

*Н. А. Костин, д-р техн. наук, О. Г. Шейкина, канд. техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна)*

ПРИЗНАКИ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Постановка задачи

Проблема электросбережения, которая непосредственно связана с оценкой качества и баланса электроэнергии в устройствах и системах, неотъемлема от анализа составляющих полной мощности их электрических цепей и, прежде всего, от определения неактивной мощности. Системы электрического транспорта в этой проблеме не являются исключением.

Магистральный и пригородный, шахтный и карьерный железнодорожный, а также городской электрический транспорт Украины эксплуатируются на постоянном токе. Электровозы, электропоезда, мотор-вагоны метрополитенов, трамваи и троллейбусы питаются постоянным (выпрямленным) напряжением. При этом традиционно, до настоящего времени, считается, что в таких системах неактивная мощность отсутствует, понятие коэффициента мощности к ним не применяется, и поэтому электропотребление определяют лишь по расходу активной энергии. Ошибочность таких подходов, по нашему мнению, связана с тем, что не учитываются фактически существующие непрерывные изменения постоянных тягового тока $i(t)$ и питающего напряжения $u(t)$ [1, 2]. Такие изменения носят непериодический случайный характер и зависят от многих факторов.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы, является, во-первых, указать на специфику существующей проблемы, затрагивающей вопросы электротранспорта. Во-вторых, обсудить признаки наличия неактивной составляющей мощности в рассматриваемых системах.

Методика и приборы экспериментальных исследований

В этой работе для оценки составляющих полной мощности выполнены экспериментальные исследования в реальных условиях эксплуатации: фидерных напряжения и тока на тяговых подстанциях (ТП) «Письменная» Приднепровской железной дороги; тяговых тока и напряжения на электровозе ВЛ8, а также на трамвае с реостатным пуском.

Для получения временных зависимостей мгновенных величин выпрямленного напряжения и тока на выходе ТП «Письменная» использовали осциллографический прибор С1-93, а для записи временной зависимости огибающей кривой регистрограмм выпрямленного напряжения ТП - ампервольтметр самописный переносной типа НЗ39 № 01280. Были записаны и обработаны по 20 суточных реализаций фидерных напряжения и тока.

Регистрограммы токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$ электровоза получали на действующем участке Нижнеднепровск-Узел-Чаплино Приднепровской железной дороги. В процессе реальной эксплуатации электровоза ВЛ8 было снято 20 реализаций $u(t)$ и $i(t)$. Кроме того, было получено 15 реализаций для трамваев типа Т-3, которые эксплуатируются на городских маршрутах. Длительность реализаций для ВЛ8 составила ~ 70 мин, для трамваев ~ 30 мин. Реализации на ВЛ8 фиксировали с помощью микропроцессорной системы. Напряжение и ток трамвая измеряли путем подключения персонального компьютера к его контрольно-измерительной бортовой системе.

Методы определения признаков неактивной мощности

Основные признаки наличия неактивной мощности в электрических цепях устанавливаются рядом методов [3-6], основные из которых следующие: метод мгновенных мощностей, интегральный и классический методы. Рассмотрим каждый из них.

Метод мгновенных мощностей

Наиболее полную информацию об энергетических процессах в цепи с произвольной формой изменения напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ содержит мгновенная мощность, как реальная физическая величина. Перемножив функции мгновенного напряжения и тока, получим мгновенную мощность, которую можно представить в виде суммы трех составляющих [3, 4]

$$p(t) = u(t)i(t) = p_a(t) + q(t) + p_n(t), \quad (1)$$

где $p_a(t)$ – активная составляющая, обусловленная взаимодействием одноименных гармоник тока и напряжения и определяемая по выражению

$$p_a(t) = \sum_{l,m=k} U^{(l)} I^{(m)} \cos(\psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)}) \left(1 - \cos 2(k\omega t - \varphi^{(k)})\right); \quad (2)$$

$q(t)$ – реактивная составляющая, также обусловленная взаимодействием одноименных гармоник тока и напряжения, определяется как

$$q(t) = \sum_{l,m=k} U^{(l)} I^{(m)} \sin(\psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)}) \sin 2(k\omega t - \varphi^{(k)}); \quad (3)$$

