

**Н.А. Костин, д-р техн. наук, О.И. Саблин, канд. техн. наук**

(Украина, Днепрпетровск, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

## ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ АКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Анализ неперiodических энергопроцессов, протекающих в тяговых цепях электроподвижного состава (ЭПС) электротранспорта постоянного тока осложняется резкопеременным нестационарным режимом электропотребления, который характеризуется непрерывными искажениями напряжения на токоприемнике и тягового тока. В связи с этим однозначно описать процесс электропотребления интегральными характеристиками, например, такими как активная мощность, в указанных цепях весьма сложно, о чем и свидетельствует отсутствие практических методов их расчета [1]. Применение классических выражений теоретической электротехники для расчета активной мощности, потребляемой силовыми цепями ЭПС в рассматриваемых тяговых режимах, и получаемые результаты порой вступают в противоречие с существующими представлениями о процессе электропотребления. В частности, при несинусоидальной форме входных напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$  нагрузки классическое выражение

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P^{(k)} = \sum_{k=0}^{\infty} U^{(k)} I^{(k)} \cos \varphi^{(k)}, \quad (1)$$

определяющее передаваемую или потребляемую активную мощность в виде суммы активных мощностей от взаимодействия одноименных гармоник напряжения и тока на соответствующих частотах, всегда является величиной положительной ( $P \geq 0$ ), что выражает процесс необратимого преобразования электрической энергии в другие виды. Кроме этого, каждое из слагаемых активной мощности в выражении (1) также всегда положительно ( $P^{(k)} \geq 0$ ), поскольку для линейных и нелинейных электрических цепей в стационарных режимах работы фазовый сдвиг  $\varphi^{(k)}$  между  $k$ -ми гармониками напряжения и тока находится в интервале  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , для которого  $\cos \varphi^{(k)} \geq 0$ . Электрических цепей, в которых сдвиг фаз между одноименными гармониками напряжения и тока выходит за указанные пределы, в классической электротехнике не существует [2].

Однако известно [3], что при работе резкопеременных искажающих потребителей электроэнергии, установившиеся режимы у которых крайне непродолжительны, на некоторых частотах фазовый сдвиг между одноименными гармониками напряжения и тока нагрузки может выходить за указанные границы, что соответственно приведет к появлению отрицательной активной мощности на данной частоте. Примером такой нагрузки может быть тяговая нагрузка.

В спектрах напряжения на токоприемнике и потребляемого тока ЭПС постоянного тока содержится как постоянная, так и переменная составляющие, где последняя обладает ~ 20 % энергии всего спектра, т.е. существенна. Поэтому необходимо анализировать величину и знак активной мощности ЭПС на отдельных частотах спектра потребляемой мощности, а также их влияние на дополнительные потери электроэнергии. Следует также отметить, что переменная составляющая напряжения и тока тяговых цепей ЭПС имеет вероятностный характер, обусловлена в основном необходимым режимом ведения поезда и сосредоточена в диапазоне частот 0,001...10 Гц. На рис. 1 в качестве примера приведены осциллограммы напряжения на токоприемнике  $u(t)$ , тягового тока  $i(t)$  и потребляемой мощности  $p(t) = u(t)i(t)$  трамвая типа Т-3 при работе на одном из участков линий горэлектротранспорта г. Днепропетровска.

При произвольном характере изменения напряжения и тока активная мощность за период электропотребления  $T$  определяется по известному выражению

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt, \quad (2)$$

которая всегда совпадает со значением активной мощности, вычисленной по формуле (1). Для данной (рис. 1) реализации процесса электропотребления активная мощность  $P$ , потребленная трамваем за время поездки, была определена

