

М. О. КОСТІН (ДНУЗТ), А. В. НІКІТЕНКО (ВАРШАВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ)

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, к. 238, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел.: +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0856-6397>

Інститут електричних машин, Варшавський політехнічний університет, пл. Політехніки, 1, к. 246, м. Варшава, 00661, Польща, тел.: +48222347435, факс: +48226299817, e-mail: anatolij.nikitenko@ee.pw.edu.pl, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6426-5097>

КОЕФІЦІЄНТИ ПОТУЖНОСТЕЙ РЕКУПЕРУЮЧОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Ця робота є продовженням і розвитком досліджень [1, 2] по оцінці впливу режимів рекуперативного гальмування (РГ) електрорухомого складу (ЕРС) системи електротяги постійного струму на якість енергії рекуперації та енергетичні показники ЕРС.

Електроенергетична ефективність режимів РГ ЕРС постійного струму повинна оцінюватись не лише за об'ємом і станом використання рекуперативної електроенергії, але й за енергетичними показниками (коефіцієнтом потужності λ і коефіцієнтом реактивної потужності $tg\varphi$) ЕПС як джерела електроенергії, від якого залежить її якість. І в той же час ці показники залишаються майже не вивченими, не дивлячись на те, що процеси РГ застосовуються здавна, майже з часів початку впровадження системи електричної тяги. Імовірно, це пов'язано з думкою, що, оскільки тягові електродвигуни ЕРС є машинами постійного струму, то і генеровані в режимах РГ напруга і струм є теж постійними, а отже $\lambda = 1$ і $tg\varphi = 0$. Насправді, рекуперовані і напруга $U(t)$, і струм $I(t)$ являються змінними, навіть різкозмінними, в часі поїздки ЕРС величинами. Більш того, вони мають випадковий характер (рис.1), обумовлений технологічними імовірнісними факторами: масою і швидкістю руху поїзда; профілем залізничної колії; режимом ведення поїзда (кваліфікацією машиніста) тощо.

Стохастичний характер генерованих $U(t)$, $I(t)$ не дозволяє використовувати відомі в теоретичній електротехніці класичні вирази для визначення потужностей, а отже і коефіцієнтів λ і $tg\varphi$. Особливо це стосується реактивної потужності, відносно поняття і формул розрахунку якої до цього часу продовжуються наукові дискусії. В [3] запропоновано метод кореляційних функцій для визначення потужностей,

але метод базується на теорії стаціонарних ергодичних випадкових процесів. В існуючих закордонних публікаціях, зокрема в [4-6], означена проблема розв'язується, виходячи з детермінованого характеру зміни напруг і струмів, отриманих до того ж в тягових режимах ЕРС. В [7] запропоновано кореляційно-дисперсійний метод визначення складових повної потужності, однак вихідні вирази дещо складні. Тому у подальшому, у цій роботі, скористаємося зазначеним методом для визначення λ і $tg\varphi$, дещо спростивши результуючі формули.

Заголовок розділу

Існуюча на сьогоднішній день і яку найчастіше застосовують, в тому числі і в електричних колах систем тяги, традиційна класична система критеріїв ефективності електроенергетичних процесів включає в себе наступні показники якості енергопроцесів [8]: коефіцієнт зсуву фаз основної гармоніки струму відносно основної гармоніки напруги ($\cos\varphi_{(1)}$); коефіцієнт спотворення форми струму по відношенню до форми напруги (ν); коефіцієнт несиметрії навантаження по фазах ($K_{нс}$); коефіцієнт нерівномірності споживання електроенергії ($K_{нр}$).

Ці коефіцієнти, як і енергетичні показники, базуються на співвідношеннях потужностей (енергетичних характеристиках): активній, реактивній, спотворення, несиметрії нерівномірності та повній. Зазначені коефіцієнти визначають через ці потужності, як складові повної потужності, а загальним показником в цій системі являється коефіцієнт потужності (пристрою, системи) λ , який об'єднує всі локальні коефіцієнти за виразом:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos\varphi_1 \nu K_{нс} K_{нр}. \quad (1)$$