$p_{\text{и}}(t)$ – искажающая составляющая мгновенной мощности, вызванная наличием и взаимодействием гармоник тока и напряжения различных частот:

$$p_{\text{и}}(t) = \sum_{l \neq m} U^{(l)} I^{(m)} \left\{ \cos \left[(m-l)\omega t + \psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)} \right] - \cos \left[(l+m)\omega t - \psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)} \right] \right\} + \\ + \sum_{l \neq m} U^{(m)} I^{(l)} \left\{ \cos \left[(m-l)\omega t + \psi_u^{(m)} - \psi_i^{(l)} \right] - \cos \left[(l+m)\omega t - \psi_u^{(m)} - \psi_i^{(l)} \right] \right\}. \quad (4)$$

Признаком наличия мгновенной реактивной мощности $q(t)$ в системах электротранспорта постоянного тока, согласно выражению (3), является неравенство вида $(\psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)}) \neq 0$, где $l = m$, т. е., неравенство нулю разности начальных фаз между одноименными гармониками напряжения на токоприемнике $u(t)$ и тягового тока $i(t)$. Признаком наличия мгновенной мощности искажения $p_{\text{и}}(t)$, согласно (4), является существование в спектрах напряжения и тягового тока гармоник разноименных частот, т. е. эта мощность возникает при наличии в спектре тока гармоник, отсутствующих в спектре напряжения или наоборот, причем $(\psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)}) \neq 0$, где $l \neq m$, или наличии непропорциональности одноименных гармоник (спектров) $u(t)$ и $i(t)$.

Рассмотрим перечисленные условия наличия неактивной мощности по первому методу на примере трамвая Т-3 с реостатным пуском (рис. 1). Как вытекает из рис. 1, б и в, амплитудные спектры напряжения и тока не являются пропорциональными, что связано с искажением формы тока по отношению к форме напряжения. Также видно, что в одном из спектров существуют гармоники, отсутствующие в другом спектре, что в свою очередь указывает на искажающий характер электрической цепи трамвая как нагрузки. Из рис. 1, г следует неравенство нулю фазовых сдвигов между многими гармониками тока и напряжения.

Интегральный метод

Этот метод впервые был предложен О.А. Маевским [5]. При анализе электромагнитных процессов в нелинейных электрических цепях, приводящих к появлению реактивной мощности, им было показано, что классическое понятие реактивной мощности для линейных цепей, характеризующее колеблющуюся энергию между источником и реактивной нагрузкой, неприемлемо для цепей с нелинейными элементами, сопротивление которых может быть подвержено различным изменениям. Поэтому было предложено в нелинейной цепи выражать так называемую приведенную реактивную мощность $Q_{\text{п}}$ через интегральные величины произведений одной электрической величины на скорость изменения другой:

$$Q_{\text{п}} = \frac{1}{\omega_{\text{п}} T} \int_0^T u(t) \frac{di(t)}{dt} dt = \frac{1}{2\omega_{\text{п}} T} \int_0^T u^2(t) \frac{dy(t)}{dt} dt; \quad (5)$$

$$Q_{\text{п}} = \frac{-1}{\omega_{\text{п}} T} \int_0^T i(t) \frac{du(t)}{dt} dt = \frac{-1}{2\omega_{\text{п}} T} \int_0^T i^2(t) \frac{dz(t)}{dt} dt, \quad (6)$$

где $z(t) = u(t)/i(t)$ и $y(t) = i(t)/u(t)$ – соответственно мгновенное полное сопротивление и проводимость элемента или участка цепи; ω_{Π} – частота приведения.

В формулах (5) и (6) знак «минус» соответствует генерированию реактивной мощности, а «плюс» – ее потреблению.

Величина приведенной реактивной мощности Q_{Π} в выражениях (5) и (6) представляет собой среднее значение, очевидно, определенной мгновенной реактивной мощности, которую обозначим через $q_{\Pi}(t)$ и назовем мгновенной мощностью по Маевскому. Функция $q_{\Pi}(t)$ не что иное, как подынтегральные выражения в (5) и (6).