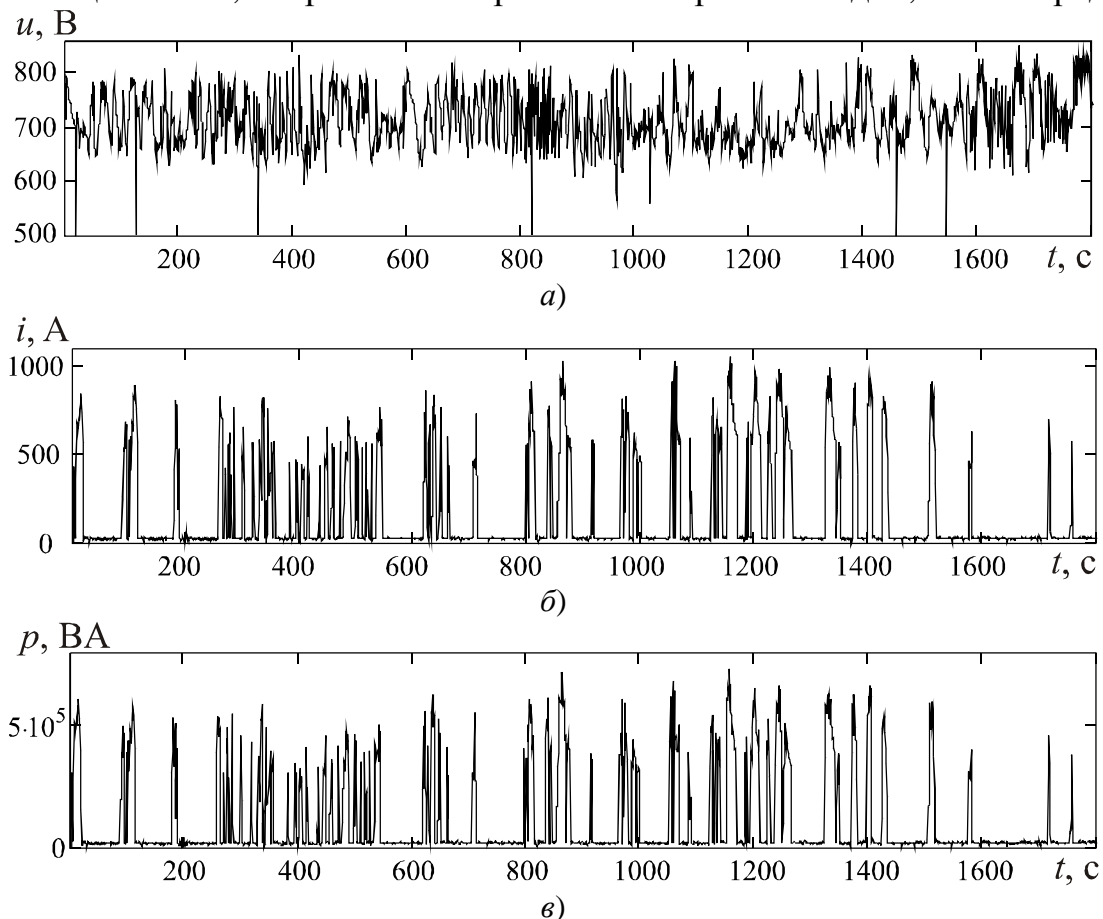


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на токоприемнике (а), тягового тока (б) и потребляемой мощности (в) реостатного трамвая постоянного тока

на основе мгновенных величин по формуле (2), а также по спектральному выражению (1) (после разложения величин  $u(t)$  и  $i(t)$  в ряд Фурье) и в обоих случаях составила 116,2 кВт. В этой величине мощность нулевой гармоники согласно выражению (1) составила 119,8 кВт, т.е. имеем, что  $P^{(0)} = P_{cp} > P$  – активная мощность постоянной составляющей  $P^{(0)}$  больше активной мощности  $P$  всего спектра. Это значит, что сумма активных мощностей гармоник (переменной составляющей спектра) отрицательна:  $\sum_{k=1}^{\infty} P^{(k)} = \sum_{k=1}^{\infty} U^{(k)} I^{(k)} \cos \varphi^{(k)} < 0$ . В

последнем выражении существуют как положительные слагаемые, так и отрицательные, однако последние преобладают. Действительно, для рассматриваемой реализации длительностью  $T = 1800$  с, ограничившись 100 гармониками с частотами  $f^{(k)} = kT^{-1}$ ,  $\sum_{k=1}^{100} P^{(k)} = -3,6$  кВт, что составляет 3,5 % от всей потреб-

ленной трамваем за время поездки активной мощности  $P$ . Таким образом, на постоянной составляющей мгновенной мощности (на нулевой гармонике) ЭПС потребляет энергию, а на определенных частотах колебаний тока и напряжения рекуперировывает ее в питающую сеть. Обусловлено это случайным и до определенной степени несвязанным между собой изменением величин  $u(t)$  и  $i(t)$ , а также неидеальностью системы электроснабжения. Математически это можно объяснить следующим.

