

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПОКАЗНИКИ РЕКУПЕРУЮЧИХ ТРАМВАЇВ

М. О. Костін¹, О. Г. Шейкіна²

¹ Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна, nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

² Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна, sheikina.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-5367-2674

ENERGY CHARACTERISTICS AND INDICATORS OF RECUPERATIVE TRAMS

М. О. Kostin¹, О. Нr. Sheikina²,

¹ Dniprovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, nkostin@ukr.net, ORCID ORG/0000-0002-0856-6397

² Dniprovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, sheikina.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-5367-2674

Мета роботи. Розробка нового імовірнісного методу оцінки та чисельний аналіз потужностей і енергетичних показників рекуперуючих трамваїв. **Методики досліджень.** Використано методи теорії електричної тяги, електричних кіл несинусоїдного струму і теорії випадкових процесів. **Результати досліджень.** Отримано аналітичні вирази і виконано імовірнісно-статистичні розрахунки потужностей і енергетичних показників трамваїв типу ТЗД і Т4д з урахуванням стохастичного характеру зміни рекуперованих напруг і струмів. Показано, що різкозмінний характер рекуперованих напруги і струму обумовлює таку ж динаміку зміни потужностей і енергетичних показників. При цьому в багатьох фазах рекуперативного гальмування коефіцієнт потужності менше 0,92-0,95, а коефіцієнт реактивної потужності більше 0,25. Статистичний розподіл величин потужностей різний: реактивна потужність, на відміну від активної і повної, підкоряється закону Гаусса. Розподіл коефіцієнта потужності «лінійно-зворотний» закону розподілу реактивної потужності, а коефіцієнта реактивної потужності – близьке до нормального закону. **Наукова новизна досліджень.** Розроблено новий кореляційно-дисперсійний метод визначення енергетичних показників трамваїв, заснований на дисперсійній теорії випадкових процесів. Встановлено й обґрунтовано закономірності впливу стохастичного характеру генерованих напруги і струму на коефіцієнт потужності і коефіцієнт реактивної потужності. Запропоновано вважати, що коефіцієнт потужності не завжди є досить очевидним енергетичним показником і в режимах рекуперації. **Практична значимість.** Отримані в роботі аналітичні співвідношення потужностей і коефіцієнтів потужностей дають можливість скласти більш повний і більш точний енергобаланс в системі міського трамвайного руху. Часові графічні залежності і гістограми величин потужностей, а також коефіцієнтів потужностей дають можливість прогнозувати параметри ефективних режимів рекуперації і для інших типів трамваїв, в інших містах України.

Ключові слова: трамвай, дисперсійний метод, рекуперація, напруга, енергетичні показники, струм, випадковий процес, потужності, ймовірність.

Вступ

Системи електричного транспорту, магістральний залізничний, приміський та міський, являються найбільш енергоємними галузями України: споживання ними електроенергії складає біля 5,5 – 6,0% від загального її споживання [1]. Тому аналіз і розробка різних способів економії електроенергії в зазначених системах – задача надзвичайно актуальна [2]. Розв'язуючи цю задачу, треба враховувати, що одним із найважливіших найпотужніших джерел економії електроспоживання в системах електротранспорту є процес рекуперації електроенергії її електрорухомим складом (ЕРС). Особливо це стосується систем міського транспорту, зокрема трамваїв. Це обумовлено тим, що вони являються найбільш динамічним, з різко змінним навантаженням, видом ЕРС, оскільки перед зупинками і на спусках ними майже обов'язково застосовується рекуперативне гальмування (РГ). Ця фаза руху трамваю є найбільш частою. Вона складає від 37 до 62% часу від загальної тривалості активної роботи трамваю й тим самим дозволяє отримувати від 33 до 54% електроенергії рекуперації відносно фази тяги. При цьому зазначимо, що електроенергетична ефективність трамваїв не повинна оцінюватись тільки за об'ємом і станом використання ними рекуперованої електроенергії, але й за такими їх енергетичними характеристиками як активна P , реактивна Q і повна S потужності, а також за енергетичними показниками: коефіцієнтом потужності λ і коефіцієнтом реактивної потужності tgr . Однак, на сьогодні ці показники залишаються

майже не вивченими. За нашою думкою, це пов'язано з хибною думкою про те, що, оскільки тягові електродвигуни трамваїв є машинами постійного струму, то і генеровані ними в режимах РГ напруга і струм являються теж постійними, а отже реактивна і повна потужності в системі відсутні і тому поняття коефіцієнтів λ і $\cos\varphi$ не застосовні. Насправді ж рекуперовані і напруга $U(t)$, і струм $I(t)$ являються змінними, навіть різкозмінними, для трамваїв, які в умовах міського руху повинні здійснювати розгони, прискорення і гальмування на коротких ділянках між зупинками. Більш того, генеровані напруга і струм мають випадковий (стохастичний) характер (рис.1 і [3]), обумовлений технологічними імовірнісними факторами: масою і швидкістю руху вагонів; профілем залізничної колії; режимом ведення трамваю (кваліфікацією водія) тощо. Врахування стохастичного характеру напруг і струмів тим більше потрібно при аналізі електроенергетичної ефективності роботи трамваїв, оскільки в системах електротранспорту України контролюється не лише загальне споживання електроенергії (зі зростанням її тарифу), але і зміни споживання реактивної енергії. До речі, спостерігається щорічне її зростання на 10–17% при одночасному теж щорічному зростанні її тарифу на 12–21%.