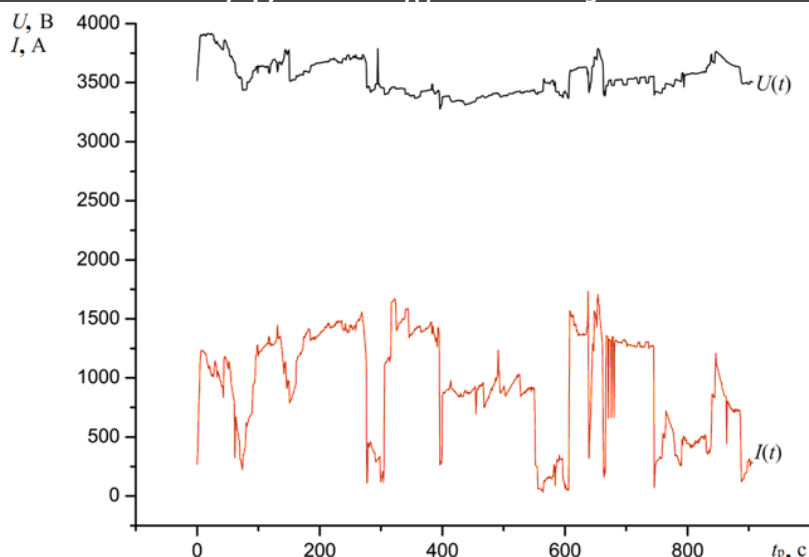


Рис. 1. Реєстрограми напруги на струмоприймачі $U(t)$ та струму $I(t)$ електровоза ВЛ11М6 в режимі рекуперації

У класичному розумінні стосовно ЕРС коефіцієнт потужності λ , по-перше, визначає ступінь використання повної рекуперативної потужності S . По-друге, величина λ також характеризує втрати активної потужності в силових тягових колах ЕРС. Слід зауважити, що цей коефіцієнт потужності не завжди є достатньо очевидним енергетичним показником і тому в останні 10...15 років в тяговому електропостачанні, подібно промислового, в якості звітної величини використовують коефіцієнт реактивної потужності $tg\varphi$, який визначається як

$$tg\varphi = \frac{Q_F}{P} \quad (2)$$

і який є більш енергетично практичним показником. Дійсно, наприклад, згідно попередніх розрахунків, при $\lambda = 0,934$ величина $tg\varphi = 0,384$, тобто, хоча λ вище нормативного і близький до 1, але споживана реактивна потужність Q_F складає майже 40% від активної, тобто порівняно велика. Якраз про це свідчить $tg\varphi$, значення якого більше норми 0,25.

Як впливає із (1) і (2), визначення коефіцієнтів λ і $tg\varphi$ можливо через знання потужностей S , P , Q_F . Остання потужність Q_F – це реактивна потужність Фризе [9], ефективність і перспективність використання якої в електричних колах несинусоїдного струму зазначається багатьма спеціалістами-електроенергетиками.

Отримаємо викази коефіцієнтів λ і $tg\varphi$, скориставшись, так званим, дисперсійним підходом, який є розвитком методу, запропонованого в [7], і який базується на тому, що, згідно [10, 11], кореляційна функція $R(t, t') = R(t, t + \tau)$

будь-якого випадкового процесу при $\tau = 0$ дорівнює дисперсійній функції $D(t)$ цього процесу. Імовірісно-статистична обробка реєстрограм $U(t)$ і $I(t)$, записаних в режимах рекуперації, дозволяє визначити кореляційні, а отже, і дисперсійні функції напруги і струму:

$$R_U(t, \tau = 0) = D_U(t) = U_{\partial}^2(t) - m_U^2(t), \quad (3)$$

$$R_I(t, \tau = 0) = D_I(t) = I_{\partial}^2(t) - m_I^2(t), \quad (4)$$

де $U_{\partial}(t)$, $m_U(t)$ та $I_{\partial}(t)$, $m_I(t)$ – функції діючих значень і математичних очікувань випадкових процесів напруги та струму.