Рассмотрим процесс изменения величины потребляемого тока (рис. 1) реостатного трамвая Т-3 в пределах одного его колебания (рис. 2). При включении тяги трамвая, на интервале времени переходного процесса  $\Delta t_1$  происходит резкое увеличение тока  $i$  и вместе с тем резкое снижение напряжения  $u$  на его токоприемнике в результате возрастания падения напряжения в тяговой сети.

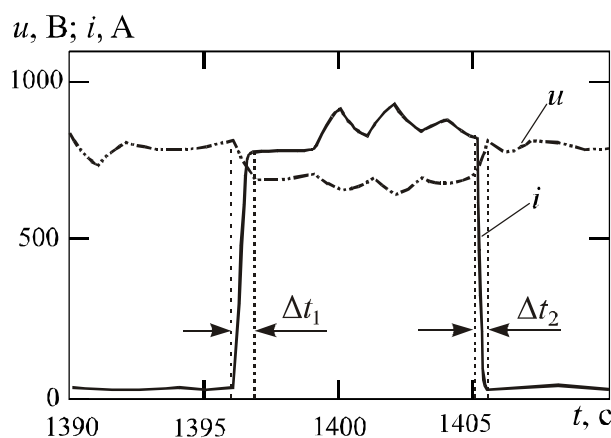


Рис. 2. Графики одного колебания тягового тока и напряжения на токоприемнике трамвая

В первые моменты выхода ЭПС в тяговый режим, как известно, полезная работа еще не совершается, а вся потребляемая энергия расходуется на накоп-

ление ее в магнитном поле индуктивностей силовой цепи. На участке  $\Delta t_2$  (время сброса – при контактной системе регулирования – время горения дуги) при выходе трамвая на холостой ход (выбег) тяговый ток спадает, а напряжение на токоприемнике возрастает, т.е. происходят постоянные взаимосвязанные искажения формы тягового тока и напряжения на токоприемнике ЭПС, для которого случайные функции  $i(t)$  и  $u(t)$  взаимно коррелированы таким образом, что любому возрастанию функции  $i(t)$ , как правило, соответствует убывание функции  $u(t)$  и наоборот, условно говоря, величины  $i(t)$  и  $u(t)$  находятся в противофазе. В результате разложения функций  $u(t)$  и  $i(t)$  в ряд Фурье получим в них одноименные гармоники, многие из которых будут смещены между собой на угол, выходящий за пределы  $[-90^\circ, 90^\circ]$ .

Таким образом, в нестационарных режимах электропотребления в реальных системах может наблюдаться отрицательная активная мощность, которая сосредоточена на определенных частотах колебаний  $u(t)$  и  $i(t)$  и составляет, как правило, несколько процентов от всей потребленной мощности. Физически это явление для ЭПС постоянного тока можно объяснить исходя из баланса энергий. При работе ЭПС на установившемся токе  $i_1$  приложенное к нему напряжение (на токоприемнике) полностью уравновешено противоЭДС тяговых электродвигателей, а также падением напряжения на двигателе, которое пренебрежимо мало по сравнению с противоЭДС, а в индуктивной силовой цепи ЭПС от протекающего тока накоплена электромагнитная энергия  $W_{M1} = L i_1^2 / 2$ . Включение в работу другого потребителя (единицы ЭПС) вызовет на токоприемнике первого ЭПС резкое кратковременное понижение напряжения и соответственно тяговый ток уменьшится с  $i_1$  до  $i_2$ , который способен поддерживать запас энергии в индуктивностях  $W_{M2} = L i_2^2 / 2 < W_{M1}$ . При этом энергия, накопленная в цепи первого ЭПС (за счет противоЭДС двигателей), в течении небольшого промежутка времени оказывается больше энергии, поступающей в сеть, а поэтому согласно балансу энергий ее избыток  $\Delta W = W_{M1} - W_{M2}$  возвратится в сеть (вихревые токи поддерживают в это время постоянство магнитного потока тяговых двигателей ЭПС).

Поэтому в системе электрического транспорта для более точного энергобаланса необходимо учитывать изложенные электроэнергетические явления, влияющие на качество электроэнергии в системе и ее экономичность.

### Список литературы

1. Костін М.О. Методи визначення потужностей у системах зі стохастичними електроенергетичними процесами // Техн. електродинаміка. Тем. вип. – 2006. – Ч. 6 – С. 3-8.
2. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Смирнов С.С. Активные мощности гармоник искажающих нагрузок // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. – Маріуполь, 2008. – С. 79-82.