

УДК 621.33:519.233.4/.5

А. В. НІКІТЕНКО^{1*}, М. О. КОСТІН¹

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, к. 238, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта nikitenko.diit@gmail.com, dnuzt_toe@mail.ru

КОРЕЛЯЦІЙНО-ДИСПЕРСІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДОВИХ ПОВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПРИСТРОЯХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Розробка і теоретичне обґрунтування аналітичного методу визначення активної, неактивної і повної потужностей пристроїв систем електричної тяги з урахуванням нестационарного характеру зміни випадкових процесів напруги і струму в елементах цих систем. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використовуються математичні методи теорії випадкових процесів, а також методи «дискретної електротехніки». **Результати.** Розроблено кореляційно-дисперсійний метод аналітичного визначення активної, реактивної по Фрізе і повної потужностей пристроїв систем електричної тяги магістральних залізниць. Метод базується на відомих поняттях авто- і взаємнокореляційних функцій випадкових процесів, яким підкорюються фідерні напруги і струми підсистеми тягового електропостачання, а також напруги і струми електрорухомого складу. Метод дозволяє оцінювати потужності у випадку як стаціонарних, так і нестационарних стохастичних процесів. Запропонований метод, застосований як для тягового режиму, так і для режиму рекуперативного гальмування електрорухомого складу. Чисельні розрахунки (за розробленим методом) складових повної потужності для однієї із фідерних зон на Придніпровській залізниці виявили суттєві перетоки реактивної потужності по тяговій мережі, що підтверджується також великими значеннями коефіцієнта реактивної потужності. **Наукова новизна.** Полягає, по-перше, в тому, що розроблено і обґрунтовано новий, кореляційно-дисперсійний, метод визначення повної, активної і реактивної потужностей в елементах систем електричного транспорту, який відрізняється від існуючих методів врахуванням нестационарного характеру зміни випадкових процесів фідерних і підстанційних напруг і струмів. По-друге, вперше встановлено явище переоту великих значень реактивної потужності по Фрізе в системі електричної тяги постійного струму. **Практична значимість.** Розроблений метод і методика, що на ньому базується, дозволяють оцінювати основні енергетичні показники систем електричної тяги, зокрема, коефіцієнт реактивної потужності та основні і додаткові втрати активної електроенергії як в силових колах електрорухомого складу, так і в тяговій живлячій мережі.

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

1. Вступ

Метод кореляційних функцій для визначення складових повної потужності в пристроях тягового електропостачання, запропонований в роботі [3], базується на теорії стаціонарних ергодичних випадкових процесів. Згідно цього методу фідерна напруга і фідерний (і підстанційний) тягові струми являються стаціонарними ергодичними процесами.

В існуючих закордонних публікаціях, зокрема в [8, 10, 11], означена проблема розв'язується, виходячи з детермінованого характеру зміни напруг і струмів. Проте, в тягово-рекуперативному режимі і напруга на струмоприймачі, і тяговий струм одиниці ЕРС (зокрема

електровоза) являються нестационарними випадковими процесами (рис. 1), оскільки момент часу початку, тривалість режиму рекуперації, а також величина струму рекуперації являються хаотичними величинами. Саме цей факт обумовлює розвиток методу кореляційних функцій для аналізу енергетичних процесів в тягово-рекуперативному режимі систем електричної тяги, що і являється метою даної роботи. При цьому можливі два шляхи: «непрямий» і «прямий». Перший шлях полягає у «спрощеному» представленні (розкладанні) нестационарних процесів, а другий – пропонує безпосереднє, тобто без змін, їх використання.

Розглянемо їх більш докладніше.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