Визначивши $U_{\partial}(t)$ і $I_{\partial}(t)$ із (3) і (4), знаходимо функціональну залежність повної потужності:

$$S(t) = U_{\partial}(t)I_{\partial}(t) = \sqrt{\left[D_U(t) + m_U^2(t) \right] \times \left[D_I(t) + m_I^2(t) \right]} \quad (5)$$

За аналогією, взаємну кореляційну функцію процесів $U(t)$ і $I(t)$ можна записати як

$$R_{UI}(t) = P(t) - m_U(t)m_I(t), \quad (6)$$

звідки функція активної потужності:

$$P(t) = R_{UI}(t) + m_U(t)m_I(t). \quad (7)$$

Враховуючи відомий вираз реактивної потужності за Фризе

$$Q_F(t) = \sqrt{S^2(t) - P^2(t)} \quad (8)$$

та вирази (1), (2), (5) та (7), знаходимо шукані вирази коефіцієнтів λ і $tg\varphi$ у вигляді:

$$\lambda(t) = \frac{R_{UI}(t) + m_U(t)m_I(t)}{\sqrt{[D_U(t) + m_U^2(t)][D_I(t) + m_I^2(t)]}} \quad (9)$$

$$(tg\varphi)(t) = \frac{\sqrt{\left[\begin{array}{l} D_U(t) + m_U^2(t) \times \\ \times [D_I(t) + m_I^2(t)] - \\ - [R_{UI}(t, \tau = 0) + \\ + m_U(t)m_I(t)]^2 \end{array} \right]}}{R_{UI}(t) + m_U(t)m_I(t)} \quad (10)$$

Результати та аналіз чисельних розрахунків

Використовуючи отримані вище вирази та статистичний матеріал, приведений в [12, 13], були виконані чисельні розрахунки коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ електровозів ВЛ 11М 6 і ВЛ 8, а також електропоїзда ЕПЛ2Т в режимах рекуперативного гальмування при їх експлуатації на ділянках Придніпровської залізниці. Величини λ і $tg\varphi$ розраховували як середні значення за термін часу t_p фази рекуперативного гальмування.

Як випливає із рис.2-4, часові за кожну поїзду залежності $\lambda(t)$ і $tg\varphi(t)$ мають різкозмінний характер своєї поведінки, особливо це стосується електровозів. В різні фази РГ коефіцієнти мають різні значення, які суттєво випадково відрізняються одне від одного. Тим самим, часові залежності $\lambda(t)$ і $(tg\varphi)(t)$ являються собою випадкові процеси, по одній реалізації яких представлено на рис.2-4. В більшості фаз рекуперації коефіцієнт потужності λ менше нормативного значення 0,92...0,95, а коефіцієнт реактивної потужності перевищує нормативну величину 0,25.

Статистичні розподілення випадкових величин $\lambda(t)$ і $tg\varphi(t)$ суттєво відрізняються одне від одного. Закон розподілення значень $tg\varphi(t)$ для усіх досліджених типів ЕРС, близький до закону Гаусса з коефіцієнтом асиметрії $A_s = -0,18... + 0,357$ і ексцесом $E_x = -1,0... + 0,154$ (рис.5).

В той же час, розподілення λ асиметричні, не гауссові, скошені в бік більших значень, мають від'ємний $A_s = -1,35... - 0,4$ і $E_x = -1,02... + 1,42$ (рис.6).

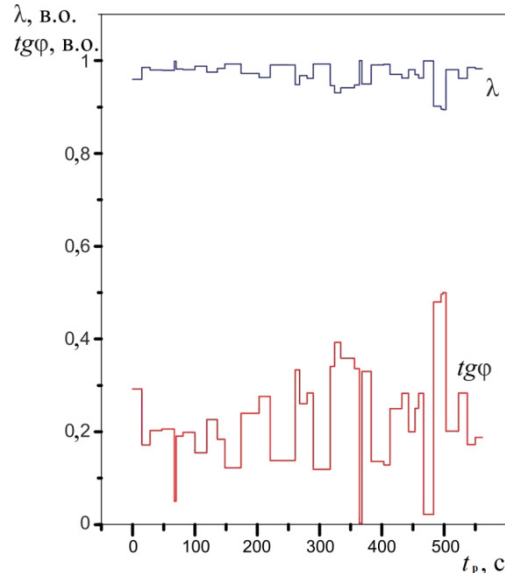


Рис. 2. Часові залежності коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ електровозів ВЛ 11М 6 в режимі рекуперативного гальмування

