

## КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Костин Н.А., д.т.н., проф., Саблин О.И.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна  
Украина, 49010, Днепропетровск, ул. ак. В. Лазаряна, 2, ДИИТ, каф. "Теоретические основы электротехники"  
тел. (056) 776-17-91, E-mail: Evm@diit.dp.ua

*У роботі приведені методика і результати розрахунку коефіцієнта потужності електровозів постійного струму з врахуванням імовірнісного характеру зміни напруги на струмоприймачі електровоза і його тягового струму.*

*В работе приведены методика и результаты расчёта коэффициента мощности электровозов постоянного тока с учётом вероятностного характера изменения напряжения на токоприёмнике электровоза и его тягового тока.*

Коэффициент мощности является важнейшей энергетической характеристикой любой электротехнической или электромеханической системы (устройства). Он определяет влияние этой системы или устройства на эффективность транспортирования электроэнергии системой электроснабжения. В практических задачах коэффициент мощности всегда определяют, во-первых, для систем переменного тока, во-вторых, для установившегося режима. Однако существуют системы, которые работают на постоянном (по роду) токе, но сила этого тока является резко изменяющейся, причём неперiodически. Это обусловлено тем, что эти системы весь период эксплуатации работают в нормальных переходных режимах. Такими устройствами (системами) являются единицы электроподвижного состава (ЭПС) постоянного тока магистральных, карьерных и шахтных железных дорог, а также городского электрического транспорта: электровазы, электропоезда, мотор-вагоны метрополитенов, трамваи, троллейбусы. У них фактическая тяговая токовая нагрузка  $I(t)$  является случайно-параметрической (рис. 1) вследствие изменения профиля пути, веса перевозимого груза и необходимой скорости движения.

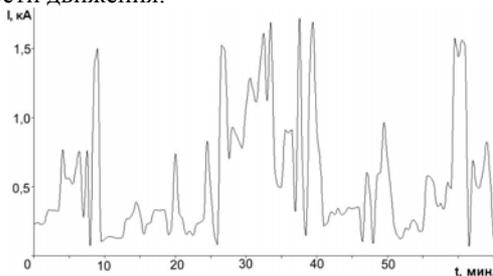


Рис. 1

Таким образом, электроподвижной состав является существенно нелинейной нагрузкой технологически искажающей форму напряжения на пантографе и тягового тока. На рис.1 в качестве примера приведена полученная экспериментальным образом временная диаграмма изменения тягового тока электровазы постоянного тока ДЭ1 на одном из участков Приднепровской железной дороги.

Кроме этого, и напряжение на токоприёмнике  $U$  указанного ЭПС, по роду постоянное, фактически также существенно и также случайно изменяется во времени (рис. 2). Например, как показали исследования, напряжение  $U(t)$  на токоприёмнике электровазов

ДЭ1, эксплуатирующихся на Приднепровской железной дороге колеблется от 2130 до 4100 В.

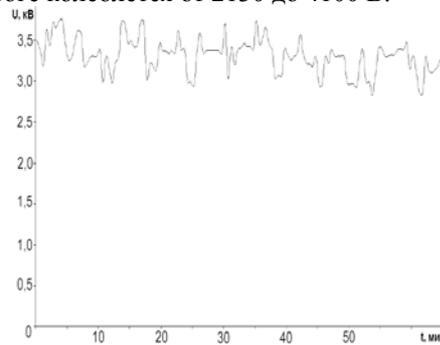


Рис. 2

Указанные временные изменения тягового тока  $I(t)$  и напряжения на токоприёмнике  $U(t)$  обязывают рассчитывать, анализировать и учитывать в электропотреблении величину коэффициента мощности ЭПС постоянного тока также как это выполняется для системы электрической тяги переменного тока. Однако до настоящего времени такие расчёты и такой учёт не производились, что, по-нашему мнению, ошибочно и обусловлено существующим убеждением, что коэффициент мощности ЭПС постоянного тока равен единице. Поэтому целью настоящей работы является, во-первых, дать метод оценки коэффициента мощности для таких режимов и, во-вторых, показать на примере, что численные значения коэффициента мощности заметно меньше единицы, что и необходимо учитывать.