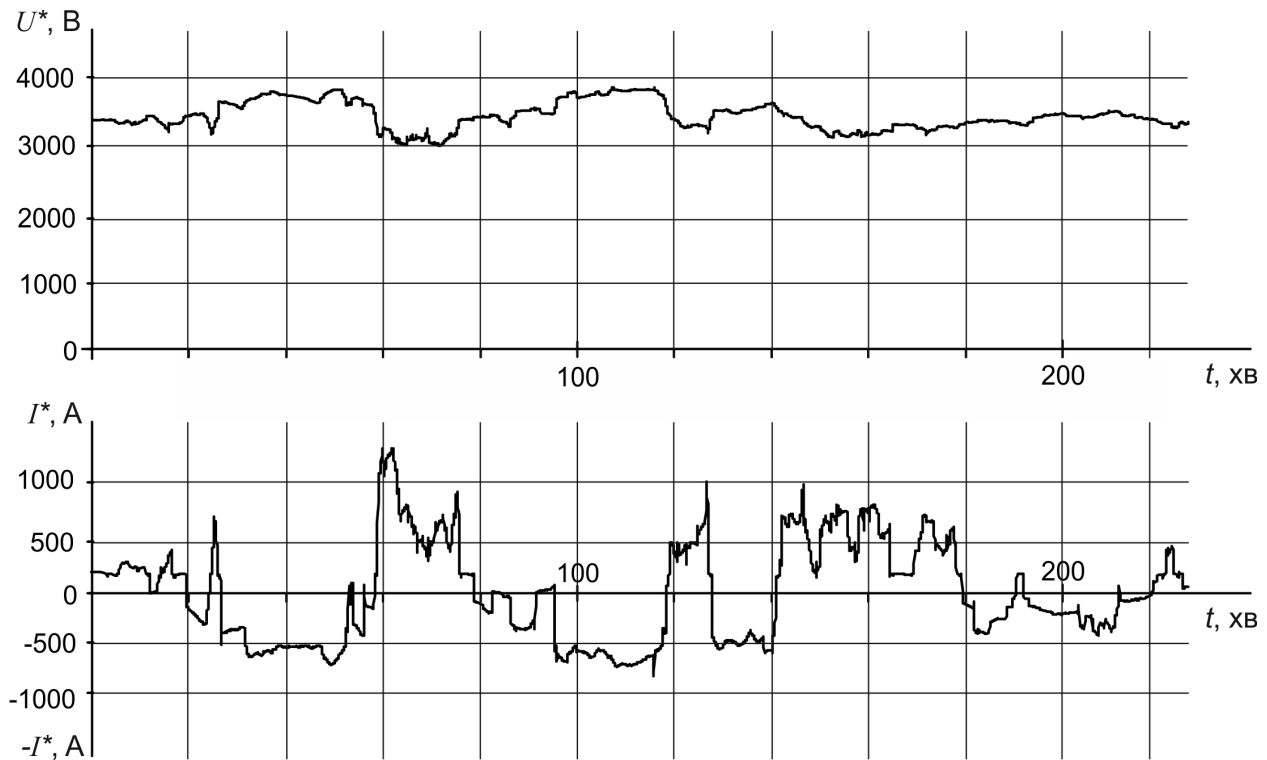


Рис. 1

2. Способи розкладання нестационарних випадкових функцій напруги та струму

Для досягнення поставленої мети «спрости-мо» задані нестационарні випадкові процеси фідерної напруги $U^*(t)$ та струму $I^*(t)$ шляхом представлення (розкладання) їх в формі детермінованих функцій випадкових величин або в формі стаціонарних випадкових функцій. Для цього, з метою узагальнення аналізу, позначимо функції напруги $U^*(t)$ та струму $I^*(t)$ однією випадковою функцією $X^*(t)$.

Найбільш простим способом розкладання функції $X^*(t)$ являється її представлення узагальненим рядом Фур'є [7]:

$$X^*(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k \cdot \psi_k(t), \quad (1)$$

де λ_k – залежні випадкові величини, що визначаються за спеціальною формулою;

ψ_k – система ортогональних функцій, що визначається, виходячи з рівності нулю виразу середньоквадратичної похибки для кожної ре-

лізації функції $X^*(t)$.

Найбільш складним, та все ж інколи застосовуваним, являється представлення випадкових функцій за методом Карунена [2]:

$$X^*(t) = \sum_{k=1}^{\infty} v_k \cdot \psi_k(t) + m_x(t), \quad (2)$$

де $m_x(t)$ – функція математичного сподівання функції $X^*(t)$;

v_k – випадкові некорельовані величини;

$\psi_k(t)$ – власна функція кореляційної функції (деякого інтегрального рівняння).

Найбільш часто для представлення функції $X^*(t)$ застосовується так зване канонічне розкладання Пугачова [5]:

$$X^*(t) = m_x(t) + \sum_{i=1}^{\infty} v_i \cdot \phi_i(t), \quad (3)$$

де v_i – система випадкових величин з математичним сподіванням, рівним нулю;

$\phi_i(t)$ – невідповідні функції.

Приведені вище розкладання випадкових фу-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

нкцій володіють тим істотним недоліком, що для отримання достатньої точності представлення потрібно використовувати достатньо велику кількість членів ряду, а відповідно і велику кількість випадкових величин, що істотно ускладнює обчислювальну роботу і подальший енергетичний аналіз. Останнє особливо спостерігається при дослідженні нелінійних систем, оскільки лінійна форма розкладання добре пристосована для аналізу лінійних систем і мало придатна для нелінійних.

В роботі [4] на основі [6] запропоновано представляти випадкові функції електричних величин в електропостачанні приміських залізниць у вигляді:

$$X(t) = m(t) + Y(t), \quad (4)$$

де $Y(t)$ – стаціонарний нормальний процес з параметрами $N(0, \sigma)$;

$m(t)$ – математичне сподівання, яке представляється рядом Фур'є і знаходиться достатньо складним способом. На процес $Y(t)$ також накладаються достатньо суворі обмеження.

Враховуючи викладене вище, застосуємо метод «прямого» використання нестаціонарних випадкових процесів.

3. Кореляційно-дисперсійний метод

Уявимо синхронно записані за деякий інтервал часу $0 \dots T$ реєстрограми напруг $U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n$ на струмоприймачі та струмів $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n$ в режимі рекуперації (рис. 2).

Дискретизуємо ці реєстрограми з необхідним (згідно з теоремою Котельникова [3]) кроком $\Delta t = \tau$ і запишемо, згідно з [6, 1], вирази оцінки авто- і взаємно-кореляційних функцій для нестаціонарних випадкових процесів напруги $U(t)$ та струму $I(t)$.

Кореляційна функція напруги (згідно з рис. 2) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} K_U(t_k, t_l) &= \frac{\sum_{i=1}^n U_i(t_k) \cdot U_i(t_l)}{n-1} - m_U(t_k) \cdot m_U(t_l) = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n U_i(t_k) \cdot U_i(t_k + \tau)}{n-1} - m_U(t_k) \cdot m_U(t_k + \tau), \quad (5) \end{aligned}$$

де m_U – математичне сподівання у відповідні моменти часу t_k та t_l .

При $t_k = t_l$, тобто при $\tau = 0$, вираз (5) перетворюється в:

$$K_U(t_k, \tau = 0) = U^2(t_k) - m_U^2(t_k), \quad (6)$$

де $U(t_k)$ – діюче значення напруги в момент часу t_k .

З виразу (6) і з урахуванням того, що при $\tau = 0$ кореляційна функція будь-якого випадкового процесу перетворюється в дисперсію D цього процесу, можна записати:

$$\begin{aligned} U(t_k) &= \sqrt{K_U(t_k, \tau = 0) + m_U^2(t_k)} = \\ &= \sqrt{D_U(t) + m_U^2(t_k)}. \quad (7) \end{aligned}$$

Аналогічно для нестаціонарного випадкового процесу струму $I(t)$ можна отримати вираз діючого значення струму як:

$$\begin{aligned} I(t_k) &= \sqrt{K_I(t_k, \tau = 0) + m_I^2(t_k)} = \\ &= \sqrt{D_I(t_k) + m_I^2(t_k)}, \quad (8) \end{aligned}$$

де $K_I(t_k, \tau = 0)$ – кореляційна функція струму $I(t)$.