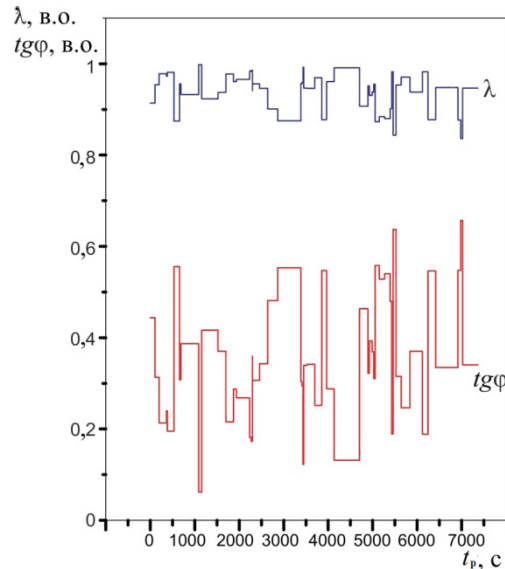


Рис. 3. Часові залежності коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ електровозів ВЛ 8 в режимі рекуперативного гальмування

Тому в цій роботі розподілення значень λ вирівнювали асиметричним нормальним законом з дисперсійною функцією σ_λ^2 [14]:

$$f(\lambda) = \frac{\sigma_\lambda^2}{\sqrt{2\pi}\sigma_\lambda} \exp\left[-\frac{(\lambda - m_\lambda)^2}{2\sigma_\lambda^2}\right],$$

де

$$\sigma_\lambda^2 = 1 - E_x - A_s \left(\frac{\lambda - m_\lambda}{\sigma_\lambda}\right) - 2E_x \left(\frac{\lambda - m_\lambda}{\sigma_\lambda}\right)^2 + \frac{A_s}{3} \left(\frac{\lambda - m_\lambda}{\sigma_\lambda}\right)^3 + \frac{E_x}{3} \left(\frac{\lambda - m_\lambda}{\sigma_\lambda}\right)^3.$$

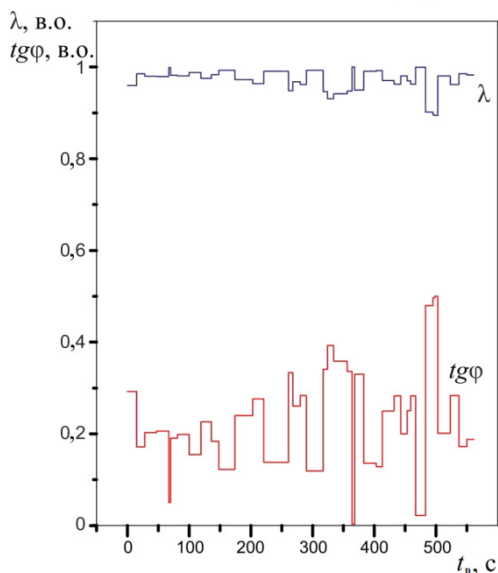


Рис. 4. Часові залежності коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ електровозів ЕПЛ2Т в режимі рекуперативного гальмування

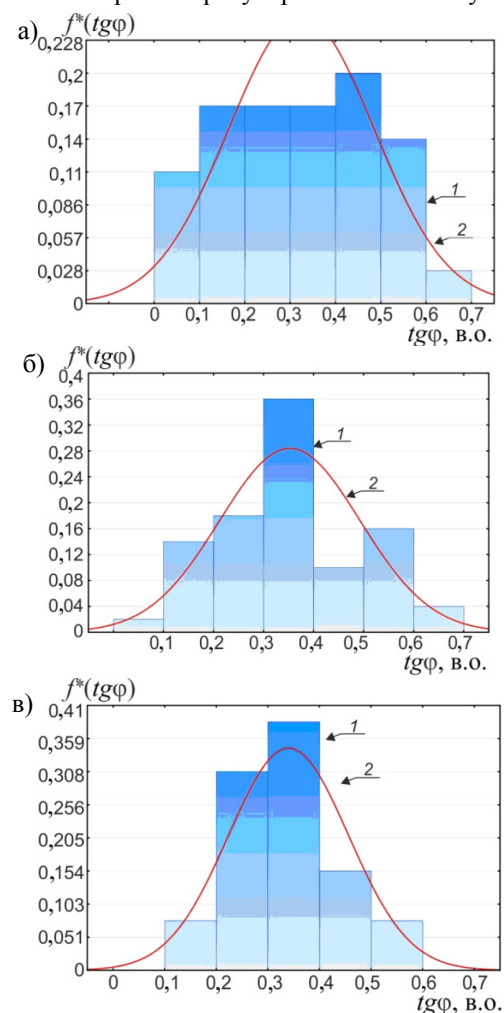


Рис. 5. Гістограма (1) і теоретичне розподілення (2) коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ в режимі рекуперативного гальмування: а) електровоза ВЛ 11М 6; б) електровоза ВЛ 8; в) електропоїзда ЕПЛ2Т