Выражения (5) и (6) интегрального метода позволяют выделить такие два признака (необходимый и достаточный) потребления неактивной мощности [5]:

1) мгновенное полное сопротивление (или проводимость) электрической цепи (потребителя) изменяется во времени, что наблюдается тогда, когда между мгновенными значениями напряжения и тока нет прямой пропорциональности, т.е. $z(t) \neq \text{const}$, или $dz(t)/dt \neq 0$ (необходимое условие);

2) среднее за промежуток времени T значение произведения скорости изменения мгновенного сопротивления $dz(t)/dt$ (или проводимости) на квадрат мгновенного тока $i^2(t)$ (напряжения) не равно нулю (достаточное условие).

Например, мгновенное полное сопротивление $z(t) = u(t)/i(t)$ силовых цепей трамвая (рис. 2, а) и фидера ТП (рис. 3, б) претерпевает значительные колебания с течением времени, а произведение производной мгновенного сопротивления по времени на квадрат мгновенного тягового тока $\left[\frac{dz(t)}{dt} i^2(t)\right]$ трамвая за рассматриваемый промежуток времени (рис. 2, б) не равно нулю.

Классический метод

Как известно из курса теоретической электротехники [6], между активной и реактивной мощностями в простейшем случае (для линейной цепи синусоидального тока) существует соотношение:

$P^2 + Q^2 = S^2$, где S – полная мощность, которая представляет собой максимальную активную мощность P , которую можно получить от источника в цепи при заданных действующих значениях напряжения U и тока I :

$$S = UI = \sqrt{\sum_l U^{(l)2}} \sqrt{\sum_m I^{(m)2}}.$$

Для определения ущерба от реактивной мощности в электрических цепях с периодическими несинусоидальными токами и напряжениями С. Фризе [7] предложил (по аналогии с синусоидальными токами и напряжениями) разложить квадрат полной мощности на сумму квадратов активной (эффективной) P и пассивной (фиктивной) F мощностей: $S^2 = P^2 + F^2$.

Фиктивную мощность F часто называют реактивной мощностью по Фризе и обозначают Q_F , ее среднее значение за период равно нулю и физически она представляет собой энергию в единицу времени, колеблющуюся между источником и потребителем, или же является той частью полной мощности, которая не передана в нагрузку в результате процесса потребления. Реактивная мощность Фризе является наиболее полной и эффективной из рассмотренных мощностей при определении непроизводительных потерь при передаче электроэнергии как в установившихся, так и в переходных режимах работы потребителей.

Автор работы [8] К. Будян, разложил фиктивную мощность F на две составляющие – реактивную Q и искажающую D :

$$F^2 = Q^2 + D^2, \quad (7)$$

в котором реактивную мощность определил в виде интегральной величины

$$Q = Q_B = \sum_{l,m=k} U^{(l)} I^{(m)} \sin(\psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)}), \quad (8)$$

где Q_B – иногда используемое обозначение мощности по Будяну.