Тоді повна потужність в момент часу t_k визначається як:

$$\begin{aligned} S(t_k) &= U(t_k) \cdot I(t_k) = \\ &= \sqrt{[K_U(t_k, \tau = 0) + m_U^2(t_k)]} \cdot \sqrt{[K_I(t_k, \tau = 0) + m_I^2(t_k)]} = \\ &= \sqrt{[D_U(t_k) + m_U^2(t_k)]} \cdot \sqrt{[D_I(t_k) + m_I^2(t_k)]}. \quad (9) \end{aligned}$$

Користуючись рядом значень величин $K_U, m_U, D_U, K_I, m_I, D_I$ в моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_m$ (див. рис. 2), побудуємо часові залежності $K_U(t), m_U(t), D_U(t), K_I(t), m_I(t), D_I(t)$ з наступною апроксимацією їх якими-небудь аналітичними виразами. Тоді вирази (7) і (8) можна переписати у вигляді функціональних залежностей як:

$$U(t) = \sqrt{K_U(t) + m_U^2(t)} = \sqrt{D_U(t) + m_U^2(t)}, \quad (10)$$

$$I(t) = \sqrt{K_I(t) + m_I^2(t)} = \sqrt{D_I(t) + m_I^2(t)}. \quad (11)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

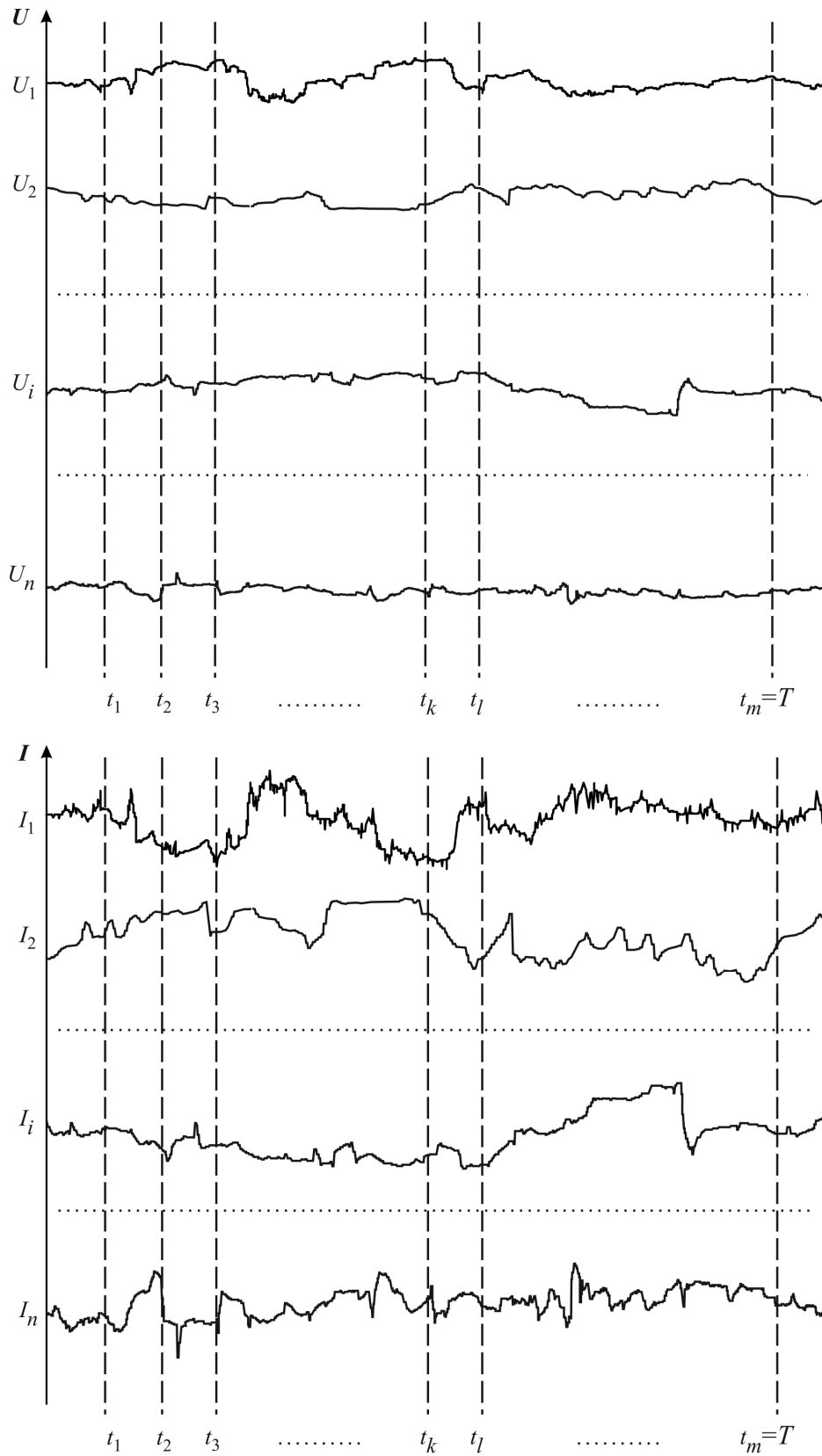


Рис. 2

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Тоді функціональну залежність повної потужності на інтервалі часу $0...T$ можна визначити як:

$$\begin{aligned} S(t) &= U(t) \cdot I(t) = \\ &= \sqrt{[K_U(t) + m_U^2(t)] \cdot [K_I(t) + m_I^2(t)]} = \\ &= \sqrt{[D_U(t) + m_U^2(t)] \cdot [D_I(t) + m_I^2(t)]}. \end{aligned} \quad (12)$$

