

There is a comparative analysis of the electric arc formation and the direction of heat fluxes under and without the influence of work-coil electromagnetic field. Thus, without a work-coil electromagnetic field, the wells in the molten metal are not deep; the heat fluxes from the electric arc are dispersed and directed to the top of the inwall that leads to premature wear. Dispersal of the arc on the surface of the metal increases the consumption of electrodes. When switching on the work-coil, its electromagnetic field forms an electric arc, providing deep penetration into the molten metal; wells in the metal become much deeper that improves the heating of the metal, providing high intensification of the melting process. The heat fluxes concentrate on the metal surface, reducing the harmful effects on the inwall .

Keywords: *steel-smelting furnace, electromagnetic field, work-coil*

Виконано аналіз процесу електроспоживання електротранспорту на наявність ознак неактивної потужності в системі електричної тяги постійного струму. Встановлено, що регулювання в широкому діапазоні тягової потужності електротранспорту постійного струму призводить до спотворення як тягового струму, так і напруги на струмоприймачі, що в результаті завантажує тягову мережу постійного струму неактивною потужністю і збільшує втрати електроенергії в ній

Ключові слова: *нерівномірне електроспоживання; електротранспорт постійного струму; неактивна потужність; втрати електроенергії*

Выполнен анализ процесса электропотребления електротранспорта на наличие признаков неактивной мощности в системе электрической тяги постоянного тока. Установлено, что регулирование в широком диапазоне тяговой мощности електротранспорта постоянного тока приводит к искажению как тягового тока, так и напряжения на токоприемнике, что в результате загружает тяговую сеть постоянного тока неактивной мощностью и увеличивает потери электроэнергии в ней

Ключевые слова: *неравномерное электропотребление; електротранспорт постоянного тока; неактивная мощность; потери электроэнергии*

УДК 629.423.1

ПРИЗНАКИ НАЛИЧИЯ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

О. И. Саблин

Кандидат технических наук

Кафедра теоретических основ электротехники
Днепропетровский национальный университет

железнодорожного транспорта

им. ак. В. Лазаряна

ул. Академика Лазаряна, 2,

г. Днепропетровск, Украина, 49010

Контактный тел.: (056) 373-15-37

E-mail: olegsss@i.ua

Электропотребление в системе электротранспорта обладает существенной как длительной, так и кратковременной неравномерностью, вызванной процессом регулирования в широком диапазоне тяговой мощности электроподвижного состава (ЭПС), что необходимо для реализации требуемого режима движения. Неравномерное электропотребление на тягу, имеющее вероятностный резкопеременный характер, приводит к увеличению потерь электроэнергии в элементах системы электрической тяги.

Один из путей решения данной проблемы основывается на анализе составляющих полной мощности системы электротяги и, прежде всего, оценке и снижении неактивной мощности, под которой в общем случае понимают совокупность реактивной (обменной) мощности и мощности искажения. Необходимо отметить,

что для электрических цепей с несинусоидальными режимами и нелинейностями существующее множество методов определения неактивной мощности часто дает весьма противоречивые результаты [1], поэтому выбор того или иного метода производят исходя из условий конкретной задачи. Основные признаки наличия неактивной мощности в электрических цепях устанавливаются рядом существующих методов ее расчета и компенсации [1-5], наиболее универсальными из которых являются: метод мгновенных мощностей, классический и интегральный методы, поскольку они базируются на схожей физической основе и дают близкие результаты. Рассмотрим наличие этих признаков применительно к системе электрической тяги постоянного тока.

В основе метода мгновенных мощностей лежит спектральное представление напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ нагрузки, согласно которому мгновенная потребляемая мощность $p(t) = u(t)i(t)$ представляется в виде суммы трех ортогональных мгновенных составляющих [4]:

$$p(t) = u(t)i(t) = p_a(t) + q(t) + p_{\text{н}}(t), \quad (1)$$

где $p_a(t)$ – мгновенная активная мощность, необратимо расходуемая на выполнение полезной работы с учетом неизбежных потерь, обусловлена взаимодействием одноименных гармоник тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$, определяемая выражением

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

где $q(t)$ – мгновенная реактивная (обменная) мощность, периодически запасаемая в энергоемких элементах нагрузки, обусловлена также взаимодействием одноименных гармоник напряжения и тока, определяемая как