Как известно [1] и согласно ДСТУ 2843-94 [2] и ДСТУ 3120-95 [3], для электрических цепей с детерминированными периодическими несинусоидальными электрическими величинами  $u(t)$  и  $i(t)$  коэффициент мощности  $\lambda$  устройства (системы) определяют как отношение активной мощности  $P$ , потребляемой устройством в рассматриваемом режиме, к его полной мощности  $S$ :

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

где активную мощность  $P$  определяют как сумму активных мощностей всех гармоник рядов Фурье величин  $u(t)$  и  $i(t)$

$$P = \sum_{s=0}^n U^{(s)} \cdot I^{(s)} \cdot \cos \varphi^{(s)}, \quad (2)$$

а действующие значения  $U$  и  $I$  периодических несинусоидальных величин соответственно  $u(t)$  и  $i(t)$  находят как

$$U = \sqrt{\sum_{s=0}^n U^{(s)2}}, \quad (3)$$

$$I = \sqrt{\sum_{s=0}^n I^{(s)2}}, \quad (4)$$

где в выражениях (2)–(4)  $U(s)$ ,  $I(s)$  – действующие значения "s"-тых гармоник рядов Фурье напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$ .

Приведенные выражения (2)–(4) неприменимы при определении  $P$ ,  $U$  и  $I$  для рассматриваемой задачи нахождения  $\lambda$  по (1), поскольку переменные  $U(t)$  и  $I(t)$  являются не периодическими, а случайными функциями, разложение которых в ряд Фурье заранее невозможно.

На первый взгляд активную мощность  $P$  можно определять и как произведение средних за время поездки (т.е. за время работы электровоза на участке в режиме тяги) напряжения  $U_{\text{ср}}$  и тока  $I_{\text{ср}}$ :

$$P = U_{\text{ср}} \cdot I_{\text{ср}}, \quad (5)$$

$$U_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=1}^n U_k}{n}, \quad I_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=1}^n I_k}{n}. \quad (6)$$

где  $U_k$ ,  $I_k$  – "k"-тые значения напряжения на токоприёмнике и тока электровоза, которые находят при времени через  $\Delta t$  квантовании и дискретизации зависимостей  $U(t)$  и  $I(t)$  (рис. 3);  $n$  – общее число точек квантования за одну поездку на данном участке.

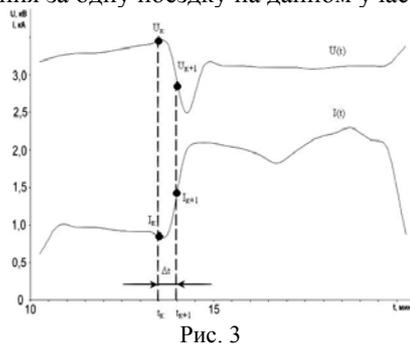


Рис. 3

Однако, по нашему мнению, значения мощности  $P$  в этом случае будут менее точны, т.к. учитывается только мощность нулевой гармоники (если предположить разложимость  $U(t)$  и  $I(t)$  в ряд Фурье), поскольку  $U_{\text{ср}} = U^{(0)}$ ,  $I_{\text{ср}} = I^{(0)}$ . Поэтому определим мощность  $P$  исходя из общего понятия, что активная мощность равна среднему значению за период мгновенной мощности  $p(t)$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt. \quad (7)$$

А так как  $U(t)$  и  $I(t)$  – непериодические функции, то найдём  $P$  как среднюю арифметическую сумму дискретных значений мгновенной мощности  $p_k$  за время поездки по данному участку

$$P = \frac{\sum_{k=1}^n p_k}{n} = \frac{\sum_{k=1}^n U_k \cdot I_k}{n}, \quad (8)$$

Действующие значения функций  $U(t)$ ,  $I(t)$  (для нахождения  $\lambda$  по (1)) определим как средние квадратические значения за время поездки:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n U_k^2}{n}}, \quad (9)$$