Оцінку взаємної кореляційної функції випадкових процесів $U(t)$ та $I(t)$ можна записати як:

$$\begin{aligned} K_{UI}(t_k, t_l) &= \frac{\sum_{i=1}^n [U_i(t_k) - m_U(t_k)] \cdot [I_i(t_l) - m_I(t_l)]}{n} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n U_i(t_k) \cdot I_i(t_l) - U_i(t_k) \cdot m_I(t_l) - \\ &\dots \frac{-I_i(t_l) \cdot m_U(t_k) + m_U(t_k) \cdot m_I(t_l)}{n}}{n}. \end{aligned} \quad (13)$$

Доданки в (13) матимуть наступні значення:
– перший доданок:

$$\frac{\sum_{i=1}^n U_i(t_k) \cdot I_i(t_l)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i(t_k) \cdot I_i(t_k + \tau)}{n},$$

а при $t_k = t_l$, тобто при $\tau = 0$:

$$\frac{\sum_{i=1}^n U_i(t_k) \cdot I_i(t_k)}{n} = P(t_k); \quad (14)$$

– другий доданок (при $\tau = 0$):

$$\frac{\sum_{i=1}^n U_i(t_k) \cdot m_I(t_k + \tau)}{n} =$$

$$Q_\Phi(t_k) = \sqrt{S^2(t_k) - P^2(t_k)} =$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{[K_U(t_k) + m_U^2(t_k)] \cdot [K_I(t_k) + m_I^2(t_k)] - [K_{UI}(t_k, \tau = 0) + m_U(t_k) \cdot m_I(t_k)]^2} = \\ &= \sqrt{[D_U(t_k) + m_U^2(t_k)] \cdot [D_I(t_k) + m_I^2(t_k)] - [K_{UI}(t_k, \tau = 0) + m_U(t_k) \cdot m_I(t_k)]^2}, \end{aligned} \quad (21)$$

або у вигляді часової функціональної залежності:

$$= m_I(t_k) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n U_i(t_k)}{n} = m_I(t_k) \cdot m_U(t_k); \quad (15)$$

– третій доданок (при $\tau = 0$) матиме вигляд аналогічний виразу (15):

$$\frac{\sum_{i=1}^n I_i(t_l) \cdot m_U(t_k)}{n} = m_I(t_k) \cdot m_U(t_k); \quad (16)$$

– четвертий доданок, при $\tau = 0$:

$$\begin{aligned} m_U(t_k) \cdot m_I(t_l) &= m_U(t_k) \cdot m_I(t_k + \tau) = \\ &= m_U(t_k) \cdot m_I(t_k). \end{aligned} \quad (17)$$

З урахуванням виразів (14)-(17) вираз (13) для взаємної кореляційної функції K_{UI} прийме вигляд:

$$K_{UI}(t_k, \tau = 0) = P(t_k) - m_U(t_k) \cdot m_I(t_k). \quad (18)$$

Звідки активна потужність в момент часу $t = t_k$ визначається як:

$$P(t_k) = K_{UI}(t_k, \tau = 0) + m_U(t_k) \cdot m_I(t_k), \quad (19)$$

а після отримання значень $P(t_1), P(t_2), \dots, P(t_k), \dots, P(t_m)$ та значень $K_{UI}(t_1), K_{UI}(t_2), \dots, K_{UI}(t_k), \dots, K_{UI}(t_m)$ та $m(t_1), m(t_2), \dots, m(t_k), \dots, m(t_m)$ та їх апроксимації отримаємо функціональну залежність на відрізку $[0...T]$ у вигляді:

$$P(t) = K_{UI}(t) + m_U(t) \cdot m_I(t). \quad (20)$$

Враховуючи вирази для повної та активної потужностей, неактивну потужність (або реактивну по Фризе [9]) можна записати у вигляді дискретних значень як:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$\begin{aligned}
 Q_{\phi} &= \sqrt{S^2(t) - P^2(t)} = \\
 &= \sqrt{[K_U(t) + m_U^2(t)] \cdot [K_I(t) + m_I^2(t)] - [K_{UI}(t, \tau = 0) + m_U(t) \cdot m_I(t)]^2} = \\
 &= \sqrt{[D_U(t) + m_U^2(t)] \cdot [D_I(t) + m_I^2(t)] - [K_{UI}(t, \tau = 0) + m_U(t) \cdot m_I(t)]^2}. \quad (22)
 \end{aligned}$$

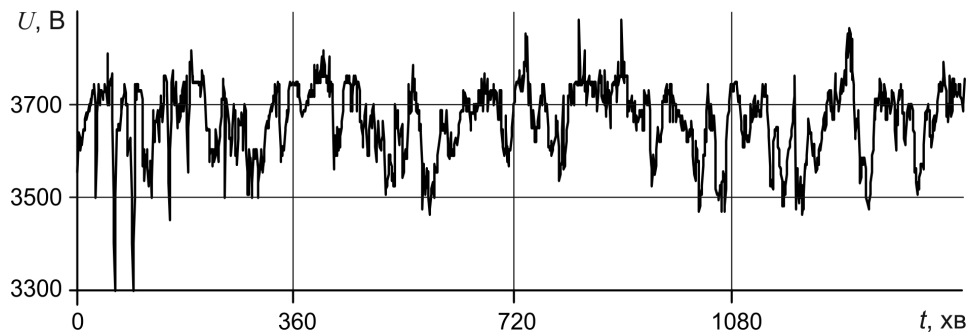


Рис. 3. Випрямлена напруга на шинах підстанції А за одну добу

Тоді коефіцієнт реактивної потужності одиниці електрорухомого складу дорівнює:

$$tg\phi = \frac{Q_{\phi}}{P}, \quad (23)$$

і визначається як відношення виразів (21) та (19), або (22) та (20).

4. Результати та аналіз чисельних розрахунків

Для ілюстрації викладеного методу, а також для оцінки власне значень активної P , реактивної по Фризе Q_{ϕ} і повної S потужностей було виконано чисельні розрахунки зазначених потужностей для однієї реально діючої електрифікованої ділянки постійного струму А-Б (А і Б – тягові підстанції) Придніпровської залізниці. Для цього було здійснено часовий моніторинг випрямлених фідерних напруги та струму, які одними своїми реалізаціями представлені на рис. 3 і 4.

