

О. И. САБЛИН (ДИИТ)

## СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА – СИСТЕМА НЕПОСТОЯННОГО ТОКА

Розглядається необхідність використання коефіцієнта потужності електрорухомого складу постійного струму, як енергетичної характеристики системи тяги постійного струму. Як приклад аналізуються результати розрахунку величини  $\lambda$  електровоза ДЕ1 у тяговому режимі.

Рассматривается необходимость использования коэффициента мощности электроподвижного состава постоянного тока, как энергетической характеристики системы тяги постоянного тока. В качестве примера анализируются результаты расчета величины  $\lambda$  электровоза ДЭ1 в тяговом режиме.

The work examines the need of using the power ratio of d.c. electric rolling-stock as a power characteristic of d.c. traction system. As an example, the results of calculation of the  $\lambda$  value of DE1 electric locomotive in the tractive mode are analysed.

На сегодняшний день около 46 % электрических железных дорог Украины электрифицированы по системе электрической тяги постоянного тока с номинальным напряжением 3000 В. Соответственно и эксплуатирующийся на них магистральный электроподвижной состав (ЭПС) принято считать ЭПС постоянного тока.

Однако силовые электрические цепи ЭПС постоянного тока, имея свое название лишь по роду питающего напряжения (постоянного), фактически являются нелинейными цепями переменного тока, так как традиционно не учитывается тот факт, что реальный тяговый ток  $I(t)$ , потребляемый из сети, является резко переменным во времени. Кроме этого, и напряжение на токоприемнике  $U(t)$  по роду постоянное, фактически таким не остается, а подвержено значительным колебаниям.

Например, как показали исследования, напряжение на токоприемнике электровазов ДЭ1, эксплуатирующихся на Приднепровской железной дороге, изменяется в пределах 2 130...4 100 В. Такие изменения тока и напряжения во времени носят неперіодический случайный характер и зависят от многих факторов, основные из которых: масса поезда, изменение профиля пути, необходимая скорость движения и др.

На рис. 1 для примера приведены экспериментально полученные временные диаграммы изменения величин  $U(t)$  и  $I(t)$  первого украинского магистрального электровоза ДЭ1 при его эксплуатации на одном из участков Приднепровской железной дороге.

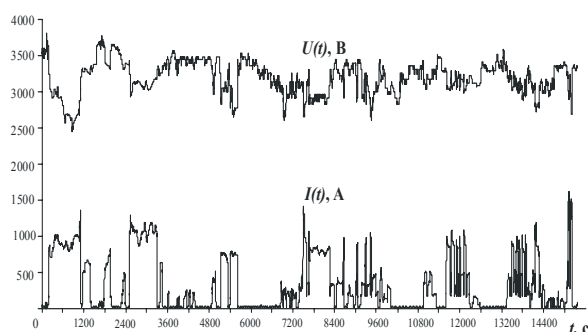


Рис. 1. Временная диаграмма изменения тягового тока и напряжения на токоприемнике электровоза ДЭ1

С учетом изложенного и с точки зрения систем электроснабжения любая единица ЭПС постоянного тока является нелинейной случайнопараметрической нагрузкой, технологически искажающей формы напряжения на токоприемнике и тягового тока. При этом традиционно, до настоящего времени считается, что в таких системах реактивная мощность отсутствует, понятие коэффициента мощности к ним не используется, и поэтому электропотребление определяют лишь по расходу активной энергии. Ошибочность таких подходов, по нашему мнению, связана с тем, что не учитываются упомянутые выше и фактически существующие непрерывные изменения постоянных тягового тока  $I(t)$  и питающего напряжения  $U(t)$ .

В связи с вышесказанным необходимо: во-первых, обратить внимание на то, что системы электрического транспорта постоянного тока по своей сути являются системами переменного тока, и поэтому требуют энергетического анализа с позиций теории цепей переменного тока; во-вторых, ввести понятие коэф-

коэффициента мощности применительно к ЭПС постоянного тока и показать наличие неактивной составляющей мощности в рассматриваемых системах.

Общезвестно, что коэффициент мощности является важнейшей энергетической характеристикой любой электротехнической (электроэнергетической) системы потребления электроэнергии. Он определяет влияние этой системы или устройства на эффективность транспортирования электроэнергии системой электроснабжения или степень использования энергии источника потребителем. В практических задачах коэффициент мощности всегда определяют, во-первых, для систем с переменными токами, во-вторых, для установившегося режима их работы.