Тому проблема електрозбереження, яка безпосередньо пов'язана з оцінкою якості і балансу електроенергії у міському електричному транспорті, невід'ємна від аналізу зазначених енергетичних показників і характеристик системи руху трамваїв в режимах рекуперації. Такий аналіз дозволить у подальшому розробити засоби підвищення електроенергетичної ефективності міського електричного транспорту, що відповідає державній програмі [2].

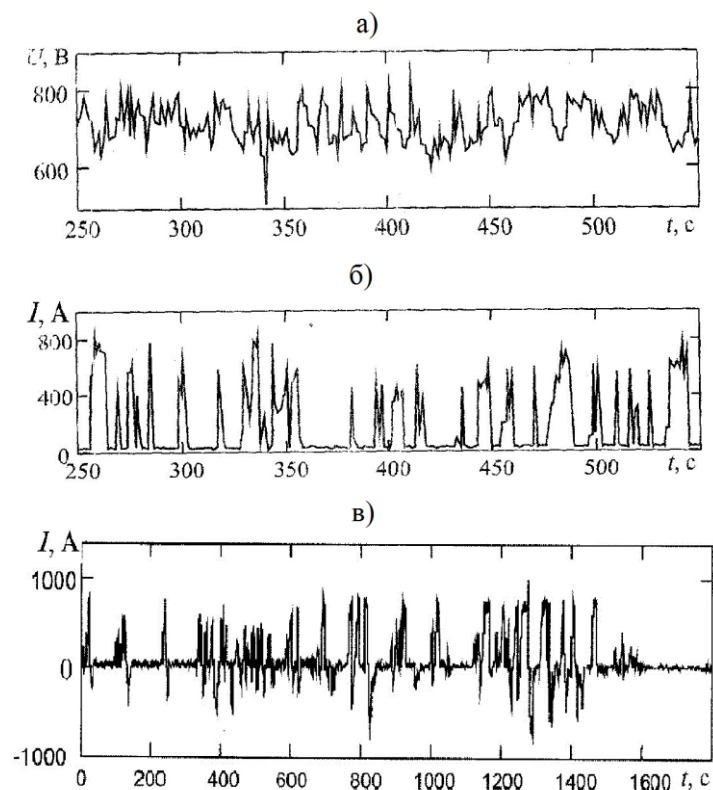


Рисунок 1 – Реєстрограми: напруга на струмоприймачі трамваю (а); тяговий струм (б); тягово-рекуперативний струм (в) [11]

Огляд останніх публікацій за темою статті

В останні 10–15 років суттєво збільшилась кількість наукових публікацій з аналізу існуючого стану власне процесу РГ та розробки різних способів отримання, аналізу якості та більш корисного використання енергії рекуперації трамваїв. Особливо це спостерігається в країнах Європи (нажаль, окрім України), що обумовлено необхідністю підвищення енергоефективності систем міського електротранспорту шляхом розробки бортових систем накопичення, аналізу характеристик і використання енергії рекуперації.

Найбільш ґрунтовні дослідження з розглядуваної проблеми виконано в Німеччині [4–6] і в Швейцарії [7]. Зокрема, фірмою Bombardier докладно проаналізована робота системи рекуперації, що розташована на дахах 19 трамваїв міста Гельдерберга. Система накопичує до 3 кВт·год, які використовуються при пуску трамваїв. Ця ж фірма на основі швидкісного трамваю і в дослідницькому центрі міста Мангейм виконала роботи по порівняльному аналізу передачі та якості енергії рекуперації. Цю ж технологію пізніше використано в канадському місті Монреаль.

В проаналізованих вище (так і в інших) публікаціях задача визначення потужностей та енергетичних коефіцієнтів розв'язується лише для детермінованих напруг і струмів рекуперації. У певній мірі цей недолік виправлено в роботі [8], в якій приведено по одній реалізації випадкових процесів напруги і струму рекуперації і розраховано величину миттєвої потужності. Однак в цій роботі, по-перше, оцінка енергоспоживання виконана для трамваїв з асинхронним приводом (в Україні маємо привод постійного струму). По-друге, не визначались складові повної потужності та енергетичні коефіцієнти.