Як впливає із рис. 3, випрямлена фідерна (підстанційна) напруга $U(t)$ характеризується значними неперервними коливаннями в часі, тобто є нестационарним випадковим процесом. Імовірно-статистичний аналіз $U(t)$ свідчить, що фактичні поточні значення на протязі доби змінюються в діапазоні від 3200 до 3700 В при середньому значенні 3500 В і середньоквадратичному відхиленні $\sigma_U = 72$ В. Незначні, хоча і від'ємні, значення коефіцієнта асиметрії ($As = -0,243$) і

ексцесу ($Ex = -0,104$), а також величина імовірності за критерієм Пірсона ($p = 0,16 \dots 0,23$) дозволяють зробити висновок, що імовірнісним законом розподілення величини напруги є закон Гаусса.

Одночасно, фідерний і підстанційний струми міжпідстанційної ділянки А-Б характеризуються теж різкими хвилеподібними змінами (рис. 4). Вони особливо помітні при малій кількості поїздів (1–2 поїзда) на фідерній зоні. Тобто, величина $I(t)$ теж являється нестационарним випадковим процесом. Розкид значень фідерного струму на протязі доби значний: від -200 до 1300 А при математичному сподіванні $m_I = 295$ А і $\sigma_I = 294$ А. Значення $As = 0,67$ і $Ex = -0,17$ свідчать про те, що законом розподілення значень однієї реалізації $I(t)$ не слідує за законом Гаусса, а має чітке явне відхилення вліво, в сторону менших значень струму.

Кореляційні функції, що побудовані для ансамблів реалізацій випадкових функцій напруги $U(t)$ і струму $I(t)$, представлені на рис. 5.

На рис. 6 представлені часові залежності активної P , реактивної по Фризе Q_{ϕ} і повної S потужностей, що передаються тяговою підстанцією А в тягову мережу міжпідстанційної зони А-Б; потужності визначені за виразами (9), (19) і (21). При цьому визначали «миттєві» (1 точка – середнє значення за 10 хв) і «погодинні» (1 точка – середнє значення за 1 год) значення потужностей.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

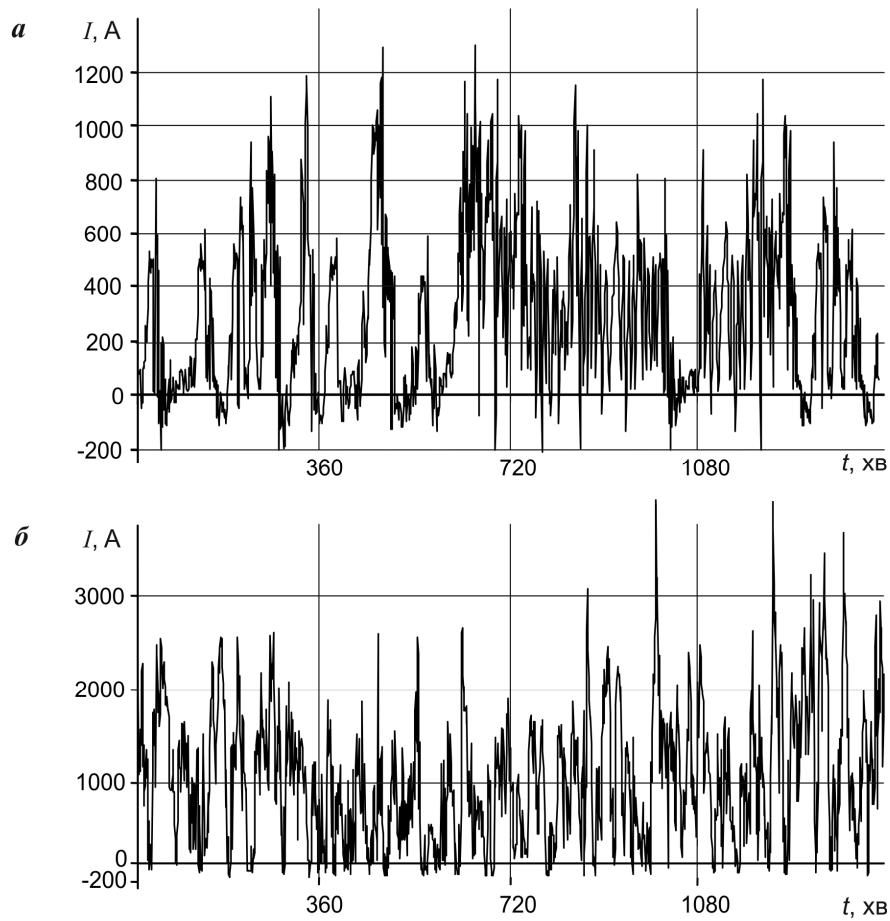


Рис. 4. Часові залежності тягових струмів:
а) фідерний струм тягової підстанції А; б) регістрограма струму всієї підстанції А

