)$, які вказують на те, що додатним відхиленням струму в певний момент часу t_k відповідають її від'ємні відхилення в інший момент часу t_i і навпаки. І, нарешті, функція $K_I(\tau)$ зі збільшенням τ загасає (для усіх видів електрорухомого складу) з подальшим коливанням відносно осі часу, а не відносно якоїсь постійної складової. Цей закономірний характер коливальної частини $K_I(\tau)$, яку називають «хвостом» кореляційної функції, свідчить про те, що у випадковому процесі $I(t)$ є періодичність: в ньому містяться «слабко» періодичні, тобто низькочастотні складові, інтергармоніки. Окрім цього, «хвіст» $K_I(\tau)$ містить ті ж самі гармоніки, що й сам випадковий процес [8].

Фактична наявність інтергармонік впливає із рис. 16 і 17, на яких наведено дискретні, в межах 0,001...1 Гц, спектри власне миттєвих графіків реалізацій $I(t)$. Наявність інтергармонік в струмі рекуперації в повній мірі закономірна, оскільки вони виникають в системі при роботі з різкозмінними навантаженнями, які й характерні для електрорухомого складу. Найважливіше зауважимо, що інтергармоніки в системі електричної тяги є причиною додаткових втрат активної електроенергії, викликають додатковий нагрів електрообладнання й тим самим зумовлюють зменшення терміну його служби.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