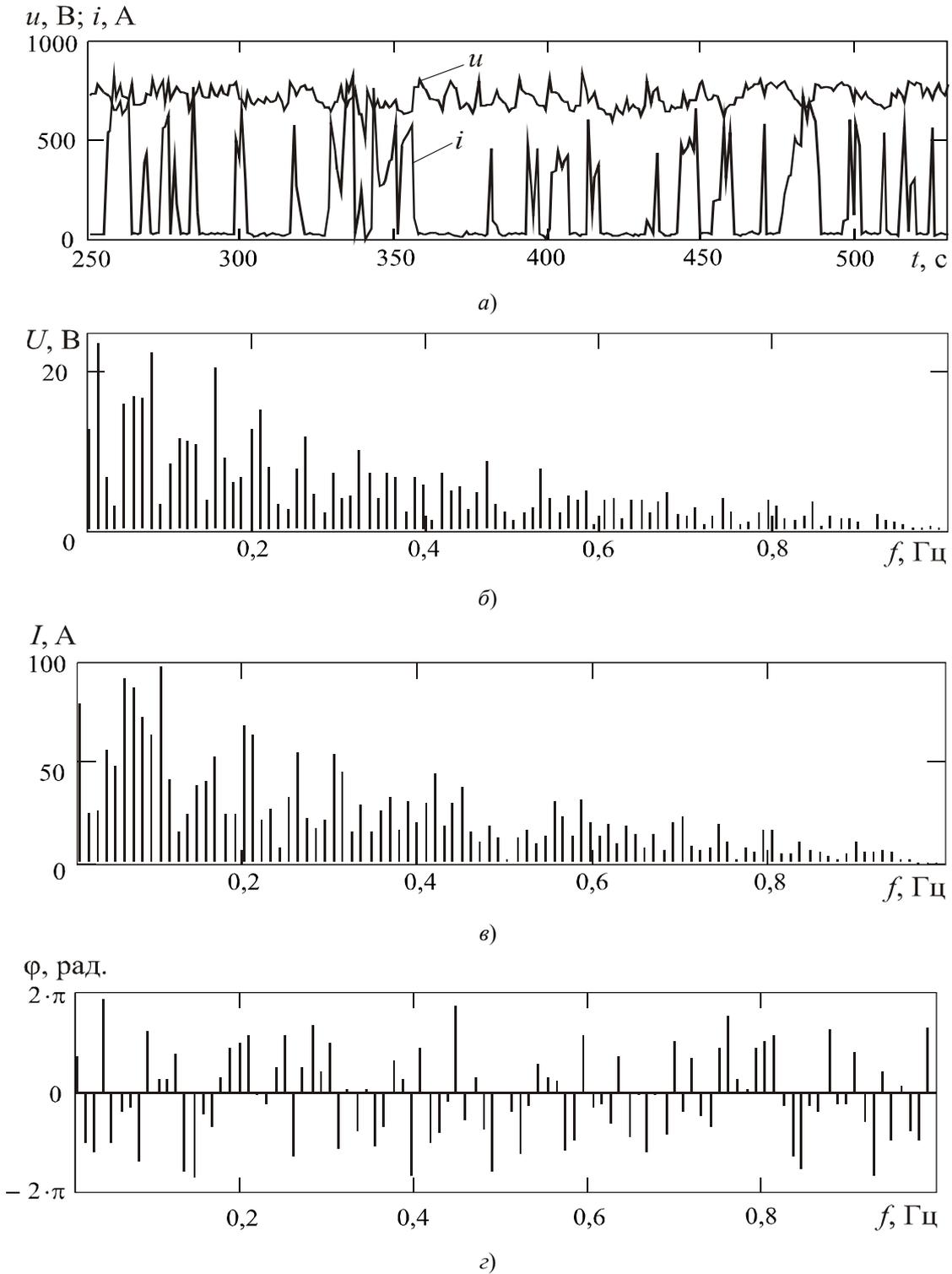


Рис. 1. Регистрограммы (реализации) напряжения на токоприемнике $u(t)$ и тягового тока $i(t)$ трамвая (a); амплитудного спектра реализации $u(t)$ (б); амплитудный спектр реализации $i(t)$ (в); спектр разности начальных фаз соответственно $u(t)$ и $i(t)$ (г).