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

где $p_{\text{н}}(t)$ – мгновенная мощность искажения – энергия в единицу времени, затрачиваемая нагрузкой на изменение формы тока по сравнению с формой приложенного напряжения, вызвана наличием и взаимодействием гармоник тока и напряжения различных частот:

$$p_{\text{н}}(t) = \sum_{l \neq m} U^{(l)} I^{(m)} \left\{ \cos[(m-1)\omega t + \psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)}] - \cos[(m+1)\omega t - \psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)}] \right\} + \sum_{l \neq m} U^{(m)} I^{(l)} \left\{ \cos[(m-1)\omega t + \psi_u^{(m)} - \psi_i^{(l)}] - \cos[(m+1)\omega t - \psi_u^{(m)} - \psi_i^{(l)}] \right\}. \quad (4)$$

Две последние составляющие мгновенной мощности, как известно, не связаны с выполнением полезной работы устройством, а приводят лишь к дополнительным потерям электроэнергии в сети и элементах самого устройства. В таком случае признаком наличия мгновенной реактивной мощности $q(t)$, согласно (3), является неравенство $(\psi_u^{(l)} - \psi_i^{(m)}) \neq 0$, где $l = m$, то есть, неравенство нулю разности начальных фаз между одноименными гармониками напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$. Признаком наличия мгновенной мощности искажения $p_{\text{н}}(t)$, согласно (4), является существование в спектрах напряжения и тока гармоник разноименных частот. То есть, 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 наличие непропорциональности одноименных гармоник (спектров) $u(t)$ и $i(t)$, что возможно при отличии формы тока $i(t)$ от формы напряжения $u(t)$.

Наличие неактивной мощности в системе электрической тяги постоянного тока согласно указанным признакам рассмотрим на примере электропотребления единиц ЭПС системы городского электротранспорта (трамвая серии Т-3 с дискретным регулирова-

нием мощности). Из сравнения мгновенных графиков напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ трамвая (рис. 1, а и б) видно, что в процессе электропотребления колебания напряжения на токоприемнике и тягового тока существенно отличаются по форме, что неизбежно свидетельствует о наличии в тяговой сети электротранспорта постоянного тока мощности искажения.

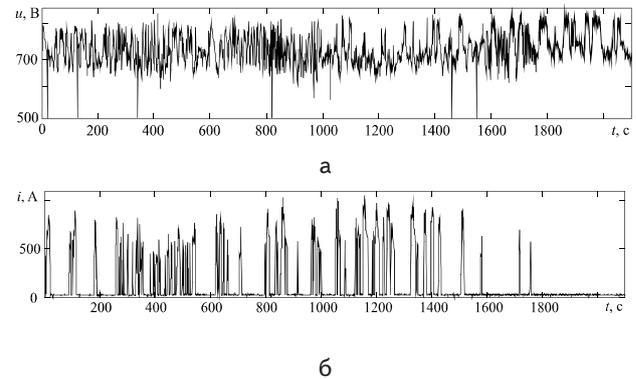


Рис. 1. Регистрограммы напряжения на токоприемнике (а) и тягового тока (б) трамвая серии Т-3 на одном из маршрутов г. Днепропетровска

После разложения указанных графиков напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ в ряд Фурье, проанализировав соответственно их амплитудные спектры (рис. 2, а и б) за рассматриваемый период времени, также приходим к выводу о наличии мощности искажения в тяговой сети постоянного тока. Существенное отличие и непропорциональность спектров $u(t)$ и $i(t)$ объясняется искажением формы тока по отношению к форме напряжения в процессе регулирования мощности. Также видно наличие гармоник в одном из спектров, отсутствующих в другом спектре, что, в свою очередь, также объясняется искажающим характером тяговой нагрузки. Из рис. 2, в следует неравенство нулю фазовых сдвигов между множеством гармониками тока и напряжения. Однако следует отметить, что признаки наличия неактивной мощности, которые определяет метод мгновенных мощностей, не являются достаточно строгими и однозначными, поскольку гармонические составы напряжения на токоприемнике и тягового тока являются случайными и при работе ЭПС подвержены значительным изменениям.