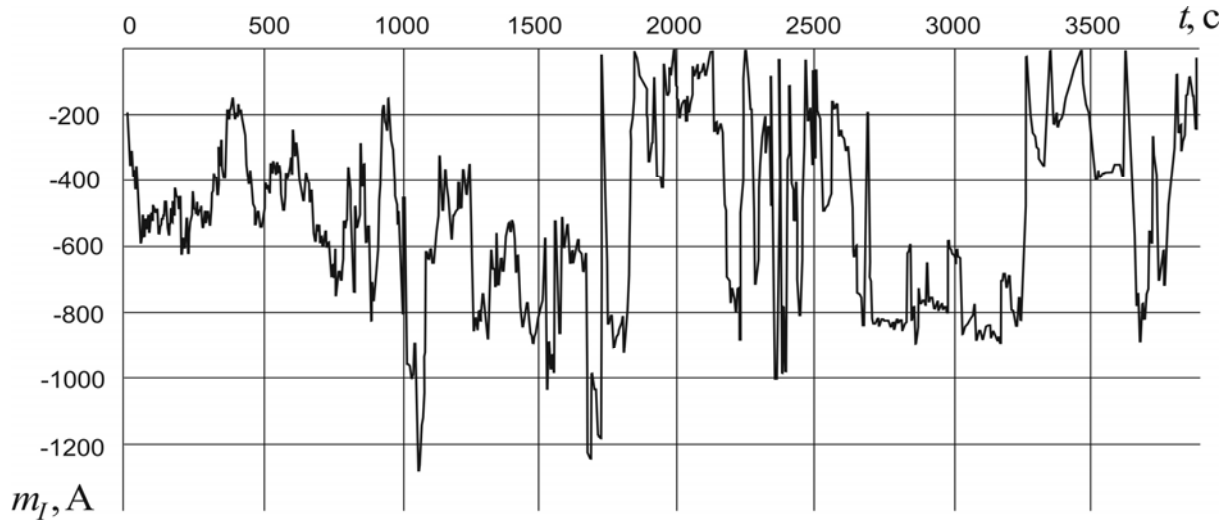


Рис. 10

Fig. 10

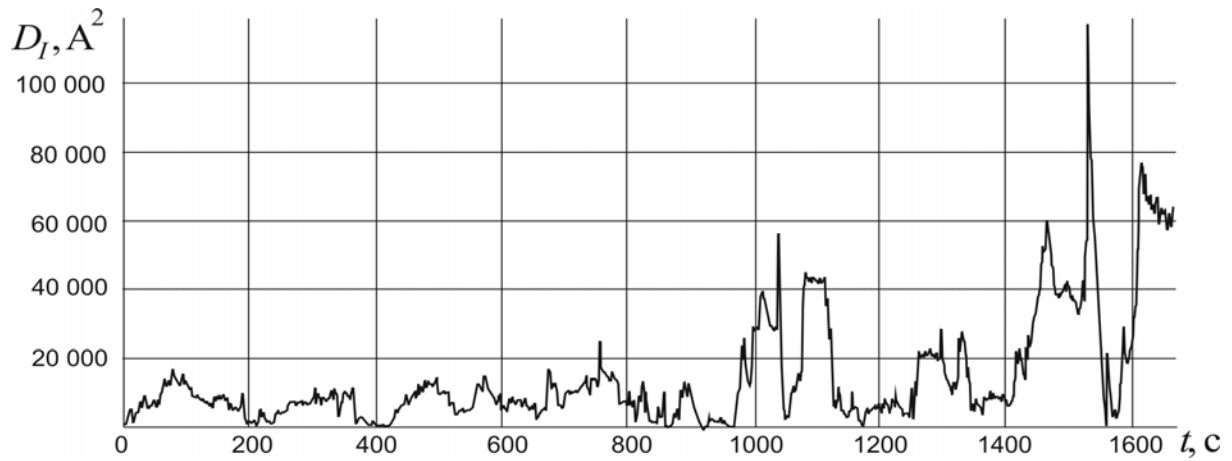


Рис. 11

Fig. 11

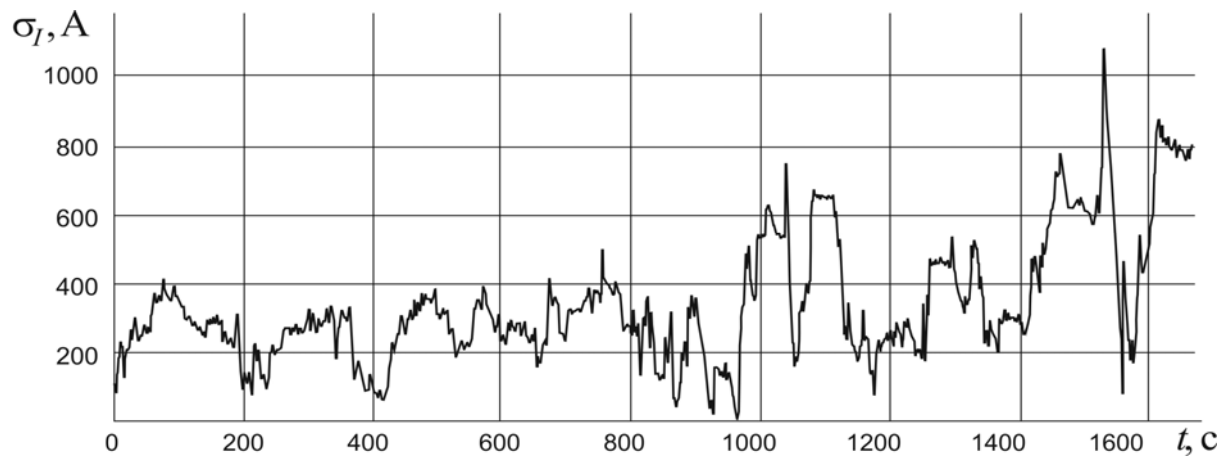


Рис. 12

Fig. 12

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

