

НЕПРОДУКТИВНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЯГОВОМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННІ СИСТЕМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Викладено результати досліджень, що вказують на споживання неактивної (реактивної за Фрізе) потужності в системі електричної тяги постійного струму. Показано, що таке споживання призводить до значних додаткових втрат електроенергії в системі.

Изложены результаты исследований, указывающие на потребление неактивной (реактивной по Фризе) мощности в системе электрической тяги постоянного тока. Показано, что такое потребление приводит к значительным дополнительным потерям электроэнергии в системе.

The research results specifying to the consumption of inactive (reactive by Fryze) power in a DC system of electric propulsion are stated in the article. It is shown that this consumption brings to considerable additional losses of electric energy in the system.

Вступ

Передача повної потужності від тягової підстанції (ТП) до електрорухомого складу (ЕРС) супроводжується втратою частини потужності в тяговій мережі та елементах ТП. До теперішнього часу проводилася оцінка лише загальних сумарних (які називають технологічними) втрат електроенергії [1 – 7]. І якщо такий підхід цілком виправданий при розрахунках нових систем електропостачання та при уточненні навантажень, що живлять лінії електропередач, то при оцінюванні якості організації та контролю існуючого тягового електропостачання та електроспоживання він є відверто недостатнім. Це обумовлено тим, що усі технологічні втрати слід розподіляти на основні (продуктивні) та додаткові (непродуктивні). Основні втрати обумовлені передачею активної енергії в електрорухомий склад і вони мають бути зменшені до оптимального рівня, під яким розуміють такі їх значення, за яких не існує економічно виправданих способів їх подальшого зниження. Непродуктивні втрати пов'язані з неякісною електричною енергією, з характером електроспоживання та викликані: перетіканнями реактивної потужності та потужності спотворення, а також некорисною циркуляцією (обміном) енергії між ТП та ЕРС, і вони мають бути знижені до мінімуму.

Теоретичні передумови

З проблемою знаходження непродуктивних втрат електроенергії тісно пов'язані питання оцінки реактивної потужності. Загальновідома

[8] неоднозначність поняття та визначення реактивної потужності для кіл несинусоїдного струму, якими і є тягові мережі. Однак всі дослідники мають єдину думку [8 – 10], що з точки зору проблеми визначення втрат потужності як в усталених, так і в перехідних режимах роботи системи найбільш правильною та ефективною є концепція С. Фрізе [11]. С. Фрізе запропонував будь-який споживач зі струмом $i(t)$ довільної форми представляти паралельним з'єднанням резистивного елемента R , що відображає споживану активну електроенергію, та реактивного елемента X , що характеризує споживання неактивних складових потужності: реактивної потужності та потужності спотворення (рис. 1).

Вважається, що у вітці з елементом R протікає активна складова струму $i_a(t)$, яка співпадає за формою з прикладеною до споживача напругою $u(t)$. По елементу X протікає реактивна складова струму $i_p(t)$, що ортогональна до напруги $u(t)$. Тоді для довільного інтервалу часу $[0 \dots \tau]$ струм $i(t)$ можна представити сумою:

$$i(t) = i_a(t) + i_p(t), \quad (1)$$

де

$$i_a(t) = \frac{P}{U^2} \cdot u(t), \quad (2)$$

$$i_p(t) = i(t) - \frac{P}{U^2} \cdot u(t). \quad (3)$$

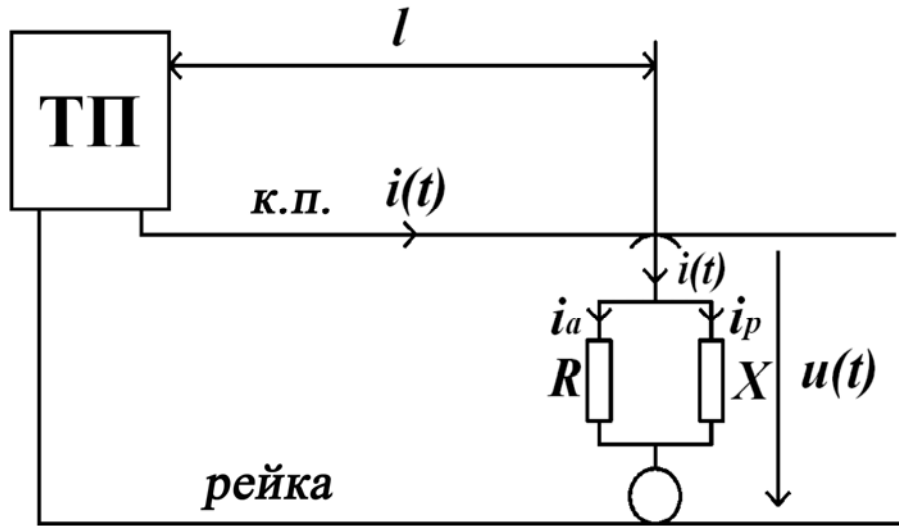


Рис. 1

Оскільки $i_a(t)$ та $i_p(t)$ є ортогональними функціями, то для квадрата діючого значення I^2 повного струму $i(t)$ справедливе співвідношення

$$I^2 = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} i^2(t) dt = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} i_a^2(t) dt + \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} i_p^2(t) dt = I_a^2 + I_p^2. \quad (4)$$

Тоді продуктивні (основні) втрати потужності в тяговій мережі при її передачі за довільний інтервал часу τ визначаються як

$$\Delta P_o = R_e \cdot I_a^2 = \frac{P^2}{U^2} \cdot R_e, \quad (5)$$

а непродуктивні (додаткові)

$$\Delta P_d = R_e \cdot I_p^2 = \frac{Q_{\phi}^2}{U^2} \cdot R_e, \quad (6)$$

де U – діюче за інтервал τ значення напруги на струмоприймачі ЕРС;

R_e – сумарний еквівалентний активний опір тягової мережі;

Q_{ϕ} – неактивна складова повної потужності або реактивна потужність за С. Фрізе, що споживається ЕРС і визначається за відомою формулою [12]:

$$Q_{\phi} = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (7)$$

Оскільки напруга на струмоприймачі $u(t)$ і тяговий струм $i(t)$ ЕРС (рис. 2) є випадковими

функціями, то активну P і повну S потужності ЕРС в (7) можливо визначати двома методами. Перший базується на поняттях теорії випадкових процесів і теоретичної електротехніки, згідно з якими активна потужність P дорівнює взаємній кореляційній функції K_{ui} напруги і струму при часовому зсуві рівному нулю, тобто при $t = t'$:

$$P = K_{ui}(t, t) = M[u(t) i(t)]. \quad (8)$$

А з відомої властивості взаємної кореляційної функції, що

$$|K_{ui}(t, t')| \leq \sqrt{K_u(t, t) \cdot K_i(t, t)},$$

впливає вираз для повної потужності

$$S = \sqrt{K_u(t, t) \cdot K_i(t, t)}, \quad (9)$$

де $K_u(t, t)$, $K_i(t, t)$ – автокореляційні функції напруги та струму.

Відповідно до другого методу, активну потужність ЕРС визначають виходячи з існуючого загального поняття, що активна потужність дорівнює середньому арифметичному значенню за період миттєвої потужності $p(t)$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt. \quad (10)$$

Виходячи з того, що $u(t)$ та $i(t)$ – неперіодичні випадкові функції, знайдемо P як середнє арифметичне суми дискретних миттєвих

значень миттєвої потужності за час ведення поїзда (чи поїздки) на даній ділянці:

$$P = \frac{\sum_{k=1}^n p_k}{n} = \frac{\sum_{k=1}^n u_k i_k}{n}. \quad (11)$$

Повну потужність S визначимо універсальною формулою

$$S = UI, \quad (12)$$

де U, I – діючі значення реалізацій напруги та струму за час поїздки:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n u_k^2}{n}}, \quad I = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n i_k^2}{n}}, \quad (13)$$

де в (11) та (13) p_k, u_k, i_k – дискретні значення миттєвої потужності, напруги та струму в довільний момент часу t_k поїздки (рис. 2); n – загальна кількість точок дискретизації реалізацій випадкових функцій $p(t), u(t), i(t)$.

Результати та аналіз числових розрахунків

Кількісна оцінка втрат потужності за наведеними вище виразами була виконана як приклад для даних (рис. 3) фідерних напруги (a) і струму (b), їх кореляційних функцій (c, d), а також миттєвої реактивної потужності (d) однієї із ділянок Придніпровської залізниці; результати розрахунків надано в табл. 1. При цьому значення потужностей S, P та Q_ϕ для трьох поїздок взято із роботи [13]. Еквівалентний опір R_ϕ тягової мережі і елементів ТП склав: 0,4379 Ом при $l = 5$ км; 0,7268 Ом – 10 км та 1,0157 Ом – 15 км. Діюче значення напруги U на струмоприймачі при відповідних значеннях l дорівнювало (В): 3480; 3260 і 3050.