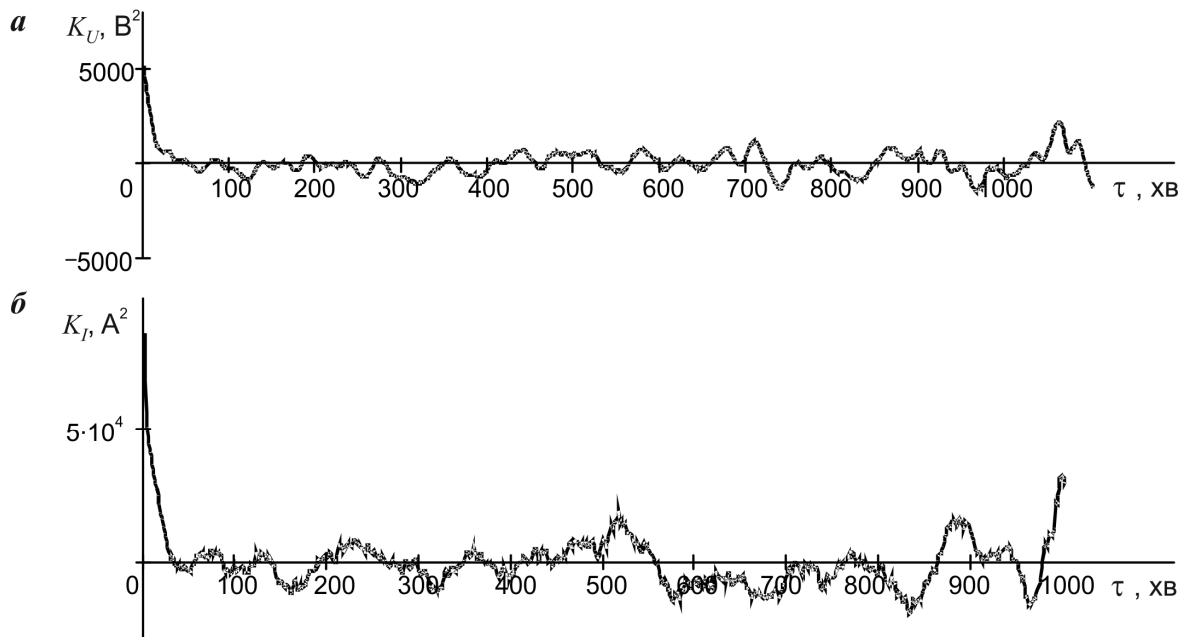


Рис. 5. Кореляційні функції випрямленої напруги: а – на шинах тягової підстанції А; б – фідерного струму

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

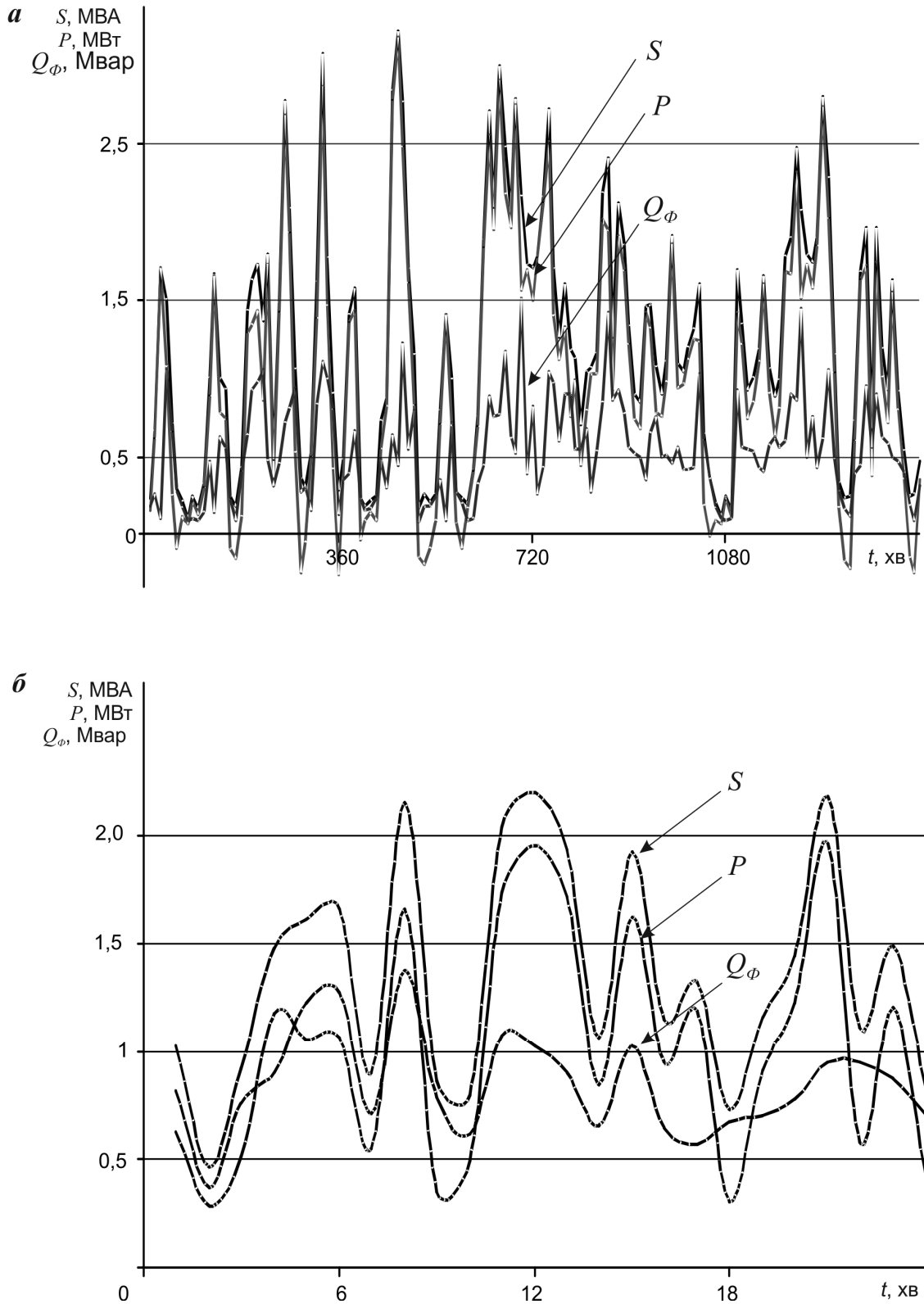


Рис. 6. Часові залежності потужностей, що передаються тяговою підстанцією А в тягову мережу зони А-Б:
а) «миттєві» за 2 години; б) «погодинні» за добу