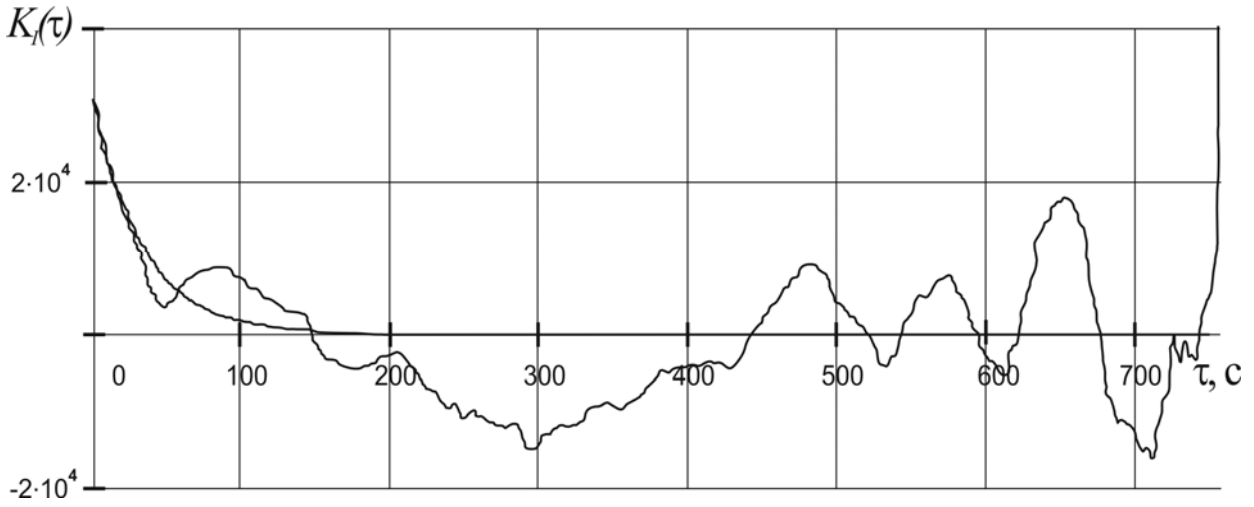


Рис. 13

Fig. 13

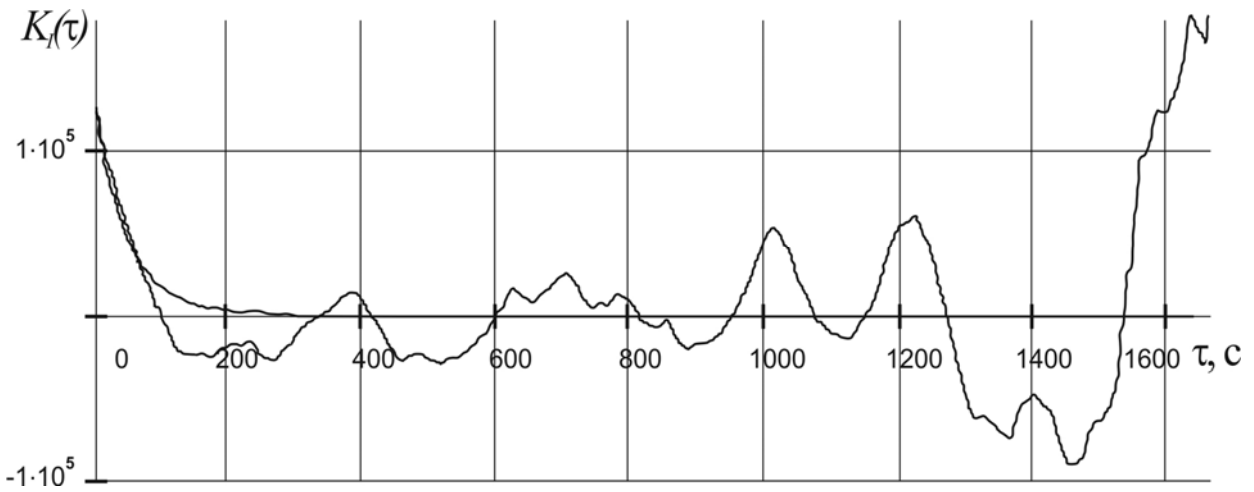


Рис. 14

Fig. 14

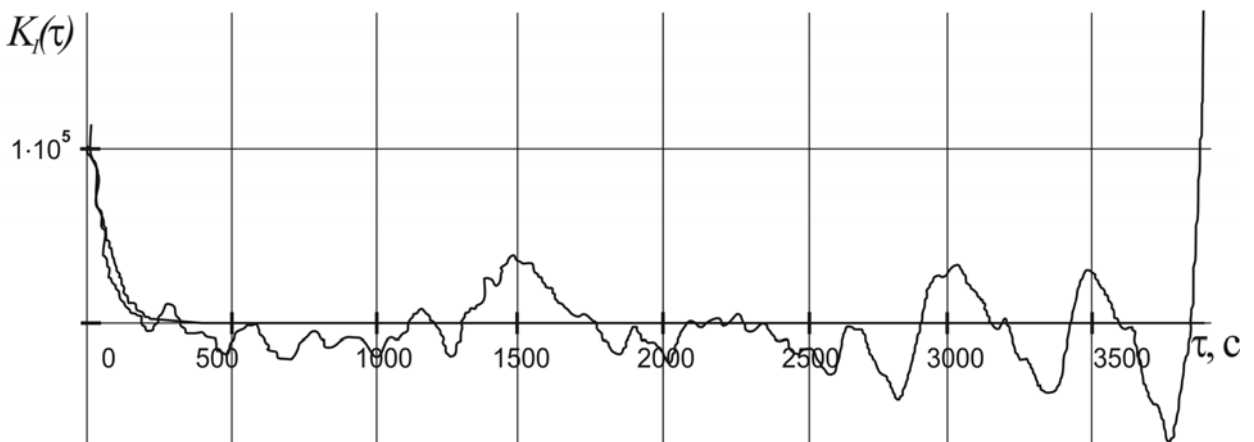


Рис. 15

Fig. 15