Не проводя детального исследования характера и поведения случайных функций тягового тока  $I(t)$  и напряжения на токоприемнике  $U(t)$  (частот, входящих в спектры  $I(t)$  и  $U(t)$ ), а лишь учитывая сам факт переменности  $I(t)$  и  $U(t)$ , можно рассчитать и проанализировать величину коэффициента мощности электроподвижного состава постоянного тока. Для этого в данной работе были использованы статистические данные по изменению тягового тока и напряжения на токоприемнике электровоза постоянного тока ДЭ1 в его режимах работы на трех участках Приднепровской железной дороги.

Запись значений тока и соответствующего ему напряжения на токоприемнике была осуществлена непосредственно с дисплеев бортовых компьютеров работающих электровозов, данные фиксировались через каждые 5 секунд. Обработке подверглись 40 реализаций тягового тока  $I(t)$  и соответствующего ему напряжения на токоприемнике  $U(t)$ , зарегистрированные в сорока поездках. Для каждой поездки (режима работы) коэффициент мощности определялся отдельно.

Как известно [1], а также согласно ДСТУ 2843-94 и ДСТУ 3120-95, для электрических цепей с детерминированными периодическими несинусоидальными электрическими величинами  $u(t)$  и  $i(t)$  коэффициент мощности  $\lambda$  устройства (системы) в общем случае определяют как отношение активной мощности  $P$ , потребляемой устройством в рассматриваемом режиме, к его полной мощности  $S$

$$\lambda = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где в общем случае активную мощность  $P$  определяют как среднее значение мгновенной мощности  $p(t)$

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

В случае, если же ток и напряжение заданы рядами Фурье, то  $P$  определяют как сумму активных мощностей всех гармоник рядов Фурье величин  $u(t)$  и  $i(t)$

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U^{(k)} I^{(k)} \cos \varphi^{(k)}, \quad (3)$$

а полную мощность  $S$  как

$$S = UI, \quad (4)$$

где действующие значения  $U$  и  $I$  периодических несинусоидальных величин, соответственно  $u(t)$  и  $i(t)$ , в общем случае находят как среднеквадратические за период от мгновенных функций напряжения и тока

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad (5)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}. \quad (6)$$

Аналогично, если ток и напряжение заданы гармониками, то их действующие значения определяются по выражениям:

$$U = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U^{(k)2}}, \quad (7)$$

$$I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I^{(k)2}}, \quad (8)$$

где в выражениях (3), (7) и (8)  $U^{(k)}$ ,  $I^{(k)}$  – действующие значения  $k$ -тых гармоник рядов Фурье напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$ .

Поскольку, как следует из приведенных выражений, коэффициент мощности  $\lambda$  определяется величинами  $P$ ,  $U$  и  $I$ , тогда задача определения  $\lambda$  ЭПС постоянного тока сводится к определению указанных величин. Однако формулы (2), (3) и (5)–(8) непосредственно неприменимы для определения  $P$ ,  $U$  и  $I$ , а значит и для нахождения  $\lambda$  по (1), поскольку переменные  $U(t)$  и  $I(t)$  являются непериодическими, а случайными функциями, аналитические выражения которых неизвестны и их разложение в ряд Фурье в общем случае невозможно.

Поэтому определим мощность  $P$  исходя из общего понятия, что активная мощность равна среднему значению за период мгновенной мощности  $p(t)$ . А так как  $U(t)$  и  $I(t)$  – непериодические функции, то заменим интеграл (2) конечной суммой и найдем  $P$  как среднее арифметическое от суммы дискретных значений  $p_n$  мгновенной мощности за время поездки по данному участку

$$P = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N p_n \Delta t_n = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N U_n I_n \Delta t_n, \quad (9)$$

где  $T$  – длительность реализации  $U(t)$  и  $I(t)$  (длительность поездки);  $U_n, I_n$  –  $n$ -е значения напряжения на токоприемнике и тока электроваза, которые находят при временном через  $\Delta t$  квантовании и дискретизации зависимостей  $U(t)$  и  $I(t)$  (рис. 2);  $\Delta t_n$  – промежуток времени между регистрируемыми значениями тока и напряжения;  $N$  – общее число точек квантования за одну поездку на данном участке.