Як впливає із вигляду гістограм, розкиди $\lambda(t)$ і $(tg\varphi)(t)$ значні: для λ – від 0,8 до 0,98; для $tg\varphi$ – від 0,05 до 0,7. При цьому в певні фази РГ значення λ досягають значення, близького 1, а $tg\varphi = 0,05 \dots 0,1$. Тобто, в певні фази РГ генерується якісна електроенергія (якщо оцінювати її за коефіцієнтом λ). Однак, аналіз параметрів розподілень λ і $tg\varphi$ підтверджує думку, що λ не зовсім «точно» характеризує «якість» енергетичних процесів. Дійсно, це впливає із порівняння математичних очікувань і середньоквадратичних відхилень λ і $tg\varphi$ для кожного типу ЕРС. А саме, для ВЛ11М6: $m_\lambda = 0,946$; $\sigma_\lambda = 0,042$, тобто, виходячи із λ , нормативне значення виконується, а в той же час $m_{tg\varphi} = 0,323$; $\sigma_{tg\varphi} = 0,158$, тобто, по $tg\varphi$ норматив не дотримується і розкид вище. Аналогічно, для ВЛ 8 маємо: $m_\lambda = 0,946$ (вище норми), а $m_{tg\varphi} = 0,323$ (норма не дотримується).

За аналогією з режимом тяги можна зробити висновок, що в режимах рекуперації $\lambda < 1$, а $tg\varphi > 0$ за рахунок реактивної потужності (Фризе), а остання, певно, обумовлена двома складовими: потужністю накопичення в реактивних елементах силового тягового кола електровоза і потужністю викривлення. Перша має місце внаслідок наявності нелінійних індуктивностей тягових двигунів ЕРС, а друга – внаслідок викривлення струму рекуперації у порівнянні з формою напруги на струмоприймачі в режимі рекуперативного гальмування.

Висновки

1. Класичні методи теоретичної електротехніки не застосовні для оцінки в режимах рекуперативного гальмування енергетичних показників підсистем системи електротяги, необхідна розробка спеціальних методів, що базуються на кореляційній теорії випадкових процесів.

2. Часові залежності коефіцієнту потужності λ і коефіцієнту реактивної потужності $tg\varphi$ являють собою стохастичні процеси, стаціонарні в фазах рекуперації і нестаціонарні на протязі терміну часу всієї певної поїздки з поїздом.

3. Статистичні розподілення випадкової величини $tg\varphi$ для усіх досліджених типів ЕРС являють собою закон, що близький до закону Гауса, а розподілення коефіцієнта λ – асиметричний нормальний закон з дисперсійною функцією.

4. Середньоквадратичні відхилення величин λ і $tg\varphi$ значні і тому у більшості фаз рекупера-

тивного гальмування значення коефіцієнта λ помітно менше нормативних величин 0,92...0,95, а значення $tg\varphi$ – значно перевищують допустиму величину 0,25, тим самим підк-