Согласно классическому методу [2], признаком потребления нагрузкой неактивной мощности является неравенство активной P и полной S мощностей (и, как следствие, значение коэффициента мощности λ меньше единицы). На интервале времени рассмотренных реализаций $u(t)$ и $i(t)$ (рис. 1), значения активной и полной мощностей, а также коэффициента мощности за рассматриваемый период времени ($T = 35$ мин.), определенные соответственно по выражениям

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \quad S = UI = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt}, \quad \lambda = P/S,$$

составили: $P=125,9$ кВт, $S=208,1$ кВА, $\lambda=0,602$, т.е. согласно классическому методу неактивная мощность в системе электротяги постоянного тока имеет место.

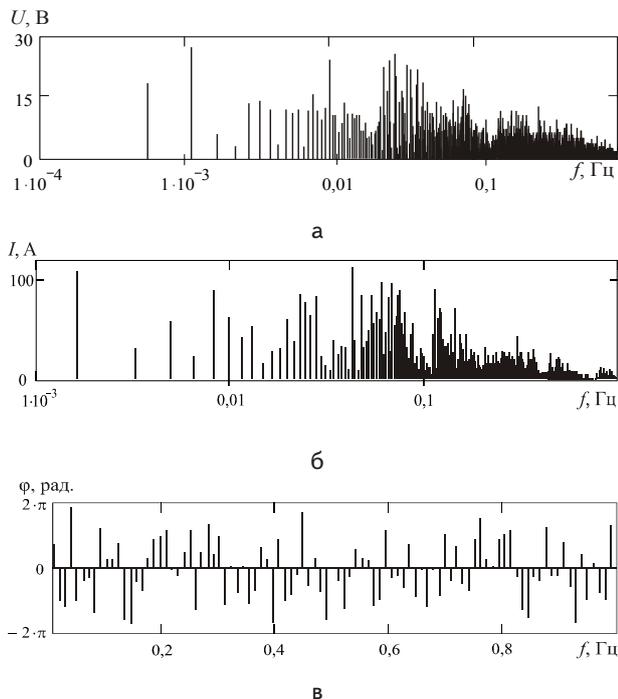


Рис. 2. Амплитудные спектры напряжения на токоприемнике $u(t)$ (а) и тягового тока $i(t)$ (б), а спектр разности начальных фаз соответственно $u(t)$ и $i(t)$ (в)

Интегральный метод позволяет выделить необходимый и достаточный признаки потребления неактивной мощности [5]:

– мгновенное полное сопротивление нагрузки изменяется во времени, что наблюдается, когда между мгновенными значениями напряжения и тока нет прямой пропорциональности, т.е. при $z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \neq const$,

или $\frac{dz}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{u(t)}{i(t)} \right) \neq 0$ (необходимое условие);

– среднее за промежуток времени T значение произведения скорости изменения мгновенного сопротивления $\frac{dz}{dt}$ на квадрат мгновенного тока $i^2(t)$ не равно нулю (достаточное условие).

Как видно из рис. 3, мгновенное полное сопротивление $z(t)$ силовой цепи трамвая, определенное для графиков на рис. 1, подвержено значительным колебаниям, а произведение производной этого мгновенного сопротивления на квадрат мгновенного тягового тока

рассматриваемый промежуток времени $\left[\frac{dz}{dt} i^2(t) \right] \neq 0$.

Таким образом, условия наличия неактивной мощности в системе электрической тяги постоянного тока согласно интегральному методу также выполняются.

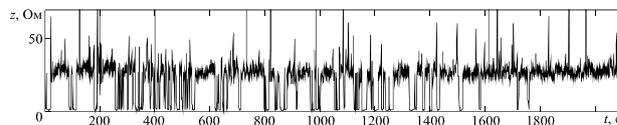


Рис. 3. Графики изменения мгновенного сопротивления $z(t)$ силовой цепи трамвая

Из рассмотренного выше анализа можно выделить наиболее общие признаки наличия неактивной мощности в системе электрической тяги постоянного тока [1], базирующиеся на универсальных методах:

- неравенство активной P и полной S мощностей единиц ЭПС постоянного тока (значения коэффициента мощности ЭПС меньше единицы);
- изменение во времени значения мгновенного полного сопротивления $z(t)$ единиц ЭПС (это неизбежно при регулировании в широком диапазоне мощности ЭПС);
- наличие режима возврата электроэнергии из нагрузки (ЭПС) в систему тягового электроснабжения (признак и следствие).