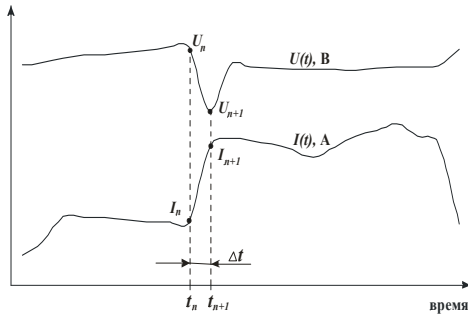


Рис. 2. Дискретизация реализации тягового тока и напряжения на токоприемнике

Поскольку регистрация значений  $U(t)$  и  $I(t)$  велась через равные промежутки времени  $\Delta t = 5$  с, тогда

$$T = \sum_{n=1}^N \Delta t_n = N \Delta t$$

и выражение (9) можно записать так:

$$P = \frac{\sum_{n=1}^N p_n}{N} = \frac{\sum_{n=1}^N U_n I_n}{N}. \quad (10)$$

Действующие значения напряжения  $U$  и тока  $I$  (для нахождения  $\lambda$  по (1)) определим, заменяя интегралы (5), (6) (как это выполнялось для выражения (9)) суммами, как среднеквадратические значения за время поездки:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N U_n^2}{N}}, \quad (11)$$

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N I_n^2}{N}}. \quad (12)$$

Таким образом, после расчета величин  $P, U$  и  $I$  по приведенным выражениям (10)–(12) далее по формуле (1) определим величину коэффициента мощности для каждой пары реализации тягового тока и напряжения на токоприемнике (реализаций режимов работы) электроваза постоянного тока.

Анализ полученных результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

1. Коэффициент мощности  $\lambda$  электровазов ДЭ1 в тяговом режиме составляет  $0,75 \dots 0,87$  (рис. 3), что заметно ниже величины  $1,0$ , на которую рассчитывается энергопотребление электрической тяги постоянного тока. Вероятно, близкие к этим значениям будут значения  $\lambda$  и для других серий электровазов (ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11), эксплуатирующихся на железных дорогах Украины. На рис. 4 представлены значения полной  $S$  и соответственно активной  $P$  мощностей для каждой из 20 поездок, вычисленные соответственно по формулам (4) и (10).

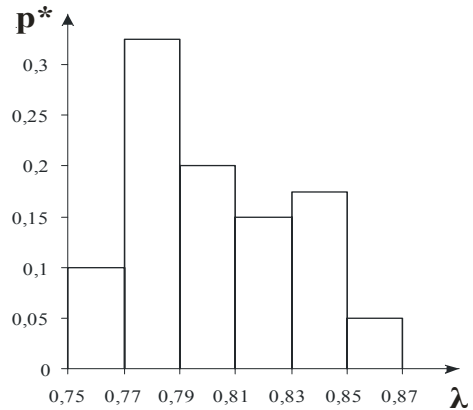


Рис. 3. Гистограмма коэффициента мощности

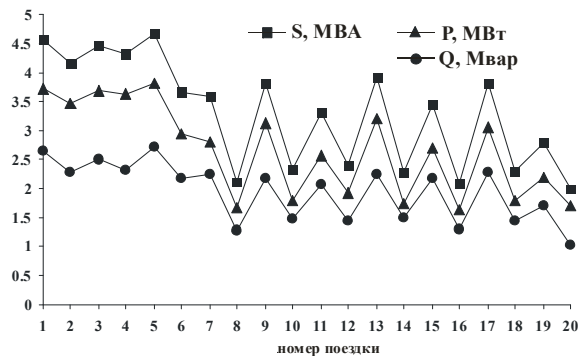


Рис. 4. Зависимости мощностей электроваза ДЭ1 от поездки

2. Коэффициент мощности является случайной величиной, зависящей от многих факторов, основные из которых: профиль пути участ-

ка, масса поезда (составляла 1188...5165 т) и режим ведения поезда, т. е. квалификация машиниста. Подчеркнем, что последний фактор не является второстепенным: например, на одном и том же участке (Нижнеднепровск Узел–Пятихатки), при одинаковой практически массе поезда (4841...4920 т), для одного и того же номера электровоза (ДЭ1-011), но управляемого разными машинистами, коэффициент мощности был различным и составил 0,77...0,83. Следовательно, возникает задача разработки карт режимов ведения поездов, оптимальных по величине коэффициента мощности на участках различного профиля.

3. Превалярующее влияние на величину  $\lambda$  оказывает резко переменный случайный характер тягового тока электровоза. Влияние изменения напряжения на токоприемнике даже в пределах 2 130...4 100 В менее заметно.