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

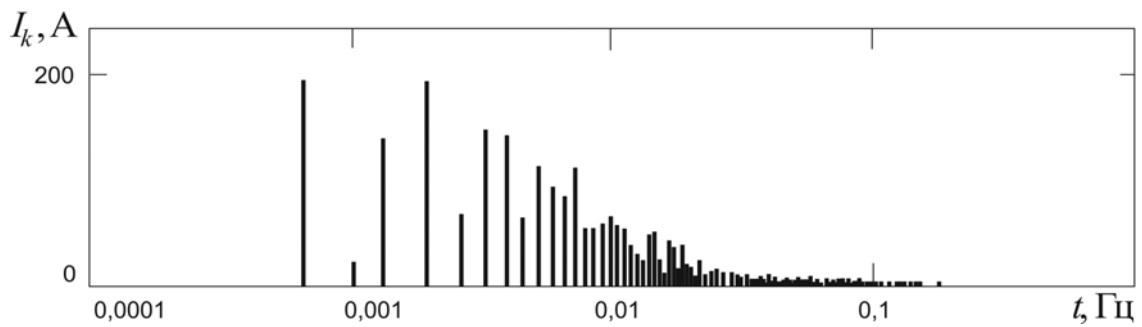
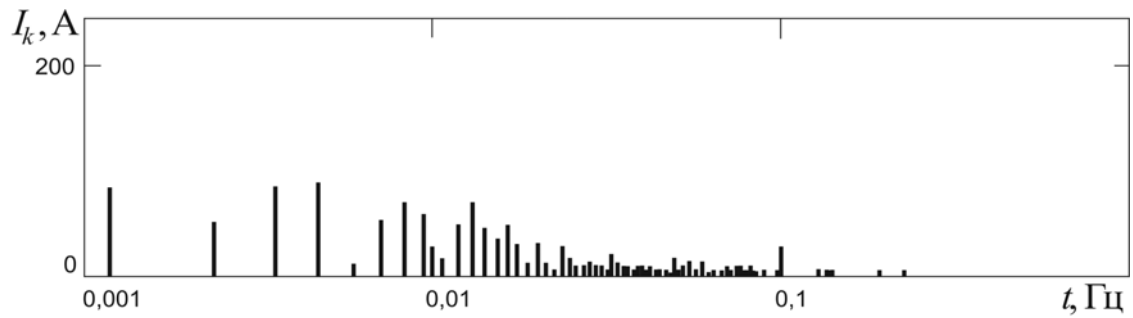


Рис. 16

Fig. 16

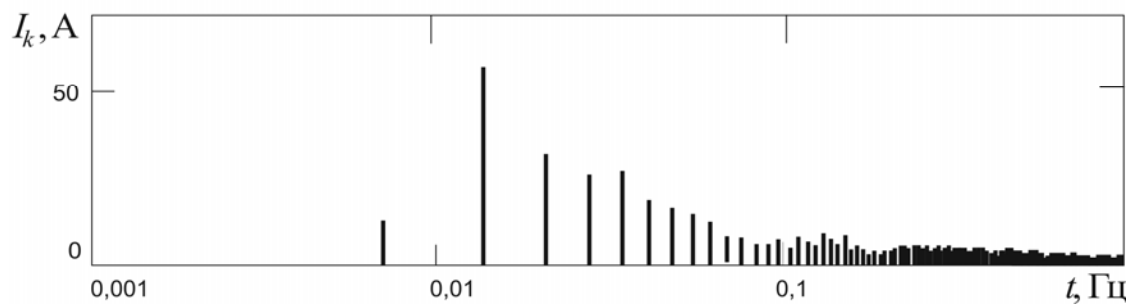
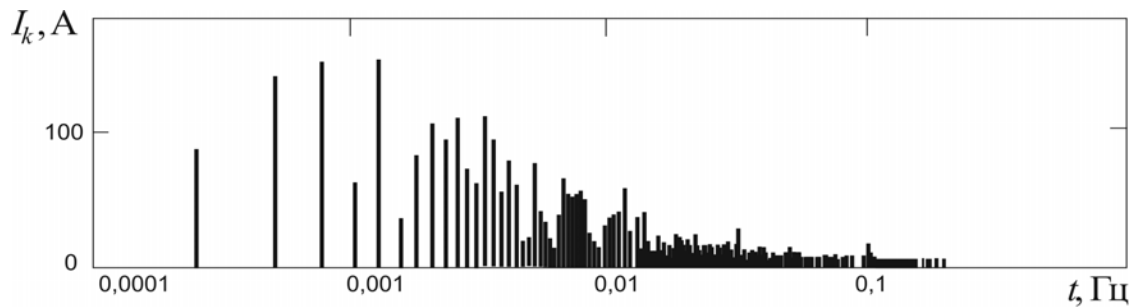