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n I_k^2}{n}}. \quad (10)$$

В качестве примера применения изложенной методики и по сути, в целях анализа коэффициента мощности первого украинского электровоза, выполнены расчёты по выражениям (1), (8), (9), (10) и анализ величины  $\lambda$  электровозов ДЭ1 в режимах их работы на трёх участках (6 различных профилей) Приднепровской железной дороги. Временной интервал дискретизации  $\Delta t$  случайных процессов  $U(t)$ ,  $I(t)$ , зарегистрированных в 20-ти поездках, определяли по выражению теории случайных процессов [4,5]:

$$\Delta t \leq \frac{0,5}{f_a}, \quad (11)$$

где  $f_a$  – максимальная (верхняя) частота спектра случайного процесса, равная  $\left(\frac{1}{60} \dots \frac{1}{90}\right) \tilde{n}^{-1}$  для исследуемых  $U(t)$  и  $I(t)$ .

Продолжительность каждой поездки составляла приблизительно 70 минут, а шаг квантования величин  $U(t)$ ,  $I(t)$  – 30 с.

На рис. 4 представлены временные зависимости напряжения  $U(t)$ , тока  $I(t)$  ("а") и мгновенной мощности  $p(t)$  ("б") электровоза для одной из реализаций режимов его работы.

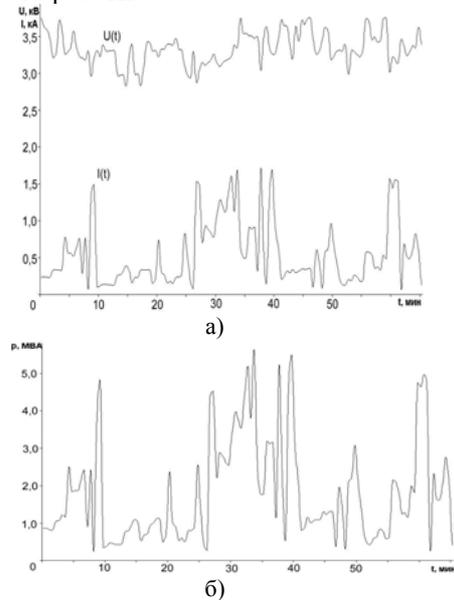


Рис. 4

По известным функциям времени  $U(t)$  и  $I(t)$  определяется функция эквивалентного мгновенного электрического сопротивления электровоза  $R(t)$  (рис.5) как случайно-параметрическая нагрузка тяговой сети  $R(t) = U(t)/I(t)$ .

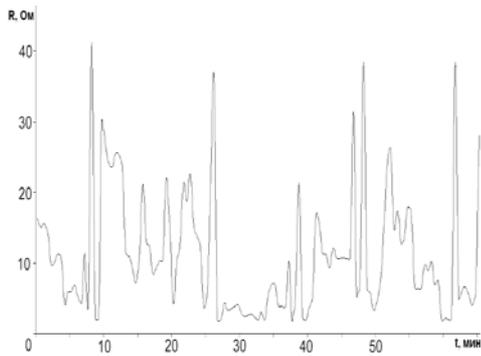


Рис. 5

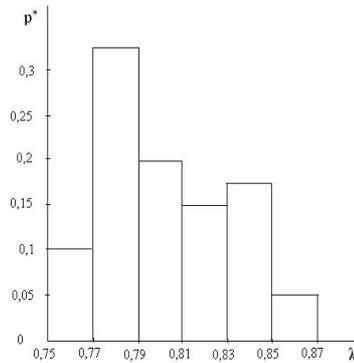


Рис. 6

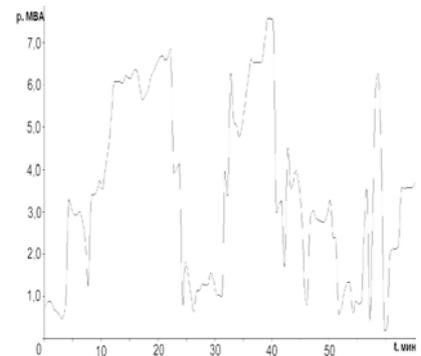


Рис. 7

На рис. 6 представлена гистограмма значений (статистическая вероятность  $p^*$ ) коэффициента мощности  $\lambda$  электровоза ДЭ1 для 20 поездок (40 реализаций режимов работы).