Первые два признака, которые выполняются для ЭПС постоянного тока, проанализированы выше. Третий признак, колебание электроэнергии между нагрузкой и источником для линейных цепей синусоидального тока, оценивают, как известно, по характеру изменения знака мгновенной мощности $p(t)$: если за время электропотребления $p(t) > 0$, то возврат электроэнергии отсутствует.

Из рис. 4 следует, что, например, для реостатного трамвая Т-3 мгновенная мощность $p(t)$ всегда положительна, то есть, как будто обменные энергопроцессы отсутствуют.

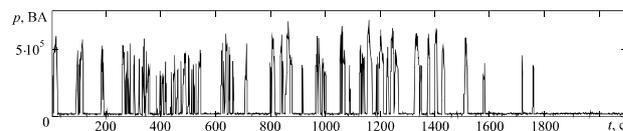


Рис. 4. Кривая мгновенной мощности $p(t) = u(t)i(t)$ для реализаций напряжения реостатного трамвая

Однако, как известно [5], в нелинейных цепях, какими являются силовые цепи ЭПС, неактивная мощность может также возникать и при $p(t) > 0$, а также при отсутствии накопителей электромагнитной энергии, вследствие резкопеременного параметрического характера нагрузки. Обнаруженное несоответствие знака мгновенной мощности и теоретическое наличие неактивной мощности в системе электрической тяги постоянного тока свидетельствует о том, что такой подход (по знаку мгновенной мощности) к оценке консервативных процессов в нелинейных цепях не синусоидального, тем более недетерминированного, тока неправилен [1]. Более того, в таких цепях даже классическое интегральное выражение реактивной мощности цепи несинусоидального тока

$$Q = \sum_{k=1}^s Q^{(k)} = \sum_{k=1}^s U^{(k)} I^{(k)} \sin \phi^{(k)},$$

уже не позволяет в полной мере описывать реальные энергетические процессы, протекающие между ис-

точником и потребителем, а в рассматриваемом случае нестационарного режима работы и стохастического изменения напряжения на токоприемнике $u(t)$ и тягового тока $i(t)$ ЭПС эта формула вообще не применима. Очевидно, наиболее (если не единственно) возможные методы, которые позволяют находить и компенсировать неактивную мощность исходя из мгновенных значений случайных функций напряжения $u(t)$ и

тока $i(t)$, для чего необходимы быстродействующие автоматические системы компенсации.

Таким образом, система электрической тяги постоянного тока, считаясь системой постоянного тока по своему названию, фактически, является потребителем неактивной мощности, для снижения потерь от которой необходимо применение определенных мероприятий.

Литература

1. Баланс энергий в электрических цепях / [В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др.]. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
2. Новосельцев А. В. Определение составляющих полной мощности в однофазных электрических цепях на основе классического метода и метода гипотетических составляющих / Новосельцев А. В., Стрелков М. Т. – К., ИЭД, 1986. – 63 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т электродинамики).
3. Новосельцев А. В. Определение составляющих полной мощности в однофазных электрических цепях на основе интегрального, спектрального и статистического методов / Новосельцев А. В., Стрелков М. Т. – К., ИЭД, 1986. – 59 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т электродинамики).
4. Крогерис А. Ф. Оценка энергетических процессов по мгновенной мощности / А. Ф. Крогерис, К. К. Раешевиц, Э. П. Трейманис [и др.] // Электричество. – 1987. – №7. – С. 31-35.
5. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

Abstract

Energy consumption in the electric transport system possesses the long-term and short-term variation, caused by the regulation process in the wide range of tractive power of electric rolling train, necessary for the required traffic condition. Irregular energy consumption for thrust with probable variable nature, leads to the growth of power losses in the system elements of electric traction. One of the ways of solution of the given problem is based on the analysis of total power components of the traction system and on the estimation and decrease of inactive power, which is the combination of reactive and distortion powers. Existing computing and compensation methods determine the basic signs of the powers' presence in electric circuits. The instantaneous power method, classical and integral approaches are the most universal as they based on the similar physics and have similar results. In the process of tram energy consumption, the voltage on the current collector differs from the traction current. This indicates the presence of dc of distortion power in the traction system of electric transport. The inequality of active and total powers and variable nature of resistance of power circuit also indicates the consumption of dc of inactive power by electric transport. Thus, the system of electric traction of dc that is considered as dc system is actually a consumer of inactive power to reduce the electric losses

Key words: *irregular energy consumption, electric transport of dc, inactive power*