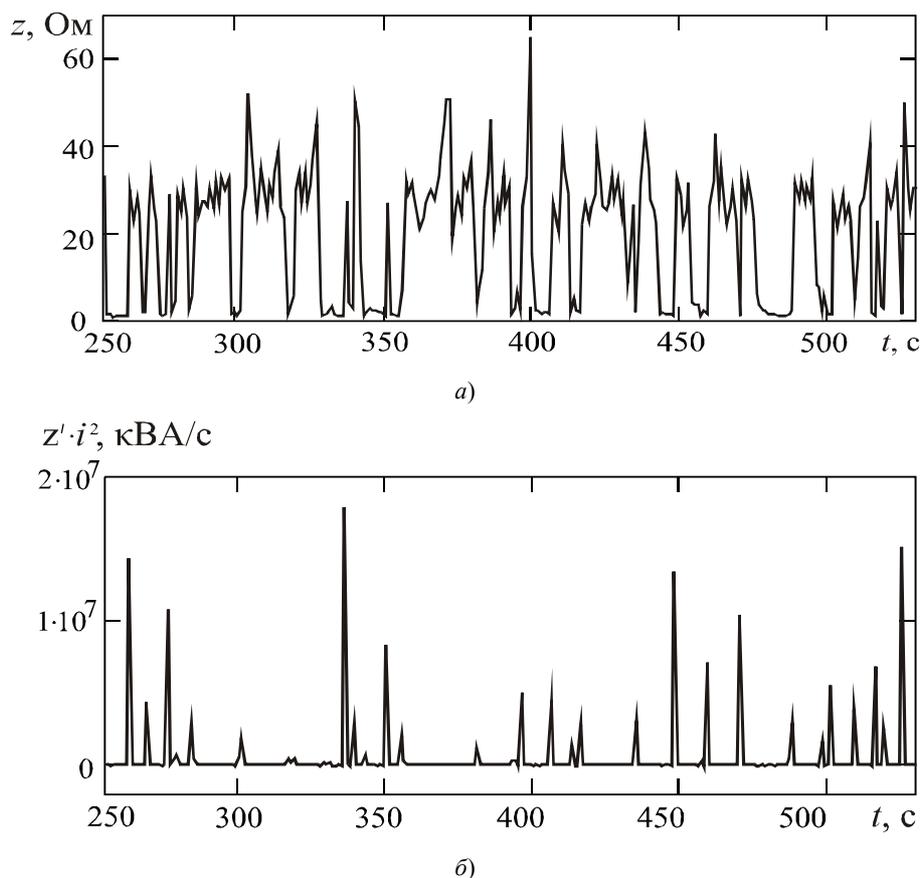


Рис. 2. Графики изменения мгновенного сопротивления $z(t)$ силовой цепи трамвая (а) и произведения скорости изменения мгновенного сопротивления $z'(t)$ на квадрат мгновенного тока (б).

Из выражений (7) и (8) вытекает, что физический смысл имеет только активная мощность P , а неактивная, в совокупности названная Фризе пассивной (фиктивной) мощностью, имеет четыре составляющие: реактивную в классическом понимании; мощность искажения и мощность несимметрии (в 3-фазных цепях).

Согласно классическому методу [5] признаком потребления электрической цепью неактивной мощности является неравенство активной P и полной S мощностей (и, как следствие, значение коэффициента мощности λ меньше единицы). На интервале времени реализаций $u(t)$ и $i(t)$, приведенных на рис. 2 и 3, значения активной и полной мощностей за рассматриваемый период времени составили: для трамвая $P = 125,9$ кВт, $S = 208,1$ кВА, $\lambda = 0,602$; для фидера ТП «Письменная» $P = 1450$ кВт, $S = 2151$ кВА, $\lambda = 0,674$ т.е. признаки классического метода удовлетворяются.

Таким образом, наиболее общими признаками потребления силовой тяговой электрической цепью устройства электротранспорта постоянного тока неактивной мощности являются [3, 4]:

- несовпадение значений активной P и полной S мощностей (значения коэффициента мощности меньше единицы);
- изменение во времени значения мгновенного полного сопротивления $z(t)$ (или проводимости $y(t)$) устройства;
- наличие режима возврата электроэнергии из нагрузки электроподвижного состава (ЭПС) в систему тягового электроснабжения (признак и следствие).