За нашою думкою, найбільш докладно розглядувана в цій роботі задача досліджена в [9-11]. Однак, по-перше, запропоновані в [9,10] методи застосовні лише для режимів електричної тяги електровозів та електропоїздів. По-друге, випадкові процеси напруги і струму розглядаються в них класично, тобто як сукупність реалізацій $U(t)$, $I(t)$ за "n" поїздок, здійснених в однакових умовах. Однак таке припущення не може бути виконане для ділянок-струмів у фазах рекуперації трамваїв. Робота [11] присвячена аналізу лише режимів тяги трамваїв і, по-друге, отримані в ній вирази для потужностей базуються на теорії випадкових величин, в той час як рекуперовані напруга і струм являються стохастичними процесами.

Мета роботи

Розробка нового методу оцінки та імовірісно-статистичний аналіз енергетичних характеристик і показників трамваїв в режимах їх рекуперації з урахуванням стохастичного характеру зміни рекуперованих напруг і струмів.

Методики експериментальних досліджень

Імовірісно-статистичні розрахунки реактивної потужності та енергетичних показників виконували на основі реєстрограм (часових залежностей) напруги на струмоприймачі і рекуперованого струму, які отримували в реальних умовах експлуатації трамваїв типу Т3Д і Т4Д на маршрутах №11 і №17 міста Дніпро [11]. На кожному маршруті було синхронно зареєстровано по 30 реалізацій напруги і струму. При цьому (рис. 2) реєстрували напругу і повний, тобто тягово-рекуперативний, струм з наступним виділенням фаз руху трамваю: тяга, вибіг, рекуперація.

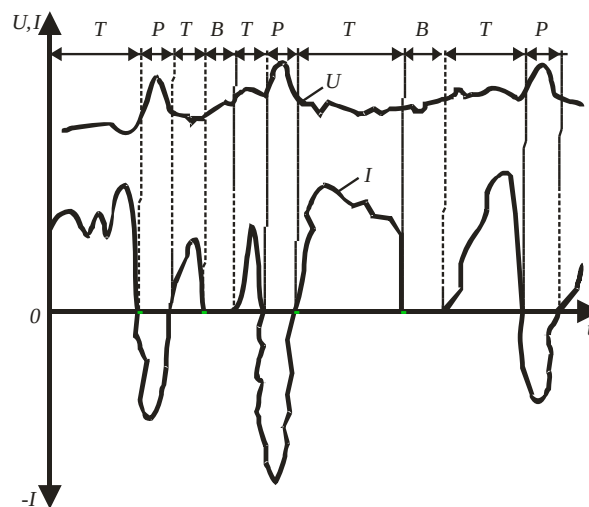


Рисунок 2 – Якісний вигляд реєстрограм напруги $U(t)$ на струмоприймачі трамваю та його тягово-рекуперативного струму $I(t)$ з виділенням фаз руху трамваю: Т – тяга; Р – рекуперація; В – вибіг.

Теоретичні передумови методу

Відома неоднозначність понять і формул знаходження складових повної потужності в електричних колах з несинусоїдною напругою та струмом [12,13]. Однак всі дослідники мають єдину думку, що з точки зору проблеми визначення енергоефективності, як в усталених, так і перехідних режимах роботи системи, найбільш правильною та ефективною є концепція С. Фризе [14], згідно з якою, зокрема, реактивна потужність визначається як невязка між повною S та активною P потужностями:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (1)$$

Стохастичний характер генерованих $U(t)$, $I(t)$ не дозволяє використовувати відомі в теоретичній електротехніці класичні вирази для визначення потужностей, необхідна розробка нового методу.

Уявимо собі синхронно зареєстровані за термін часу T_p фази електричного гальмування (термін часу рекуперації) ділянки часових залежностей напруги $U(t)$ на струмоприймачі ЕРС та струму рекуперації $I(t)$ (рис.1 і 2). Запишемо вирази функцій дисперсій цих випадкових процесів, відповідно $D_U(t)$ та $D_I(t)$.

Згідно теорії випадкових процесів [15], функція дисперсії довільної випадкової функції $X(t)$ визначається як математичне очікування квадрату центрованої розглядуваної функції $\overset{\circ}{X}(t)$

$$D_X(t) = M \left[\overset{\circ}{X}(t) \right]^2 = M [X(t) - m_X(t)]^2. \quad (2)$$

Оскільки терміни часу T_p ділянок-фаз короткі, тоді можна прийняти, що математичне очікування напруги $m_U(t) = \text{const} = m_U$ і струму $m_I(t) = \text{const} = m_I$. Тоді, з урахуванням (2) дисперсію процесу напруги можна записати як:

$$D_U(t) = M [U(t) - m_U]^2. \quad (3)$$

Тобто, функція дисперсії напруги може бути записана як середнє арифметичне значення квадратів відхилення процесу $U(t)$ від свого математичного очікування:

$$D_U(t) = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} [U(t) - m_U]^2 dt = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U^2(t) dt - \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} 2U(t) \cdot m_U dt + \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} m_U^2 dt. \quad (4)$$

Як відомо [15], для стаціонарних випадкових процесів незміщеною оцінкою математичного очікування є середнє арифметичне його значення за певний проміжок часу. Тоді за термін часу T_p фази рекуперації математичне очікування напруги прийме вираз:

$$M[U(t)] = m_U = \lim_{T_p \rightarrow 0} \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U(t) dt. \quad (5)$$

Використовуючи відоме поняття діючого значення напруги і зміст виразу (5), а також проінтегрувавши складові виразу (4), отримаємо результуючу формулу дисперсії напруги:

$$D_U = U_d^2 - m_U^2, \quad (6)$$

де U_d – діюче значення стохастичного процесу напруги на струмоприймачі в фазі рекуперації.