реслюючи той факт, що під час рекуперативного гальмування ЕРС генерується електроенергія низької якості, що спричинює її додаткові втрати в елементах системи електричної тяги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Костін М. О. Вплив рекуперації та вибігу електрорухомого складу на його енергетичні показники / М. О. Костін, О. І. Саблін, А. В. Нікітенко // *Науковий журнал «Електрифікація транспорту»* – Д. : Вид-во ДНУЗТ, 2011. – №2. – С. 44-46.
2. Костін М. О. Якість електричної енергії, рекуперованої електровозами ВЛ11М6 і ВЛ11М / М. О. Костін, А. М. Муха, А. В. Нікітенко // *Науковий журнал «Електрифікація транспорту»* – Д. : Вид-во ДНУЗТ, 2015. – №10. – С. 108-116.
3. Костін М. О. Методи визначення складових повної потужності в системах електричної тяги / М. О. Костін, А. В. Петров // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «ПСЕ-2011»*, 2011. – Вип. 4.3. – С. 53-59.
4. Szelaq A. Effectiveness and energy saving aspects in modernization process of tram power supply system / A. Szelaq, T. Maciolek, Z. Drażek, M. Patoka // *Pojazdy Szynowe*, 2011. – Vol. 3. – P. 34-42.
5. J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen AC traction power supply design and EMC verification / J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen // *Materiały konferencyjne. 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku (25-27 września 2003)»*, Warszawa, Polska, 2003. – P. 1-6.
6. Krocak M. Measurements of electric energy parameters using PC-programmed power analyzer/ M. Krocak // *Materiały konferencyjne. 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku (25-27 września 2003)»*, Warszawa, Polska, 2003. – P. 118-121.
7. Нікітенко А. В. Кореляційно-дисперсійний метод визначення складових повної потужності в пристроях електричного транспорту / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // *«Наука та прогрес транспорту» Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна*. – Д. : Вид-во ДНУЗТ, 2013. – В. 2(44). – С. 64-75.
8. Маевский О. А. *Энергетические показатели вентильных преобразователей*. – М. : Энергия, 1978. – 320 с.
9. Fryze S. Wirk-, build- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicht sinsformigen verfaf von strom und spanning/ S. Fryze // *ETZ*, Germany, 1932, No 25, pp. 596-599; No 26, pp. 625-627; No 29, pp. 700-702.
10. Пугачев В. С. *Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления*. – М. : Гостехиздат, 1957. – 659 с.
11. Свешников А. А. *Прикладные методы теории случайных функций*. – М. : Наука, 1968. – 463 с.
12. Kostin M. Statistics and probability analysis of voltage on the pantograph of DC electric locomotive in

REFERENCES

1. Kostin M. O. Vplyv rekuperatsii ta vybihu elektorukhomoho skladu na yoho enerhetychni pokaznyky [Influence of recuperation and running-out of electric rolling stock on its energy indices] / M. O. Kostin, O. I. Sablin, A. V. Nikitenko // *Naukovyi zhurnal «Elektryfikatsiia transportu» [Scientific journal «Electrification of transport»]* – D. : Pub. dep. of DNURT, 2011. – №2. – P. 44-46.
2. Kostin M. O. Yakist elektrychnoi enerhii, reku-perovanoi elektrovozamy VL11M6 i VL11M [The quality of electric energy recuperated by locomotives VL11M6 and VL11M] / M. O. Kostin, A. M. Mukha, A. V. Nikitenko // *Naukovyi zhurnal «Elektryfikatsiia transportu» [Scientific journal «Electrification of transport»]* – D. : Pub. dep. of DNURT, 2015. – №10. – P. 108-116.
3. Kostin M. O. Metody vyznachennia skladovykh povnoi potuzhnosti v systemakh elektrychnoi tiahы [Methods for estimation of the total power components in the electric traction systems] / M. O. Kostin, A. V. Petrov // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk «PSE-2011» [Technical Electrodynamics. Thematic Volume «PSE-2011»]*, 2011. – V. 4.3. – P. 53-59.
4. Szelaq A. Effectiveness and energy saving aspects in modernization process of tram power supply system / A. Szelaq, T. Maciolek, Z. Drażek, M. Patoka // *Pojazdy Szynowe*, 2011. – Vol. 3. – P. 34-42.
5. J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen AC traction power supply design and EMC verification / J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen // *Materiały konferencyjne. 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku (25-27 września 2003)»*, Warszawa, Polska, 2003. – P. 1-6.
6. Krocak M. Measurements of electric energy parameters using PC-programmed power analyzer/ M. Krocak // *Materiały konferencyjne. 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku (25-27 września 2003)»*, Warszawa, Polska, 2003. – P. 118-121.
7. Nikitenko A. V. Koreliatsiino-dyspersiinyi metod vyznachennia skladovykh povnoi potuzhnosti v prystroiakh elektrychnoho transportu [The method of the correlation and dispersion defining of the total power components in the electric transport devices] / A. V. Nikitenko, M. O. Kostin. // *«Наука та прогрес транспорту» Biuletен Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni ak. V. Lazariana [“Science and transport progress” Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after ac. V. Lazaryan]*. – D. : Pub. dep. of DNURT, 2013. – V. 2(44). – P. 64-75.
8. Maevski O. A. *Energeticheskie pokazateli ventilynih preobrazovateley [Power indexes of valve inverters]*. – Moscow : Energy, 1978. – 320 p.

the recuperation mode / M. Kostin, A. Nikitenko // *Przegląd Elektrotechniczny*, Warsaw, Poland, 2013. – No 2a. – P. 273-275.