Из анализа этих зависимостей и другой полученной информации вытекает следующее:

1. Коэффициент мощности электровозов ДЭ1 в тяговом режиме составляет от 0,75 до 0,85, 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 типов электровозов (ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11), эксплуатирующихся на железных дорогах Украины.

2. Полученные невысокие значения коэффициента мощности не превышают величины  $\lambda$  электровоза переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями, для которых  $\lambda \leq 0,8 \dots 0,82$  [6], что необходимо учитывать при сравнении энергетических показателей указанных электровозов.

3. Коэффициент мощности является случайной величиной, зависящей от многих факторов, основные из которых: профиль пути участка, масса поезда (составляла от 1188 до 5165 тонн) 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 тонн), для одного и того же номера электровоза (ДЭ1-011), но управляемого различными машинистами коэффициент мощности был различным и составил от 0,77 до 0,83. Следовательно, возникает задача разработки карт режимов ведения поездов оптимальных по электропотреблению на участках различного профиля.

4. Оценка коэффициента  $\lambda$  с использованием формулы (5) даёт результаты завышенные на 3-4%, в сравнении с применением выражения (8).

5. Превалирующее влияние на величину  $\lambda$  оказывает резко переменный случайный характер тягового тока электровоза. Влияние изменения напряжения на токоприёмнике даже в пределах от 2130 до 4100 В менее заметно.

Установим, за счёт каких составляющих реактивной мощности – мощности накопления (обмена) или мощности искажения (сдвига) – коэффициент мощности электровоза меньше единицы. С этой целью были определены его мгновенная, активная и реактивная мощности.

Кривая мгновенной мощности  $p(t)$ , вычисленная по выражению  $p(t) = U(t)I(t)$ , в качестве примера приведена на рис. 7.

Согласно классическому толкованию (для линейных цепей синусоидального тока), тот факт, что  $p(t) > 0$ , свидетельствует об отсутствии обмена энергией между источником и нагрузкой. Однако такой обмен 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 лишней раз подтверждает, что классические суждения об обменных процессах неприменимы для нелинейных цепей с несинусоидальными токами и напряжениями [7,8].

Ещё более неопределённые и противоречивые, оставаясь дискуссионными, являются вопросы оценки реактивной мощности в цепях несинусоидального тока [8-12]. В таких цепях классическое интегральное выражение

$$Q = \sum_{s=1}^n U^{(s)} I^{(s)} \sin \varphi^{(s)}$$

не позволяет в полной мере описать энергетические процессы, протекающие между источником и потребителем. Необходимо рассмотрение собственно мгновенной реактивной мощности электровоза  $q(t)$  [9, 13], выражение которой может быть получено из следующих предпосылок.

Согласно [8, 10], наиболее перспективным подходом определения реактивной мощности в цепях несинусоидального тока является концепция С. Фризе [14]. Согласно ей, электровоз как нелинейный пассивный двухполюсник заменим двумя параллельно соединёнными элементами: резистивным с сопротивлением  $R$ , потребляющим энергию, и реактивным, который её либо не потребляет, либо первоначально накапливает, а затем возвращает в контактную сеть. Тогда для произвольного интервала времени  $[0, \dots, \tau]$ , пусть это будет длительность одной поездки, ток электровоза представим как сумму активной  $I_a$  и реактивной  $I_p$  составляющих [11]:

$$I(t) = I_a(t) + I_p(t) \quad (12)$$

Умножим левую и правую части (12) на мгновенное напряжение  $U(t)$

$$U(t)I(t) = U(t)I_a(t) + U(t)I_p(t) \quad (13)$$

Левая часть выражения (13) является общей мгновенной мощностью  $p(t)$  электровоза, а правые, соответ-

венно, мгновенной активной  $p_a(t)$  и мгновенной реактивной  $q(t)$  мощностями [8, 12]. Тогда

$$p(t) = p_a(t) + q(t) \quad (14)$$

Мгновенная активная мощность  $p_a(t)$  может быть найдена как мощность, потребляемая эквивалентным резистором  $R$  электровоза.