За аналогією, дисперсія стохастичного процесу струму рекуперації прийме вигляд:

$$D_I = I_d^2 - m_I^2, \quad (7)$$

де I_d – діюче значення струму рекуперації в фазі гальмування.

Із (6) і (7) випливає, що діючі значення напруги і струму запишуться як:

$$U_d = \sqrt{m_U^2 + D_U}, \quad (8)$$

$$I_d = \sqrt{m_I^2 + D_I}. \quad (9)$$

Тоді повна потужність, що рекуперується за термін часу T_p фази електричного гальмування, визначається за відомою формулою

$$S = U_d I_d = \sqrt{(m_U^2 + D_U)(m_I^2 + D_I)} = \sqrt{m_U^2 m_I^2 + m_U^2 D_I + m_I^2 D_U + D_U D_I}. \quad (10)$$

Згідно [15], уведемо поняття взаємної дисперсії напруги і струму D_{UI} як математичне очікування добутку центрованих функцій $U(t)$ і $I(t)$ і тоді з урахуванням (5) маємо:

$$\begin{aligned}
D_{UI}(t) &= M \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ U(t) & I(t) \end{bmatrix} = M[(U(t) - m_U)(I(t) - m_I)] = \\
&= \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} [U(t) - m_U][I(t) - m_I] dt = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U(t)I(t) dt - \\
&\quad - \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U(t)m_I dt - \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} I(t)m_U dt + \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} m_U m_I dt.
\end{aligned} \tag{11}$$

Перший доданок у правій частині (11) являє собою активну потужність P , що рекуперується за термін часу T_p в кожній фазі електричного гальмування, а наступні два:

$$\frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} U(t)m_I dt = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} I(t)m_U dt = m_U m_I. \tag{12}$$

Четвертий доданок (після інтегрування) теж прийме вираз “ $+m_U m_I$ ” З урахуванням зазначеного вираз (11) для взаємної дисперсії прийме вигляд:

$$D_{UI} = P - m_U m_I, \tag{13}$$

звідки активна потужність рекуперації:

$$P = D_{UI} + m_U m_I, \tag{14}$$

а реактивна потужність Фризе, згідно виразу (1), прийме вигляд:

$$Q_F = \sqrt{[(D_U + m_U^2)(D_I + m_I^2)] - [m_U m_I + D_{UI}]^2}. \tag{15}$$

Енергетичні показники досліджуваного типу ЕРС в фазі рекуперації оцінюються через знайдені потужності, а саме:

– коефіцієнт потужності

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{D_{UI} + m_U m_I}{\sqrt{m_U^2 m_I^2 + m_U^2 D_I + m_I^2 D_U + D_U D_I}}; \tag{16}$$

– коефіцієнт реактивної потужності:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_F}{P} = \frac{Q_F}{D_{UI} + m_U m_I}. \tag{17}$$

Отримувані за вищезазначеними формулами величини $P, Q_F, S, \lambda, \operatorname{tg} \varphi$ в фазах електричного гальмування трамваю являються випадковими величинами, що обумовлює необхідність їх подальшого імовірнісного аналізу.

Результати та аналіз чисельних розрахунків

Із отриманих експериментальних даних генерованих напруги і струму, а також результатів чисельних розрахунків потужностей та енергетичних коефіцієнтів випливає таке.

Різкі випадкові зміни напруги в межах 600...900 В (при математичному очікуванні 720 В) та струму в інтервалі 100...350 А, при математичному очікуванні 183,4 А, (наприклад, рис.1) призводять до того, що, часові залежності потужностей трамваїв являються також різкозмінними неперервними випадковими процесами (рис.3). При цьому, зокрема, реактивна потужність Фризе Q_F змінюється в межах 10...100 квар за одну поїздки по певному маршруту, при математичному очікуванні, рівному 37,0 квар. Статистичні розподілення величин потужностей різні в залежності від маршрутів. Зокрема, на маршруті 17 реактивна потужність підкоряється закону Гаусса з коефіцієнтом асиметрії 0,72 і ексцесом 0,54 (рис.4, а), а на маршруті 11 – величина Q_F описується асиметричним нормальним законом. В той же час, в режимах маршруту 17 і активна (рис.4,б), і повна (рис.4,в) потужності не підкоряються закону Гаусса.