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Залежності в часі $P(t)$, $Q_\phi(t)$, S , як впливає із рис. 6, є неперервними, неперіодичними, більш того, стохастичними процесами. «Миттєві» залежності (рис. 6, а) більш різко змінні, ніж «погодинні» (рис. 6, б). Закономірним і систематичним в графіках рис. 6 є те, що залежності $S(t)$ розташовуються вище залежностей $P(t)$ і $Q_\phi(t)$. Що ж стосується графіків $P(t)$ і $Q_\phi(t)$, то така закономірність відсутня: лінії кривих $P(t)$ і $Q_\phi(t)$ час від часу перетинаються. При цьому нерідко $Q_\phi > P$, що свідчить про значні перетоки реактивної потужності по тяговій мережі, які також обумовлюють великі значення додаткових втрат електроенергії. Останнє також підтверджується динамічними стохастичними змінами коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}\phi$, максимальні значення якого в деякі моменти часу перевищують 3,0 (рис. 7) при нормально-допустимому 0,25. Причиною цього, за нашою думкою, є невелике навантаження поїздами фідерної зони, яке обумовлює невеликі значення активної потужності P , бо, як

відомо, величина $\text{tg}\phi$ визначається за виразом (23).

Висновки

1. В тягово-рекуперативному режимі роботи системи електричної тяги постійного струму повну, активну та реактивну потужності доцільно визначати кореляційно-дисперсійним методом, який дозволяє враховувати нестационарний характер випадкових процесів напруги та струму.

2. В режимі рекуперативного гальмування, як і в тяговому режимі, енергетичною характеристикою одиниці електрорухомого складу має бути коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\phi$.

3. В системі електричної тяги постійного струму спостерігаються перетоки великих значень реактивної потужності, які обумовлюють також суттєві значення додаткових втрат електроенергії як в тягових мережах, так і в електрорухомому складі.

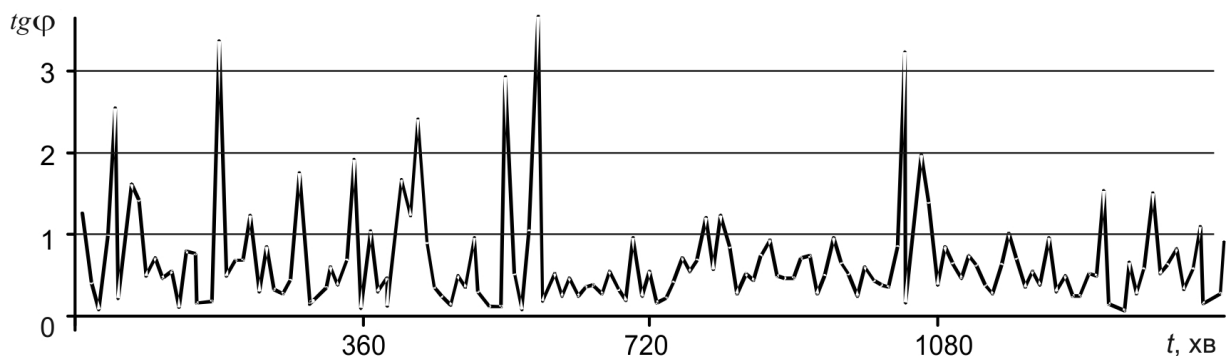


Рис. 7. Часові залежності «миттєвих» значень коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}\phi$ тягової мережі фідерної зони між підстанціями А і Б

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
2. Гренандер, У. Случайные процессы и статистические выводы / У. Гренандер. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 165 с.
3. Костін, М. О. Методи визначення складових повної потужності в системах електричної тяги / М. О. Костін, А. В. Петров // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПСЕ-2011». – 2011. – Вип. 4.3. – С. 53–59.
4. Никитин, Ю. М. Метод статистического исследования нестационарных случайных процессов в энергоснабжении / Ю. М. Никитин // Электричество. – 1971. – № 2. – С. 25–31.
5. Пугачев, В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М. : Гостехиздат, 1957. – 659 с.
6. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. – М. : Наука, 1968. – 463 с.
7. Чернецкий, В. И. Анализ точности нелинейных систем управления / В. И. Чернецкий. – М. : Машиностроение, 1968. – 246 с.
8. Effectiveness and Energy Saving Aspects in Modernization Process of Tram Power Supply Systems / A. Szelaq, T. Maciolek, Z. Drażek,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- M. Patoka // Pojazdy Szynowe, 2011, vol. 3, P. 34–42.
9. Fryze, S Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmiger Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // Elektrotechnische Zeitschrift. – 1932. – T. 25. – S. 596–599; T. 26. – S. 625–627; T. 29. – S. 700–702.
10. Gigch, J. M. (Jan) van. AC Traction Power Supply Design and EMC Verification / J. M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen // Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku : materiały konferencyjne 6 międzynarodowa konferencja naukowa (25-27 września 2003). – Warszawa : Politechnika Warszawska EESEM CoE, 2003, P. 1–6.
11. Krocak, M. Measurements of Electric Energy Parameters Using PC-Programmed Power Analyser / Maciej Krocak // Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku materiały konferencyjne 6 międzynarodowa konferencja naukowa (25–27 września 2003). – Warszawa : Politechnika Warszawska EESEM CoE, 2003. – P. 118–121.