Первые два признака, которые выполняются, проанализированы выше. Третий признак – наличие режима возврата электроэнергии из нагрузки в источник – для линейных цепей синусоидального тока оценивают, как известно, по характеру изменения знака мгновенной мощности $p(t)$: если $p(t) > 0$, то возврат электроэнергии отсутствует. Из рис. 3, z вытекает, что мгновенная мощность $p(t) > 0$, т. е., как будто обменные энергопроцессы отсутствуют. Однако, как известно [5], в нелинейных цепях, какими являются цепи электротранспорта, неактивная мощность может возникать как и при $p(t) > 0$, так и при отсутствии накопителей электромагнитной энергии. Тем более, что силовые цепи ЭПС постоянного тока имеют мощные нелинейные реактивные элементы. Обнаруженное несоответствие знака мгновенной

мощности и наличие неактивной мощности в системах электротранспорта постоянного тока свидетельствует о том, что такой подход (по знаку мгновенной мощности) к оценке обменных процессов в нелинейных цепях несинусоидального, тем более случайного, тока неправилен [9]. Очевидно, наиболее (если не единственно) возможны те методы, которые позволяют находить неактивную мощность исходя из мгновенных значений случайных функций напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$, т. е. необходимо рассмотрение собственно мгновенной реактивной мощности $q(t)$ [9].