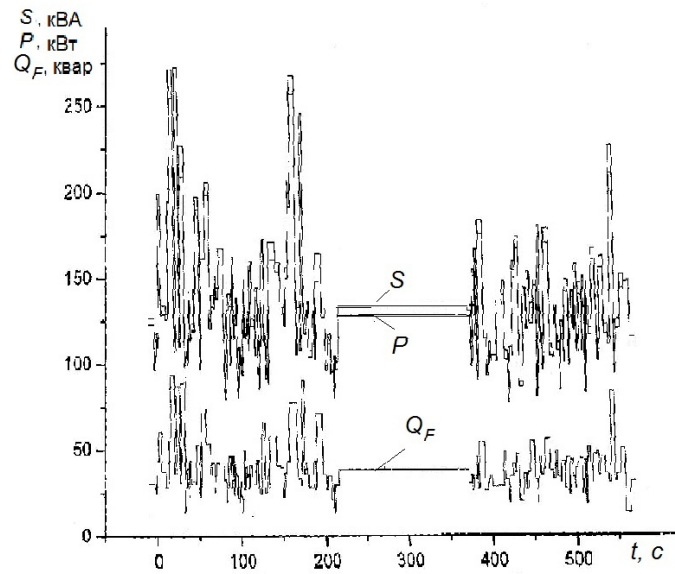
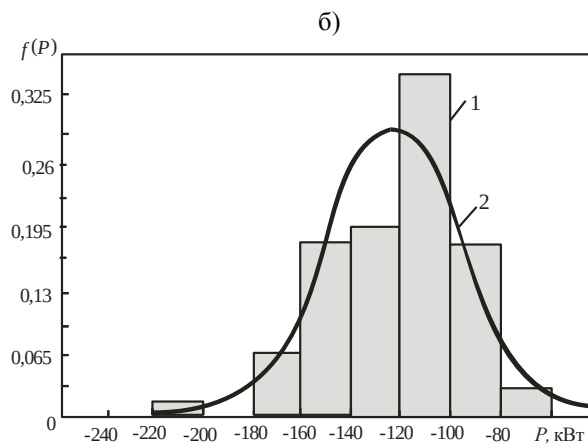
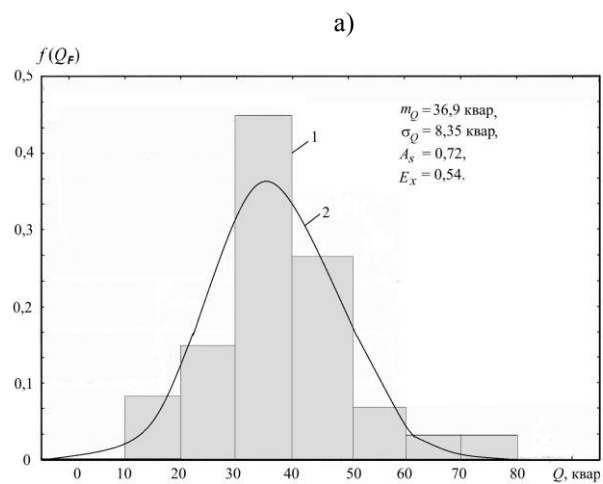


Рисунок 3 – Часові залежності реактивної Фризе Q_F , активної P та повної S потужностей трамваю Т4D у режимі рекуперації.



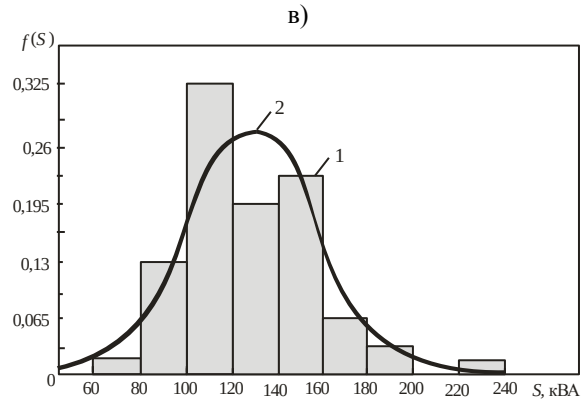


Рисунок 4 – Реактивна (а), активна (б) і повна (в) потужності трамваю Т4Д в режимі рекуперації при рухові по маршруту № 17: статистичні (1) і теоретичні (2) розподілення

Різкозмінний характер поведінки часових залежностей потужностей (рис. 3) обумовлює таку ж динаміку зміни коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}\varphi$ в режимі рекуперації (рис. 5). Характерною особливістю цих графіків є те, що і λ , і $\text{tg}\varphi$ мають різні значення в різні фази рекуперативного гальмування і при цьому нерідко коефіцієнт потужності λ менше нормативної величини 0,92...0,95, а коефіцієнт реактивної потужності більше нормативного значення 0,25.