4. Существующие подходы и методики определения энергопотребления системой электрической тяги постоянного тока являются неверными, так как не учитывают перетоков реактивной мощности в системе электроснабжения. Не учитывается также влияние высших гармоник и интергармоник, реально существующих в напряжении  $U(t)$  и токе  $I(t)$ .

Установим, за счет каких составляющих реактивной мощности – мощности накопления (обмена) или мощности искажения (сдвига) – коэффициент мощности электровоза меньше единицы. Как известно [2; 3], основными признаками наличия реактивной мощности в цепи есть: неравенство активной  $P$  и полной  $S$  мощностей; наличие режима возврата электроэнергии из нагрузки в генератор; изменение во времени значения мгновенного полного сопротивления  $z(t)$  (или проводимости  $y(t)$ ) на входных зажимах нагрузки. Проверим, выполняются ли эти признаки для цепей ЭПС постоянного тока.

По результатам расчета коэффициента мощности электровоза ДЭ1, а также рис. 4 видно, что первый признак наличия выполняется.

Наличие режима возврата электроэнергии из нагрузки в источник (как второго признака наличия реактивной мощности) для линейных цепей синусоидального тока в классическом варианте оценивают, как известно, по характеру изменения знака мгновенной мощности  $p(t)$ : если  $p(t) > 0$ , то возврат электроэнергии отсутствует. Однако такой подход оценки обменных процессов в нелинейных цепях несинусоидального тока неправилен [2; 4]. Более того, в таких цепях даже классическое интегральное выражение реактивной мощности цепи несинусоидального тока

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U^{(k)} I^{(k)} \sin \varphi^{(k)} \quad (13)$$

не позволяет в полной мере описывать энергетические процессы, протекающие между источником и потребителем, а в рассматриваемом случае стохастического изменения  $U(t)$  и  $I(t)$  формула (13) вообще не применима. Очевидно, наиболее (если не единственно) возможны те методы, которые позволяют находить реактивную мощность исходя из мгновенных значений случайных функций напряжения  $U(t)$  и тока  $I(t)$ . То есть необходимо рассмотрение собственно мгновенной реактивной мощности  $q(t)$  [5; 6; 8]. Один из подходов определения  $q(t)$  базируется на концепции С. Фризе [7]. В этом случае выражение для  $q(t)$  имеет вид [5; 6]:

$$q(t) = p(t) - \frac{P}{U^2} U^2(t) = U(t)I(t) - \frac{P}{U^2} U^2(t). \quad (14)$$

Так как  $q(t)$  определяет скорость изменения электромагнитной энергии в системе, это значит, что в интервалы времени, когда  $q(t) \neq 0$ , между потребителем и источником происходят процессы обмена электромагнитной энергией, а когда  $q(t) = 0$  – они отсутствуют.

В качестве примера, для одной реализации  $U(t)$  и  $I(t)$  (см. рис. 1) электровоза ДЭ1, были определены мгновенные: сопротивление  $R(t) = \frac{U(t)}{I(t)}$  (рис. 5, а), мощность  $p(t) = U(t)I(t)$  (рис. 5, б) и реактивная мощность  $q(t)$  по (14) (рис. 5, в).

Изменение во времени мгновенного сопротивления  $R(t)$  (рис. 5, а) свидетельствует о соблюдении третьего признака наличия реактивной мощности в рассматриваемой системе. Однако, судя по знаку мгновенной мощности ( $p(t) > 0$ ), режим возврата электроэнергии из нагрузки в источник отсутствует и свидетельствует об отсутствии обменных процессов. Однако такой обменный процесс должен быть, так как силовые цепи электровоза имеют мощные нелинейные реактивные элементы: индуктивности обмоток якоря, обмоток главных и дополнительных полюсов тяговых двигателей, индуктивных шунтов.

Обнаруженное несоответствие знака мгновенной мощности и наличия обменных процессов лишний раз подтверждает, что классические суждения об обменных процессах неприменимы для нелинейных цепей с несинусоидальными токами и напряжениями. В этой связи необходимо согласиться с мнением [6],

что для полного описания обменных электромагнитных процессов необходимо рассматривать мгновенную реактивную мощность  $q(t)$  (рис. 5, в). Поскольку  $q(t)$  характеризует скорость изменения электромагнитной энергии

$$q(t) = \frac{dW}{dt},$$

и она не равна нулю в течение времени потребления электроэнергии (см. рис. 4, в), то в системе электрической тяги постоянного тока происходят обменные энергетические процессы (через контактную сеть) между источником и силовыми цепями электровоза.