Із табл. 1 випливає наступне:

- непродуктивні втрати потужності у тяговій мережі та в елементах ТП в залежності від відстані знаходження електровоза складають від 5 до 20 % відносно активної потужності ЕРС і від 28 до 35 % відносно сумарних втрат.

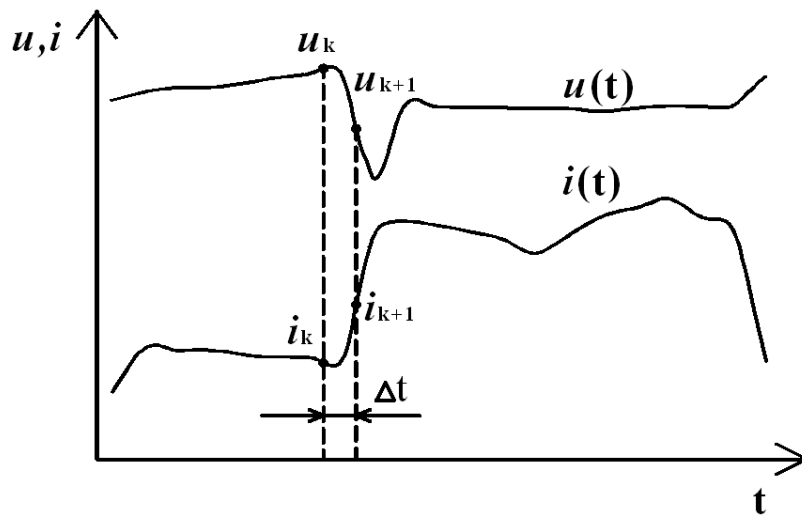


Рис. 2

Таблиця 1

№ поїздки	Потужності			Додаткові (непродуктивні) втрати, $\Delta P_d, 10^3$, Вт, при:			Основні втрати ΔP_o при $l = 10$ км, 10^3 , Вт
	$S, 10^6$, ВА	$P, 10^6$, Вт	$Q_\phi, 10^6$, вар	$l = 5$ км	$l = 10$ км	$l = 15$ км	
1	4,565	3,723	2,628	249,87	471,70	756,56	946,75
2	4,316	3,640	2,297	190,90	360,39	577,98	905,00
3	2,330	1,802	1,436	74,61	140,85	225,89	221,80