Рис. 17

Fig. 17

Наукова новизна та практична значимість

Результати імовірно-статистичного аналізу струму рекуперації дозволяють оцінювати якість рекуперованої електроенергії та енергетичні пока-

зники електрорухомого складу в режимі рекуперації, а кореляційно-спектральний аналіз необхідний у разі визначення електромагнітної сумісності електрорухомого складу в режимі рекуперації з підсистемами та пристроями електричної тяги.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Висновки

1. Струм рекуперативного гальмування $I(t)$ електрорухомого складу постійного струму є стаціонарним неергодичним випадковим процесом, найчастіше з імовірнісним логарифмічно-нормальним розподіленням, в окремих поїздах – за законом Гаусса.

2. Випадкові різкозмінні, особливо у трамваїв, коливання струму рекуперації змінюються в широкому діапазоні, який залежить від виду електрорухомого складу. При цьому фактичні поточні значення струму найчастіше зміщені в область менших його значень.

3. Знакозмінний характер поведінки «хвоста» кореляційної функції свідчить про наявність у випадковому процесі $I(t)$ інтергармонік.

4. Амплітудний спектр миттєвих величин $I(t)$, а також спектр кореляційної функції створені складовими з діапазоном частот 0,001...1 Гц, при цьому струм рекуперації трамваїв містить більш високі частоти, ніж в електровозів.

5. Амплітудні значення спектра струму рекуперації мають імовірнісний характер, які з імовірністю $p=0,17$ за Пірсоном розподіляються за логарифмічно-нормальним законом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
2. Гайдукевич, Г. И. Вероятностная обработка осциллограмм электрических величин / Г. И. Гайдукевич. – М. : Энергия, 1972. – 112 с.
3. Костин, Н. А. Реактивная мощность в устройствах систем электрической тяги / М. О. Костин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 73–76.
4. Костин, М. О. Ознака наявності обмінної потужності в силових електричних тягових колах системи постійного струму / М. О. Костин, О. Г. Шейкіна // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 98–102.
5. Нікітенко, А. В. Кореляційно-дисперсійний метод визначення складових повної потужності в пристроях електричного транспорту / А. В. Нікітенко, М. О. Костин // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 2 (44). – С. 64–75.
6. Петров, А. В. Методи спектрального аналізу випадкових технологічних коливань напруги та струму фідера ТП постійного струму / А. В. Петров // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 77–80.
7. Почаевец, Э. С. Эффективность рекуперации на участках равнинно-холмистого профиля / Э. С. Почаевец // Вестн. ВНИИЖТа. – 2000. – № 2. – С. 35–38.
8. Пугачев, В. С. Введение в теорию вероятностей / В. С. Пугачев. – М. : Наука, 1968. – 368 с.
9. Сулима, С. Д. Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 / Сулима Станислав Дмитриевич ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2001. – 20 с.
10. Щербак, Я. В. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізн. трансп. України. – 2011. – № 2. – С. 30–34.
11. Czuchra, W. Zmienność napięcia w tramwajowej sieci trakcyjnej – próba oceny metodą statystyczną / W. Czuchra, A. Kobielski, J. Prusak // XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'2004. – Kraków-Zakopane, 2004. – P. 82–88.
12. Kostin, M. Statistics and probability analysis of voltage on the pantograph of DC electric locomotive in the recuperation mode / Mykolay Kostin, Anatoliy Nikitenko // Przegląd Electrotechniczny. – 2013. – Vol. 2012, № 2a. – P. 273–275.
13. Kostin, N. Stochastic Transient Electromagnetic Processes in Power Circuits of Electric Locomotive at a Sharp Change of Voltage on a Current Collector / N. Kostin, T. Mishenko, O. Reutskova // Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe (29.09-01.10.2005) : 7th Intern. Conf. – Warsaw, 2005. – P. 227–232.
14. Mierzejewski, L. System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego / L. Mierzejewski, A. Szełąg, M. Gałuszewski. – Warszawa : Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 1989. – P. 110–115.
15. Wojciech, C. Ocena energochłonności tramwajów z napędem asynchronicznym / Czuchra Wojciech, Janush Prusak, Waldemar Zajac // Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe (29.09-01.10.2005) : 7th Intern. Conf. – Warsaw, 2005. – P. 160–164.