13. Нікітенко А. В. Імовірнісно-статистичний і кореляційно-спектральний аналізи струму рекуперації електрорухомого складу постійного струму / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // “Наука та прогрес транспорту” Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – В. 3(51). – С. 51-64.

14. Бернштейн С. Н. *Собрание сочинений. Том IV. Теория вероятностей. Математическая статистика.* – М.: Наука, 1964. – 557 с.

Надійшла до друку 19.04.2016.

9. Fryze S. Wirk-, build- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicht sinsformigen verfaf von strom und spanning/ S. Fryze // *ETZ*, Germany, 1932, No 25, pp. 596-599; No 26, pp. 625-627; No 29, pp. 700-702.

10. Pugachev V.S. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i eye 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.

11. Sveshnikov A.A. *Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy [The applied methods of the random functions theory]*. Moscow : Nauka Publ., 1968. – 463 p.

12. Kostin M. Statistics and probability analysis of voltage on the pantograph of DC electric locomotive in the recuperation mode / M. Kostin, A. Nikitenko // *Przegląd Elektrotechniczny*, Warsaw, Poland, 2013. – No 2a. – P. 273-275.

13. Nikitenko A. V. Imovirnisno-statystychnyi i koreliatsiino-spektralnyi analizy strumu rekuperatsii elektrorukhomoho skladu postiinoho strumu [Statistic, probabilistic, correlation and spectral analyses of regenerative braking current of DC electric rolling stock] / A. V. Nikitenko, M. O. Kostin // “*Nauka ta prohres transportu*” *Biuletyn Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni ak. V. Lazariana* [“*Science and transport progress*” *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after ac. V. Lazaryan*]. – D. : Pub. dep. of DNURT, 2014. – V. 3(51). – P. 51-64.

14. Bernshteyn S. N. *Sobranie sochineniy. Tom IV. Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika [Collected works. Volume IV. Probability theory. Mathematical statistics]*. – Moscow : Science, 1964. – 557 p.

Внутрішній рецензент Кузнецов В. Г.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

Необхідність оцінки не лише якості рекуперованої електроенергії, але й енергетичних показників електрорухомого складу, як генератора цієї енергії, не дискутується. І в той же час ці показники, зокрема, коефіцієнт потужності λ і коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\phi$, залишаються не вивченими. Складність розв'язання цієї задачі стримується, насамперед, випадковим (стохастичним) характером зміни напруги і струму в режимах рекуперативного гальмування. В роботі запропоновано дисперсійний метод вивчення λ і $\text{tg}\phi$, який базується на кореляційній теорії випадкових процесів. Виконані і проаналізовані результати чисельних розрахунків коефіцієнтів λ і $\text{tg}\phi$ для електровозів ВЛ11М6 і ВЛ8, а також для електропоїзда ЕПЛ2Т в режимах їх рекуперативного гальмування на діючих ділянках Придніпровської залізниці. Встановлено, що часові залежності $\lambda(t)$ і $\text{tg}\phi(t)$ являють собою різкозмінні випадкові процеси, стаціонарні в фазах рекуперативного гальмування і нестаціонарні – за термін часу всієї поїздки з поїздом. Результати імовірнісно-статистичної обробки свідчать, що статистичні розподілення коефіцієнта $\text{tg}\phi$ близькі до закону Гаусса, а розподілення випадкової величини λ підкоряються асиметричному нормальному закону з дисперсійною функцією. Середньоквадратичні відхилення λ і $\text{tg}\phi$ значні і тому в більшості фаз рекуперативного гальмування значення λ менше нормативних величин 0,92...0,95, а значення $\text{tg}\phi$ – перевищують гранично допустиме 0,25. Аналіз параметрів статистичних розподілень λ і $\text{tg}\phi$ для усіх досліджених типів електрорухомого складу підтверджує також думку, що коефіцієнт $\text{tg}\phi$ більш «точно», ніж λ , характеризує «якість» енергетичних процесів в системі електричної тяги постійного струму.

Ключові слова: рекуперативне гальмування, коефіцієнт потужності, випадковий процес, електровоз.