А. В. НИКИТЕНКО^{1*}, Н. А. КОСТИН¹

^{1*}Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, к. 238, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, 49010, Украина, тел. +38 (056) 373 15 37, эл. почта nikitenko.diit@gmail.com; dnuzt_toe@mail.ru

КОРРЕЛЯЦИОННО-ДИСПЕРСИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ В УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Цель. Разработка и теоретическое обоснование аналитического метода определения активной, реактивной и полной мощностей устройств систем электрической тяги с учетом нестационарного характера изменения случайных процессов напряжения и тока в элементах этих систем. **Методика.** Для решения поставленной задачи используются математические методы теории случайных процессов, а также методы «дискретной электротехники». **Результаты.** Разработан корреляционно-дисперсионный метод аналитического определения активной, реактивной по Фризе и полной мощностей устройств систем электрической тяги магистральных железных дорог. Метод базируется на известных понятиях авто- и взаимокорреляционных функций случайных процессов, которым подчиняются фидерные напряжения и токи подсистемы тягового электрооборудования, а также напряжения и токи электроподвижного состава. Метод позволяет оценивать мощность в случае как стационарных, так и нестационарных стохастических процессов. Предложенный метод применим как для тягового режима, так и для режима рекуперативного торможения электроподвижного состава. Численные расчеты (по разработанному методу) составляющих полной мощности для одной из фидерных зон на Приднепровской железной дороге показали существенные перетоки реактивной мощности по тяговой сети, что подтверждается также большими значениями коэффициента реактивной мощности. **Научная новизна.** Заключается, во-первых, в том, что разработан и обоснован новый, корреляционно-дисперсионный, метод определения полной, активной и реактивной мощностей в элементах систем электрического транспорта, который отличается от существующих методов учетом нестационарного характера изменения случайных процессов фидерных и подстанционных напряжений и токов. Во-вторых, впервые установлено явление перетока больших значений реактивной мощности по Фризе в системе электрической тяги постоянного тока. **Практическая значимость.** Разработанный метод и методика, которая на нем базируется, позволяют оценить основные энергетические показатели систем электрической тяги, в частности, коэффициент реактивной мощности, а также основные и добавочные потери активной электрической энергии, как в силовых цепях электроподвижного состава, так и в тяговой питающей сети.

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

A. V. NIKITENKO^{1*}, M. O. KOSTIN¹

^{1*}Dep. “Electrical Engineering and Electromechanics”, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician. V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Room 238, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail nikitenko.diit@gmail.com; dnuzt_toe@mail.ru

THE METHOD OF THE CORRELATION AND DISPERSION DEFINING OF THE TOTAL POWER COMPONENTS IN THE ELECTRIC TRANSPORT DEVICES

Purpose. Development and theoretical ground of the analytical method for the calculation of the active, reactive and total powers in the electric traction devices, taking into consideration the non-stationary character of the stochastic processes change of the voltage and current in the elements of these systems. **Methodology.** The mathematical methods of the random processes theory and the “discrete electrical engineering” methods are used for solving the main problem of this paper. **Findings.** The Method of the Correlation and Dispersion is developed for definition of the active power, the reactive power by Fryse and the total power of the devices in the elements of the electric traction system of the main-line railways. The method is based on the well-known concepts of auto- and inter-correlation functions of the random processes which govern the feeder voltages and the currents in the traction power supply subsystem as well as the currents and voltages of the electric rolling stock. The method developed in this paper allows estimating the powers of both stationary and non-stationary processes. This method can be used for the analysis of both the traction mode and the regenerative braking mode of the electric rolling stock. The total power components were calculated for the one of the feeder areas of the Prydniprovsk railway using this method. The results show the significant flow of the reactive power in the traction power supply system. This fact is also confirmed by the high values of the reactive power coefficient. **Originality.** Scientific novelty of the research is consisted in the following. Firstly, for defining the active and reactive powers in elements of the traction power supply system the new method (the Method of Correlation and Dispersion) is created and grounded. This method is different from other existing methods because it takes into consideration the varying non-stationary character of the chance processes of the feeder and substation voltages and currents. Secondly, in the DC traction power supply system the large values of the exchange reactive power by Fryze were created for the first time. **Practical value.** The method and its technique allow calculating the main energy coefficients for the traction power systems such are the reactive power coefficient, the main and additional active power losses in the power circuit of the electric rolling stock and the traction power supply system.

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

REFERENCES

1. Venttsel Ye.S. *Teoriya veroyatnostey* [The probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p.
2. Grenander U. *Sluchaynyye protsessy i statisticheskiye vyvody* [The stochastic processes and the statistic findings]. Moscow, Izd-vo inostr. Lit. Publ., 1961. 165 p.
3. Kostin M.O., Petrov A.V. Metody vyznachennia skladovykh povnoi potuzhnosti v systemakh elektrychnoi tiahyy [The methods for the total power components definition in the traction power supply systems]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vyp. «PSE-2011» - Technical electrodynamics. Subject issue «PSE-2011»*, 2011, issue 4.3, pp. 53-59.
4. Nikitin Yu.M. Metod statisticheskogo issledovaniya nestatsionarnykh sluchaynykh protsessov v energosnabzhenii [The method of the statistic investigation of the non-stationary random processes in the power supply systems]. *Elektrichestvo - Electricity*, 1971, no. 2, pp. 25-31.
5. Pugachev V.S. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i yeye primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of the random functions and its using in the problems of the self-operated control systems]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1957. 659 p.
6. Svshnikov A.A. *Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy* [The applied methods of the random functions theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 463 p.
7. Chernetskiy V.I. *Analiz tochnosti nelineynykh sistem upravleniya* [The precision analysis of the nonlinear control systems]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1968. 246 p.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Szeląg A., Maciołek T., Drażek Z., Patoka M. Effectiveness and Energy Saving Aspects in Modernization Process of Tram Power Supply Systems. *Pojazdy Szynowe*, 2011, vol. 3, pp. 34-42.
9. Fryze S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusformigen Verlauf von Strom und Spannung. *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1932, no. 25, pp. 596-597; no. 26, pp. 625-627; no. 29, pp. 700-702.
10. J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen AC Traction Power Supply Design and EMC Verification. *Materiały konferencyjne 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku»*. Warszawa, 2003, pp. 1-6.
11. Krocak, M. Measurements of Electric Energy Parameters Using PC-Programmed Power Analyser. *Materiały konferencyjne 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku»*. Warszawa, 2003, pp. 118-121.

Стаття рекомендована до публікації д.физ.-мат.н., проф. Гаврилюком В. І (Україна),
д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)

Надійшла до редакції 22.03.2013

Прийнята до друку 10.04.2013