А. В. НИКИТЕНКО^{1*}, Н. А. КОСТИН¹

^{1*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта nikitenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-6426-5097

¹Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ORCID 0000-0002-0856-6397

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ И КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗЫ ТОКА РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель. В работе необходимо определить и проанализировать вероятностные и спектральные характеристики случайного процесса тока рекуперации электроподвижного состава постоянного тока разных типов. **Методика.** Используются элементы теории, методы и методики теории вероятностей, в частности, теория стационарных и нестационарных случайных процессов. Также применялись методы математической статистики с обработкой на персональных ЭВМ массивов значений случайной величины тока рекуперации. **Результаты.** Приведены часовые реализации тока рекуперации электровозов, электропоездов и трамваев, которые получены путем мониторинга на действующих участках железных дорог Украины. Установлено, что ток имеет характер непрерывных резкоизменяющихся, особенно у трамваев, временных колебаний. Определены функции математического ожидания, среднеквадратического отклонения и дисперсии случайного процесса тока рекуперации, построены гистограммы. Рассчитаны, построены и обсуждены корреляционные и спектральные функции тока. В результате установлено, что ток рекуперации может считаться стационарным неэргодическим процессом. Спектральный анализ реализаций этого процесса и «хвоста» корреляционной функции обнаружил «слабо» периодические, то есть низкочастотные, составляющие, которые называют интергармониками. **Научная новизна.** Во-первых, к анализу такого резкоизменяющегося случайного процесса, которым является ток, адаптировано теорию нестационарных случайных процессов. Во-вторых, впервые установлено наличие интергармоник в случайном процессе тока рекуперации. И, наконец, установлены закономерности временного изменения корреляционной функции процесса тока, что позволяет аргументировано применять метод корреляционных функций при идентификации устройств системы электрической тяги. **Практическая значимость.** Результаты вероятностно-статистического анализа тока рекуперации позволяют оценивать качество рекуперированной электрической энергии и энергетические показатели электроподвижного состава в режиме рекуперации. Тогда как корреляционно-спектральный анализ необходим при определении электромагнитной совместимости электроподвижного состава в режиме рекуперации с подсистемами и устройствами электрической тяги.

Ключевые слова: метод; случайный процесс; напряжение; ток; корреляционная функция; электрический транспорт; дисперсия; спектр; рекуперация

А. V. NIKITENKO^{1*}, M. O. KOSTIN¹

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician. V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail nikitenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-6426-5097

¹Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician. V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, ORCID 0000-0002-0856-6397

STATISTIC, PROBABILISTIC, CORRELATION AND SPECTRAL ANALYSES OF REGENERATIVE BRAKING CURRENT OF DC ELECTRIC ROLLING STOCK

Purpose. Defining and analysis of the probabilistic and spectral characteristics of random current in regenerative braking mode of DC electric rolling stock are observed in this paper. **Methodology.** The elements and methods of

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

the probability theory (particularly the theory of stationary and non-stationary processes) and methods of the sampling theory are used for processing of the regenerated current data arrays by PC. **Findings.** The regenerated current records are obtained from the locomotives and trains in Ukraine railways and trams in Poland. It was established that the current has uninterrupted and the jumping variations in time (especially in trams). For the random current in the regenerative braking mode the functions of mathematical expectation, dispersion and standard deviation are calculated. Histograms, probabilistic characteristics and correlation functions are calculated and plotted down for this current too. It was established that the current of the regenerative braking mode can be considered like the stationary and non-ergodic process. The spectral analysis of these records and “tail part” of the correlation function found weak periodical (or low-frequency) components which are known like an interharmonic. **Originality.** Firstly, the theory of non-stationary random processes was adapted for the analysis of the recuperated current which has uninterrupted and the jumping variations in time. Secondly, the presence of interharmonics in the stochastic process of regenerated current was defined for the first time. And finally, the patterns of temporal changes of the correlation current function are defined too. This allows to reasonably apply the correlation functions method in the identification of the electric traction system devices. **Practical value.** The results of probabilistic and statistic analysis of the recuperated current allow to estimate the quality of recovered energy and energy quality indices of electric rolling stock in the regenerative braking mode. But the correlation and spectral analysis is required to determine the electromagnetic compatibility of the electric rolling stock in the regenerative braking mode with the subsystems and the electric traction devices.