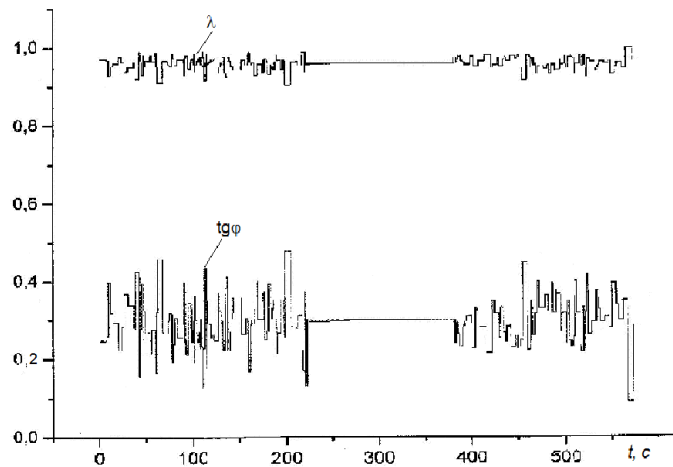


Рисунок 5 – Часові залежності коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}\varphi$ трамваю Т3Д у режимі рекуперації

За аналогією з потужностями, величини λ і $\text{tg}\varphi$ являються випадковими процесами. Імовірнісний закон розподілення коефіцієнта λ (рис.6, а) є “лінійно оберненим” закону розподілення реактивної потужності Q_F . Статистичне розподілення коефіцієнта $\text{tg}\varphi$ (рис.6, б) близьке до закону Гаусса з $As=0,053$ і $Es=0,154$. При цьому розкиди величин значні: λ – від 0,9 до 0,99 при $m_\lambda=0,96$ і $\text{tg}\varphi$ – від 0,05 до 0,5 при $m_{\text{tg}\varphi}=0,29$.

Аналізуючи ці розкиди, слід зауважити таке: дійсно коефіцієнт потужності λ не завжди є достатньо очевидним енергетичним показником в електричних колах несинусоїдного струму. Тому в останні 10...15 років в системах електротранспорту в якості звітної величини, наряду з λ , використовують, як вважається, більш точний енергетичний показник, яким є $\text{tg}\varphi$. Це проглядається і в нашій задачі: згідно рис. 6, а, найбільш імовірнісні значення коефіцієнта λ зміщені до інтервалу 0,94...0,99, в якому задовольняється вимога якості рекуперативної електроенергії трамваю. В той же час, найбільш імовірнісні значення $\text{tg}\varphi$ зосереджені в межах 0,25...0,4 (рис. 6, б), тобто в межах недоброякісності енергії рекуперації.

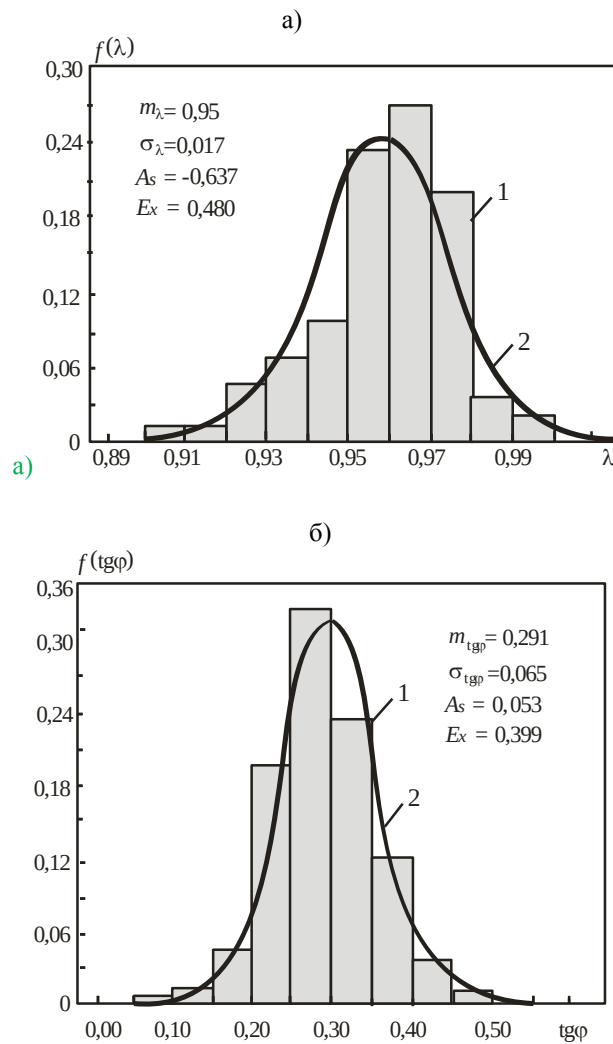


Рисунок 6 – Статистичні (1) і теоретичні (2) розподілення коефіцієнта λ (а) і коефіцієнта $\text{tg}\varphi$ (б) трамваю T4D у режимі рекуперації

Зазначена вище наявність реактивної потужності обумовлює достатньо великі значення (до 20%) додаткових втрат електроенергії рекуперації в системі руху трамваїв.