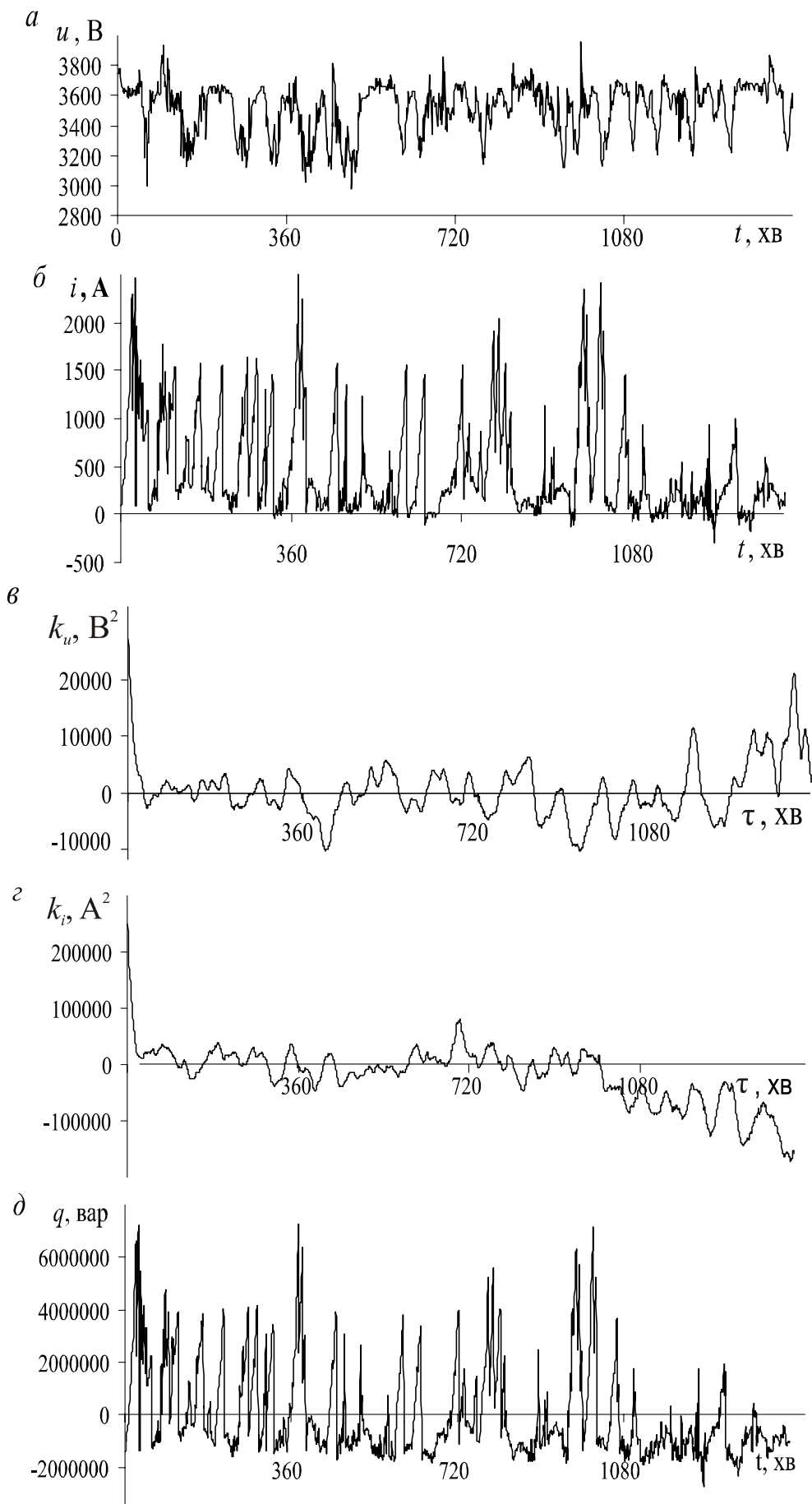


Рис. 3

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Крестьянов, М. Е. К определению потерь электрической энергии в тяговой сети [Текст] / М. Е. Крестьянов, А. Н. Кувичинский // Тр. МИИТа. – М., 1971. – Вып. 380. – С. 3-12.
2. Манусов, Ю. Б. Экспериментально-расчетное определение потерь мощности в устройствах тягового электроснабжения двухпутных участков постоянного тока [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук / Ю. Б. Манусов. – Д., 1975. – 156 с.
3. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 582 с.
4. Мамошин, Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / Р. Р. Мамошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.
5. Бардушко, В. Д. Анализ и параметрический синтез систем тягового электроснабжения [Текст] : дисс. ... докт. техн. наук / В. Д. Бардушко. – Иркутск, 2001. – С. 133-154.
6. Сербиненко, Д. В. Качество электрической энергии и степень взаимного влияния тяговых подстанций железных дорог постоянного тока и системы внешнего электроснабжения [Текст] : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Д. В. Сербиненко. – М., 2003. – 24 с.
7. Кузнецов, В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог [Текст] / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 18. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 34-37.
8. Тонкаль, В. Е. Баланс энергии в электрических цепях [Текст] / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
9. Жежеленко, И. В. Современная концепция реактивной мощности [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. – Мариуполь, 1995. – Вып. 1. – С. 192-197.
10. Домнин, И. Ф. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники [Текст] / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2004. – Ч. 1. – С. 80-91.
11. Fryze, S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinustormigen Verlauf von Strom und Spannung // Elektrotechn. Z. – 1932. Т. 25. – S. 596-599; Т. 26. – S. 625-627; Т. 29. – S. 700-702.
12. Костин, Н. А. Неактивная мощность и дополнительные потери электроэнергии в электроподвижном составе постоянного тока [Текст] / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганск, 2007. – № 8 (114). – С. 49-53.
13. Саблін, О. І. Підвищення ефективності електроспоживання електрорухомого складу постійного струму [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / О. І. Саблін. – Д., 2009. – 21 с.

Надійшла до редколегії 01.12.2009.

Прийнята до руко 23.12.2009.