Keywords: method; stochastic process; voltage; current; correlation function; electric transport; dispersion; spectrum; recuperation

REFERENCES

1. Venttsel Ye.S. *Teoriya veroyatnostey* [The probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p.
2. Gaydukevich G.I. *Veroyatnostnaya obrabotka ostsillogramm elektricheskikh velichin* [Probabilistic processing of electrical quantities oscillograms]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 112 p.
3. Kostin N.A. Reaktivnaya moshchnost v ustroystvakh sistem elektricheskoy tyagi [Reactance capacity in devices of electric operation systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 73-76.
4. Kostin M.O., Sheikina O.H. Oznaka naiavnosti obminnoi potuzhnosti v sylovykh elektrychnykh tiahovykh kolakh systemy postiinoho strumu [Interchange power indicators in the circles of DC power electric operation system]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 98-102.
5. Nikitenko A.V., Kostin M.O. Koreliatsiino-dispersiyni metod vyznachennia skladovykh povnoi potuzhnosti v prystroiakh elektrychnoho transportu [Correlation and dispersion method of components determination of full power in the electrical transport devices]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 2 (44), pp. 64-75.
6. Petrov A.V. Metody spektralnoho analizu vypadkovykh tekhnolohichnykh kolyvan napruhy ta strumu fidera TP postiinoho strumu [Spectral analysis methods of random process of voltage fluctuations and current feeder DC TP]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 77-80.
7. Pochayevets E.S. Effektivnost rekuperatsii na uchastkakh ravninno-kholmistogo profilya [Recuperation efficiency on plain and hilly profile]. *Vestnik VNIIZhTa – VNIIZhT Bulletin*, 2000, no. 2, pp. 35-38.
8. Pugachev V.S. *Vvedeniye v teoriyu veroyatnostey* [Introduction to probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 368 p.
9. Sulima S.D. *Povysheniye effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya elektrovozov postoyannogo toka* Avtoreferat Diss. [Effectiveness increase of regenerative braking of DC electric locomotive. Author's abstract]. Dnipropetrovsk, 2001. 20 p.
10. Shcherbak Ya.V. Analiz zastosuvannya rekuperatyvnoho halmuvannia na zaliznytsiakh Ukrainy [Analysis of the use of regenerative braking on the railways of Ukraine]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2011, no. 2, pp. 30-34.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

11. Czuchra W., Kobielski A., Prusak J. Zmienność napięcia w tramwajowej sieci trakcyjnej – próba oceny metodą statystyczną. XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej Semtrak'2004. Kraków-Zakopane, 2004. pp. 82-88.
12. Kostin Mykolay, Nikitenko Anatoliy. Statistics and probability analysis of voltage on the pantograph of DC electric locomotive in the recuperation mode. *Przegląd Electrotechniczny*, 2013, vol. 2012, no. 2a, pp. 273-275.
13. Kostin N., Mishenko T., Reutskova O. Stochastic Transient Electromagnetic Processes in Power Circuits of Electric Locomotive at a Sharp Change of Voltage on a Current Collector. Proc. of the 7th Intern. Conf. «Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe». Warsaw, 2005, pp. 227-232.
14. Mierzejewski L., Szelağ A., Gałuszewski M. System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego. Warszawa: Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 1989, pp. 110-115.
15. Wojciech Czuchra, Prusak Janush, Zajac Waldemar. Ocena energochłonności tramwajów z napędem asynchronicznym. Proc. of the 7th Intern. Conf. «Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe». Warsaw, 2005, pp. 160-164.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Л. В. Дубинцем (Україна); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)

Надійшла до редакції 26.02.2014

Прийнята до друку 14.04.2014