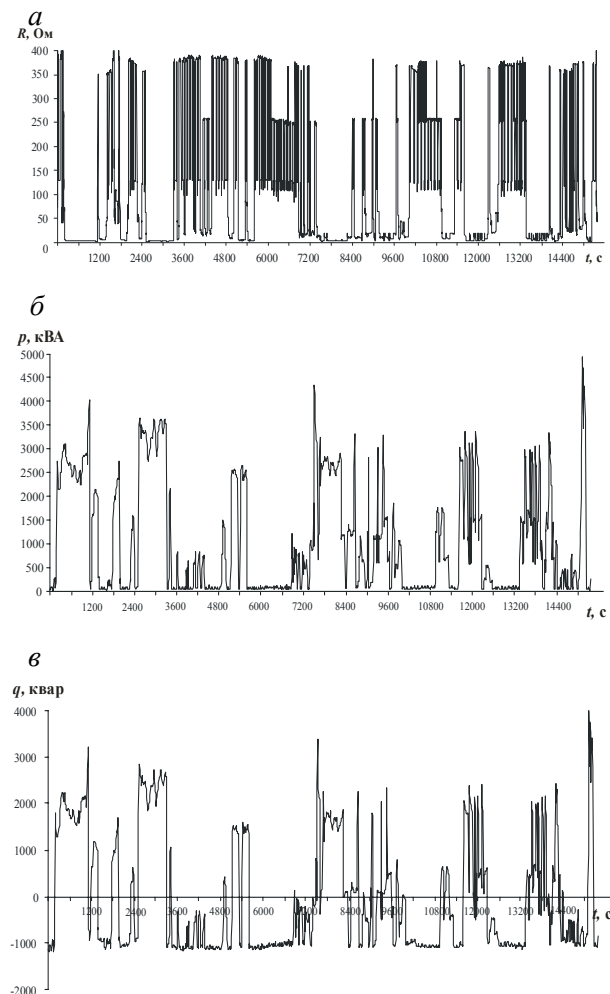


Рис. 5. Графики мгновенных:  
а – сопротивления  $R(t)$ ; б – мощности  $p(t)$ ;  
в – реактивной мощности  $q(t)$

Следовательно, коэффициент мощности ЭПС постоянного тока меньше единицы как за счет реактивной мощности искажения (тягового тока и напряжения в контактной сети), так и вследствие реактивной обменной мощности, обусловленной нелинейными индуктивностями силовой цепи электровоза. Таким образом, подвижной состав электрического транспорта по-

стоянного тока является потребителем неактивной составляющей полной мощности.

Как известно, низкие значения коэффициента мощности свидетельствуют о повышенном потреблении неактивной составляющей полной мощности ЭПС постоянного тока. Следствием этого является дополнительная нагрузка тяговой сети и электрооборудования ЭПС реактивным током, а также увеличенный расход электроэнергии на тягу поездов.

Следовательно, для улучшения энергетических показателей системы тягового электроснабжения постоянного тока последующими задачами должны быть, во-первых, оценка реактивной мощности конкретных видов ЭПС постоянного тока и, во-вторых, разработка мероприятий по уменьшению этой мощности. При этом следует иметь в виду, что для нелинейных цепей, какими являются силовые цепи электровозов, в режимах несинусоидального тока общепринятое понятие реактивной мощности является некорректным, а следовательно, существующие методы ее компенсации неприменимы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. Том первый / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян – Л.: Энергоиздат, 1981. – 534 с.
2. Тонкаль В. Е. Баланс энергий в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
3. Денисюк С. П. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, спец. 05.09.05 – теоретична електротехніка / ІЕД НАН України. – К., 2002, – 35 с.
4. Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
5. Жежеленко И. В. Современная концепция реактивной мощности / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Вестник Приазовского госуниверситета, Мариуполь, 1995. – С. 192–197.
6. Саенко Ю. Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, спец. 05.09.05 – теоретична електротехніка / НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2003, – 36 с.
7. Fryse S. Wirk – Blind – und Schein – leistung in elektrischen stromkreisen min nichtsinusformigen Verfah von Strom und Spannung // Elektrotechn. Z. – 1932. – 25. – S. 596–599; 26. – S. 625–627; 29. – S. 700–702.
8. Демирчян К. С. Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций // Изв. РАН. Энергетика, 1992, – № 1. – С. 3–18.

Поступила в редколлегию 12.05.06.