Висновки

1. Стохастичний характер рекуперованих напруги і струму обумовлює наявність в системах руху трамваїв активної, реактивної і повної потужностей та енергетичних показників, що являють собою стаціонарні неергодичні випадкові процеси і, статистичні розподілення яких залежать від типу трамваю та маршруту його руху і у більшості фаз рекуперації підкоряються закону Гаусса або асиметричному нормальному закону з дисперсійною функцією.

2. Імовірнісні розкиди реактивної потужності у фазах рекуперативного гальмування достатньо великі, в межах 10...100 квар, в результаті чого коефіцієнт реактивної потужності системи руху трамваїв суттєво перевищує допустиме значення 0,25, а повні технологічні втрати енергії рекуперації складають до 33% від її сумарної величини.

3. Суттєве покращення електроенергетичної ефективності системи руху трамваїв в режимах їх рекуперації можливе шляхом розробки на базі суперконденсаторів і встроювання в трамваї бортових систем компенсації реактивної потужності або систем регенерації рекуперованої електроенергії.

4. Результати проведених досліджень являються основою для адаптації і застосування дисперсійного методу оцінки потужностей та енергетичних показників для усіх систем електричного транспорту постійного струму.

Перелік посилань

1. Малышко И. В. Основные направления энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины/ И. В. Малышко // *Залізничний транспорт України*. – 2007. - № 1. – С. 12-14.
2. Транспортна стратегія України на період до 2020 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.12.2010 р. № 2818-VI.
3. Kostin M., Nikitenko A. Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode// *Przegląd Electrotechniczny*. Warsaw, Poland. – 2013. No 2a. – p. 273-275.
4. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb // *Elek. Bahnen*. – 2010. No 1-2 (108). – p. 93-94.
5. Klohr M. Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojek / M. Klohr, A. Maroschik // *Elek. Bahnen*. – 2012. No 8-9 (110). – p. 444-451.
6. Bombardier extends catenary-free technology // *Int. Railway J.* – 2011. No 5 (51). – p. 28.
7. Tango fur Gent mit Energiespeicher // *Elek. Bahnen*. – 2012. No 8-9 (110). – p. 508.
8. Czuchra W. Ocena energochłonności tramwajów y napędem asynchronicznym / W. Czuchra, J. Prusak, W. Zając // 7th International Conference “Modern Electric Transport in Integrated XXIst Century Europe”, Poland, Warsaw. – 2005. – p. 160-164.
9. Костін М. О. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними процесами / М. О. Костін // *Технічна електродинаміка*. Темат. випуск. ПСЕ. Частина 6. – 2006. – С. 3-8.
10. Костін М. О., Петров А. В. Методи визначення складових повної потужності в системах електричної тяги // *Технічна електродинаміка*. – 2011. Вип. 4.3. – С. 53-59.
11. Костин Н. А., Саблин О. И., Шейкина О. Г., Никитенко А. В. Коэффициенты мощности и реактивной мощности трамваев // *Гірнична електромеханіка та автоматика*. – 2013. Вип.91.- С.124-131.
12. Тонкаль В. Е. и др. Баланс энергий в электрических цепях. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
13. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах электроники / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крилов и др.// *Технічна електродинаміка*. Тем. Вип. – 2004. – ч.1. – С.80-91.
14. Fryze S. Wirk-, build- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicht sinsformigen verfaf von strom und spannung/ S. Fryze // *ETZ*, Germany, 1932, No 25, pp. 596-599; No 26, pp. 625-627; No 29, pp. 700-702.
15. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1962. – 659 с.

REFERENCES

1. Malysenko I. V. The main areas of energy saving in the railway transport of Uk. *Zaliznychnyj transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2007, no.1, pp. 12-14.
2. Transportna strategija Ukrainy na period do 2020 roku [Transport strategy of Ukraine for the period till 2020]. *Shvaleno rozporjadzhennjam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21.12.2010 r. № 2818-VI*.
3. Kostin M., Nikitenko A. Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode. *Przegląd Electrotechniczny*. Warsaw, Poland, 2013, no.2a, pp. 273-275.
4. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb. *Elek. Bahnen*, 2010, no.1-2 (108), pp. 93-94.
5. Klohr M. Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojek. *Elek. Bahnen*. – 2012, no.8-9 (110), pp. 444-451.
6. Bombardier extends catenary-free technology. *Int. Railway J.*, 2011, no.5 (51), pp. 28.
7. Tango fur Gent mit Energiespeicher. *Elek. Bahnen*, 2012, no.8-9 (110), pp. 508.
8. Czuchra W., Prusak J, Zając W. Ocena energochłonności tramwajów y napędem asynchronicznym. 7th International Conference “Modern Electric Transport in Integrated XXIst Century Europe”, Poland, Warsaw, 2005, pp. 160-164.
9. Kostin M.O. Methods of determination of capacities in systems with stochastic processes. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics. Topic output. PSE Part 6*, 2006, pp. 3-8.
10. Kostin M. O., Petrov A. V. Methods of determining the components of full power in systems of electric traction. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, no.4.3, pp. 53-59.
11. Kostin N.A., Sablin O.I., Sheikina O.G., Nikitenko A.V. Power and reactive power coefficients of trams. *Hirnycha Elektromekhanika Ta Avtomatyka – Mining electromechanics and automation*, 2013, no 91, pp. 124-131.
12. Tonkal' V. E. i dr. Balans jenergij v jelektricheskikh cepah [Energy balance in electrical circuits]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1992, 312 p.
13. Domnin I. F., Zhemerov G. G., Krilov D. S. [i dr.] Sovremennyye teorii moshhnosti i ih ispol'zovanie v preobrazovatel'nyh sistemah jelektroniki Modern Power Theories and Their Use in Transforming Electronic Systems.]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2004, no 1, pp. 80-91.
14. Fryze S. Wirk-, build- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicht sinsformigen verfaf von strom und spannung/ S. Fryze // *ETZ*, Germany, 1932, no.25, pp. 596-599; no.26, pp. 625-627; no.29, pp. 700-702.
15. Pugachev V. S. Teorija sluchajnyh funkcij i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravlenija [The theory of random functions and its application to problems of automatic control]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962, 659 p.