УДК 629.423.1

Н. А. КОСТИН (ДНУЗТ), А. В. НИКИТЕНКО (ВАРШАВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, к. 238, г. Днепропетровск, 49010, Украина, тел.: +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0856-6397>

© Костін М. О., Нікітенко А. В., 2016

КОЭФФИЦИЕНТЫ МОЩНОСТЕЙ РЕКУПЕРИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Необходимость оценки не только качества рекуперированной электроэнергии, но и энергетических показателей электроподвижного состава, как генератора этой энергии, не дискутируется. И в то же время эти показатели, в частности, коэффициент мощности λ и коэффициент реактивной мощности $\text{tg}\varphi$, не изучены. Сложность решения этой задачи сдерживается, прежде всего, случайным (стохастическим) характером изменения напряжения и тока в режимах рекуперативного торможения. В работе предложен дисперсионный метод изучения λ и $\text{tg}\varphi$, который основан на корреляционной теории случайных процессов. Выполнены и проанализированы результаты численных расчётов коэффициентов λ и $\text{tg}\varphi$ для электровозов ВЛ11М6 и ВЛ8, а также для электропоезда ЭПЛ2Т в режимах их рекуперативного торможения на действующих участках Приднепровской железной дороги. Установлено, что временные зависимости $\lambda(t)$ и $\text{tg}\varphi(t)$ являются резкоизменяющимися случайными процессами, стационарные в фазах рекуперативного торможения и нестационарные – за период времени всей поездки с поездом. Результаты вероятностно-статистической обработки свидетельствуют, что статистические распределения коэффициента $\text{tg}\varphi$ близки к закону Гаусса, а распределения случайной величины λ подчиняются асимметричному нормальному закону с дисперсионной функцией. Среднеквадратические отклонения λ и $\text{tg}\varphi$ значительны и поэтому в большинстве фаз рекуперативного торможения значения λ меньше нормативных величин 0,92...0,95, а значения $\text{tg}\varphi$ – превышают граничное допустимое 0,25. Анализ параметров статистических распределений λ и $\text{tg}\varphi$ для всех исследуемых типов электроподвижного состава подтверждает также мысль, что коэффициент $\text{tg}\varphi$ более «точно», чем λ , характеризует «качество» энергетических процессов в системе электрической тяги постоянного тока.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, коэффициент мощности, случайный процесс, электровоз.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 629.423.1

M. O. KOSTIN (DNURT), A. V. NIKITENKO (WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY)

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, office 238, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel.: +380563731537, e-mail: nkoston@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0856-6397>

Institute of Electrical Machines, Warsaw University of Technology, Pl. Politechniki, 1, room 246, Warsaw, 00661, Poland, tel.: +48222347435, fax: +48226299817, e-mail: anatolij.nikitenko@ee.pw.edu.pl, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6426-5097>

THE POWER COEFFICIENTS OF DC ELECTRIC ROLLING STOCK IN THE REGENERATIVE BRAKING MODE

The need to estimate not only the quality of recovered electricity, but also the energy performance of electric rolling stock, as a generator of energy, is not debated. At the same time the indexes as a power factor λ and a reactive power coefficient $\text{tg}\varphi$ are not studied enough. The complexity of this task is constrained primarily by a random (stochastic) nature of the voltage and current in the regenerative braking mode. The paper covers a dispersion method for studying λ and $\text{tg}\varphi$, which is based on the correlation theory of stochastic processes. The results of numerical calculations of λ and $\text{tg}\varphi$ are performed and analyzed for the VL11M6 and VL8 electric locomotives, as well as for the EPL2T multiple-unit train, which operate in the Prydniprovsk railway. It was established, that the time dependences of $\lambda(t)$ and $(\text{tg}\varphi)(t)$ are stochastic processes with sharply changing characteristics. These dependences have stationary character in the separate phases of regenerative braking. In case of a total time of trip they have a non-stationary character. The results of probabilistic and statistical analyses show that the statistical distributions of $\text{tg}\varphi$ are close to the Gaussian's Law. At the same time the distributions of random quantity of λ follow to a normal asymmetrical law with the dispersion function. The root-mean-square deviations of $\lambda(t)$ and $\text{tg}\varphi(t)$ have significant values, therefore the coefficients of λ are less than the normative values of 0,92...0,95 in the most phases of regenerative braking. The values of $\text{tg}\varphi$ exceed the allowable limit of 0,25. Analysis of the statistical distributions of λ and $\text{tg}\varphi$ for all types of electric rolling stock confirms an idea, that the coefficient $\text{tg}\varphi$ characterizes the "quality" of energy processes in a DC power system with greater precision than power coefficient λ .

Keywords: regenerative braking, power factor, stochastic process, electric locomotive.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*