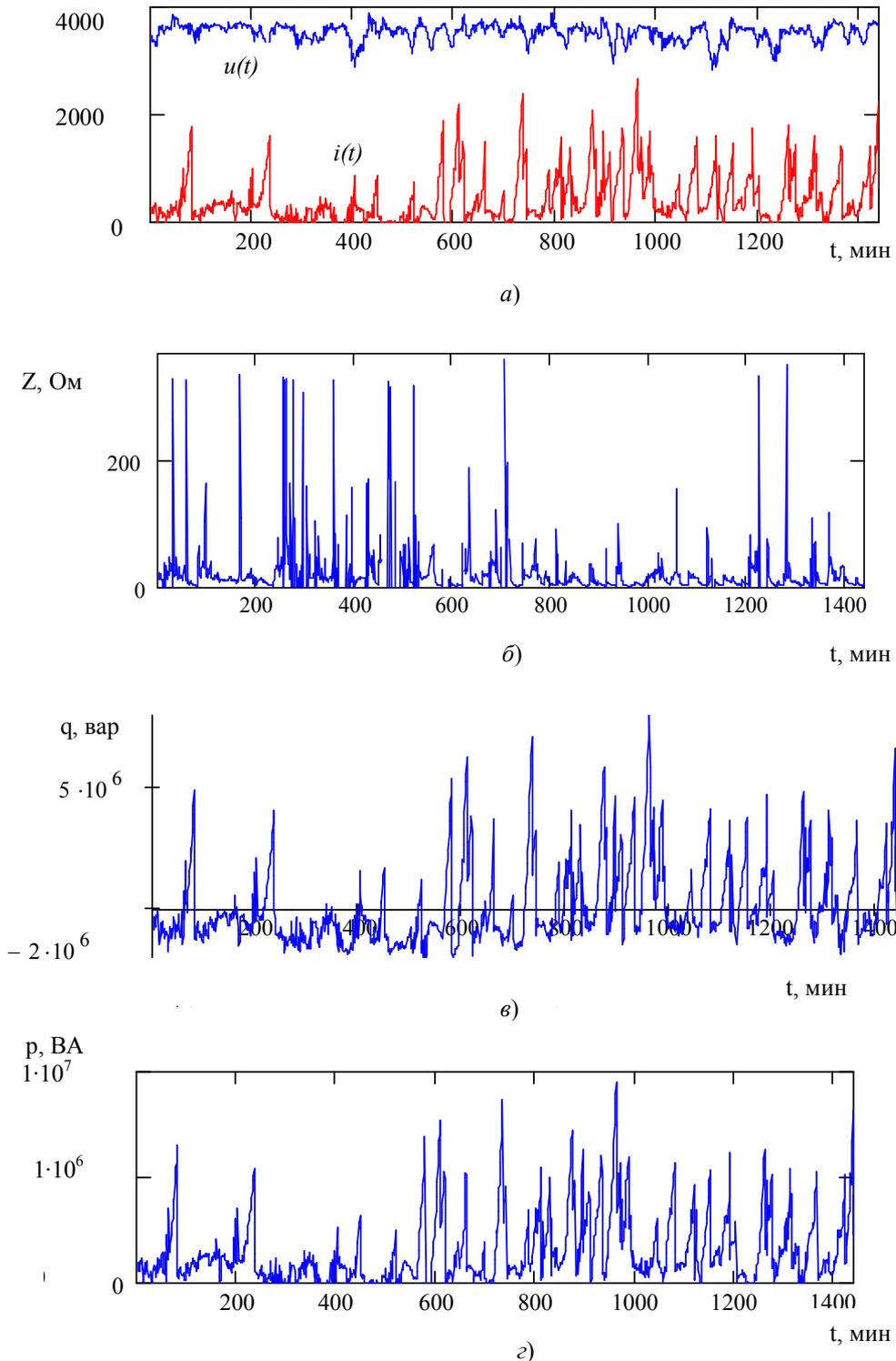


Рис. 3. Графики изменения напряжения и тока (а), мгновенного сопротивления (б), мгновенной реактивной мощности (в) и мгновенной мощности (г) фидера тяговой подстанции «Письменная» на протяжении суток.

Переменный по направлению характер изменения величины $q(t)$, например, для фидера ТП (рис. 3, в) свидетельствует о том, что между фидером ТП и электровозом, с одной стороны, и электровозом (как потребителем) и контактной сетью (как источником), с другой стороны, возможен обмен электромагнитной энергией.

В результате силовые цепи подсистем электротранспорта могут загружаться реактивным током, вследствие чего возникают дополнительные потери активной мощности в активных элементах тяговой цепи. Обменные процессы отсутствуют только в том случае, если $q(t) = 0$ в течение всего времени потребления электроэнергии.

Выводы

1. Нелинейные параметрические тяговые цепи систем электрического транспорта, имея название (по роду питающего напряжения) цепей постоянного тока, фактически являются нелинейными цепями переменного тока, что обусловлено существующими в условиях реальной эксплуатации непрерывными изменениями во времени тяговых тока и напряжения.

2. Основные признаки наличия неактивной мощности в тяговых электрических цепях систем электротранспорта постоянного тока в полной мере устанавливаются тремя методами: мгновенной мощности, интегральным и классическим.

3. Наиболее общими признаками потребления неактивной мощности являются: неравенство активной и полной мощностей; изменение во времени значения мгновенного сопротивления (или проводимости) устройства; наличие режима возврата электроэнергии из нагрузки ЭПС в систему тягового электроснабжения.

4. Силовые тяговые электрические цепи устройств электротранспорта постоянного тока обладают всеми тремя признаками потребления неактивной мощности.

Список литературы

1. Костин, Н. А. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги [Текст] / Н. А. Костин, А. В. Петров // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПСЕ – 2011». – 2011. – Ч. 3. – С. 53-59.

2. Костин, Н. А. Неканоническое спектральное разложение случайных функций тяговых напряжения и тока в системах электрического транспорта [Текст] / Н. А. Костин, О. Г. Шейкина // Електротехніка і Електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 68-71.

3. Новосельцев, А. В. Определение составляющих полной мощности в однофазных электрических цепях на основе классического метода и метода гипотетических составляющих [Текст] / А. В. Новосельцев, М. Т. Стрелков. – К., ИЭД, 1986. – 63 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т электродинамики).

4. Новосельцев, А. В. Определение составляющих полной мощности в однофазных электрических цепях на основе интегрального, спектрального и статистического методов [Текст] / А. В. Новосельцев, М. Т. Стрелков. – К., ИЭД, 1986. – 59 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т электродинамики).

5. Маевский, О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей [Текст]: монография / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

6. Теоретичні основи електротехніки. [Текст]: підручник в 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – Т.1. – 336 с.

7. Fryze, S. Wirk – Blind – und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // Elektrotechn. Z., 1932. – 25. – S. 596-599; 26. – S. 625-627; 29. – S. 700-702.

8. Budeany, C. Probleme de la presence der puissances reactives dans les installation de production et distribution d'energie / C. Budeany // Rap. Et discuss. Sur la puissance reactive, 1929. – Pt. 3. – P. 117-218.

9. Саєнко, Ю. Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.09.05 / Ю. Л. Саєнко; Нац. ун-т «Львів. політехн.». – Львів, 2003. – 36 с.