АННОТАЦИЯ

Цель работы. Разработка нового вероятностного метода оценки и численный анализ мощностей и энергетических показателей рекуперирующих трамваев. **Методики исследований.** Использованы методы теории электрической тяги, электрических цепей несинусоидального тока и теории случайных процессов. **Результаты исследований.** Получены аналитические выражения и выполнены вероятностно-

статистические расчеты мощностей и энергетических показателей трамваев типа T3D и T4D с учетом стохастического характера изменения рекуперируемых напряжений и токов. Показано, что резко переменный характер рекуперируемых напряжения и тока обуславливает такую же динамику изменения мощностей и энергетических показателей. При этом во многих фазах рекуперативного торможения коэффициент мощности менее 0,92-0,95, а коэффициент реактивной мощности более 0,25. Статистическое распределение величин мощностей различное: реактивная мощность, в отличие от активной и полной, подчиняется закону Гаусса. Распределение коэффициента мощности «линейно-обратное» закону распределения реактивной мощности, а коэффициента реактивной мощности – близкое к нормальному закону.

Научная новизна исследований. Разработан новый корреляционно-дисперсионный метод определения энергетических показателей трамваев, основанный на дисперсионной теории случайных процессов. Установлены и обоснованы закономерности влияния стохастического характера генерированных напряжения и тока на коэффициент мощности и коэффициент реактивной мощности. Предложено считать, что коэффициент мощности не всегда является достаточно очевидным энергетическим показателем и в режимах рекуперации. **Практическая значимость.** Полученные в работе аналитические соотношения мощностей и коэффициентов мощностей дают возможность составить более полный и более точный энергобаланс в системе городского трамвайного движения. Временные графические зависимости и гистограммы величин мощностей и коэффициентов мощностей дают возможность прогнозировать параметры эффективных режимов рекуперации и для других типов трамваев, в других городах Украины.

Ключевые слова: трамвай, дисперсионный метод, рекуперация, напряжение, энергетические показатели, ток, случайный процесс, мощности, вероятность.

ABSTRACT

Purpose of work. Development of a new probability assessment method and numerical analysis of power and energy indicators of recuperative trams. **Methods of the research.** The methods of the theory of electric traction, electric circuits with non-sinusoidal current and the theory of stochastic processes have been used. **Results of the research.** Analytical expressions have been obtained and probability and statistical calculations of power and energy indicators for trams of T3D and T4D type, taking into account stochastic nature of the change in the recovered voltages and currents, have been performed. It has been shown that sharply variable nature of recovered voltage and current determines the same dynamics of changes in power and energy indicators. Moreover, in many phases of regenerative braking, power factor is less than 0.92-0.95 and the reactive power factor is more than 0.25. Statistical distribution of power values is different: reactive power, in contrast to active and full power is subject to the Gauss's law. The distribution of power factor is "linear-inverse" to the law of distribution of reactive power but reactive power factor is close to a normal law. **Scientific novelty of the research.** A new correlation and dispersion method for determining energy indicators of trams based on the dispersion theory of stochastic processes has been developed. The regularities of the influence of stochastic nature of generated voltage and current on the power factor and reactive power factor have been established and grounded. It is offered to consider that power factor is not always a sufficiently obvious energy indicator in recuperation modes. **Practical significance.** The analytical expressions of power and power factors obtained in the work make it possible to compile more accurate and more detailed energy balance in urban tram traffic systems. Time graphical dependencies and histograms of power values and power factors make it possible to predict the parameters of effective recuperation modes also for other types of trams in other cities of Ukraine.

Key words: tram, dispersion method, recuperation, voltage, energy indicators, current, stochastic process, power, probability.