$$p_a(t) = RI_a^2(t) = \frac{U^2(t)}{R} \quad (15)$$

Так как активная мощность  $P$  электровоза

$$P = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U(t)I(t) dt$$

равна активной мощности, потребляемой резистором  $R$

$$P_a = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p_a(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U(t)I_a(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{U^2(t)}{R} dt = \frac{1}{R} U^2, \quad P_a = P,$$

$$\text{то } P = \frac{U^2}{R}, \text{ откуда } R = \frac{U^2}{P}, \quad (16)$$

где  $U$  – действующее значение напряжения на токоприёмнике электровоза.

С учётом подстановки (16) в (15) выражение (14) примет вид

$$p(t) = \frac{P}{U^2} \cdot U^2(t) + q(t)$$

Откуда мгновенная реактивная мощность  $q(t)$  электровоза определится как

$$q(t) = p(t) - \frac{P}{U^2} U^2(t) = U(t)I(t) - \frac{P}{U^2} U^2(t). \quad (17)$$

Так как  $q(t)$  определяет скорость изменения электромагнитной энергии в системе, это значит, что в интервалы времени, когда  $q(t) \neq 0$  (рис. 8), между электровозом и контактной сетью (как источником) происходят процессы обмена электромагнитной энергией, а когда  $q(t) = 0$  они отсутствуют. На рис. 8 в качестве примера приведена кривая  $q(t)$ , рассчитанная по выражению (17).

Следовательно, коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока меньше единицы как за счёт реактивной мощности искажения (тягового тока и напряжения в контактной сети), так и вследствие реактивной обменной мощности, обусловленной нелинейными индуктивностями силовой цепи электровоза.

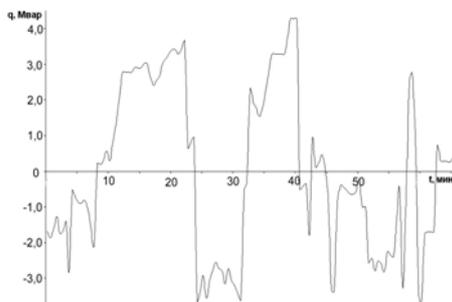


Рис.8

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 электрообо-

рудования 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 её компенсации неприменимы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том первый – Л.: Энергоиздат, 1981. – 534 с.
- [2] ДСТУ 2843–94 Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 20 с.
- [3] ДСТУ 3120–95 Електротехніка. Літерні позначення основних величин. – К.: Держстандарт України, 1995. – 23 с.
- [4] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
- [5] Электромагнитная совместимость электроприёмников промышленных предприятий / Под редакцией академика НАН Украины А.К. Шидловского. – К.: Наук. думка, 1992. – 236 с.
- [6] Донской Д.А., Литовченко В.В. Регулируемый компенсатор реактивной мощности для электровозов переменного тока // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава. Тезисы докладов. Новочеркасск, 2003. – С. 63-64.
- [7] Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
- [8] Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Стрелков В.Т., Яценко Ю.А. Баланс энергий в электрических цепях. – Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.
- [9] Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Современная концепция реактивной мощности // Вестник Приазовского государственного университета, Мариуполь, 1995. – С. 192-197.
- [10] Денисюк С.П. Загальні властивості енергетичних характеристик систем з перетворювачами електромагнітної енергії // Електроенергетика. Праці Інституту електродинаміки НАН України, Київ, 1999. – С. 46-59.
- [11] Денисюк С.П. Оцінка складових втрат електроенергії в системах електроживлення з нелінійними нестационарними перетворювачами електроенергії // Електроенергетика. Праці Інституту електродинаміки НАН України, Київ, 1999. – С. 61-71.
- [12] Демирчян К.С. Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций // Изв. РАН. Энергетика, 1992, №1, – С. 3-18
- [13] Саенко Ю.Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями // Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д.т.н., спец. 05.09.05 – теоретична електротехніка, НУ “Львівська політехніка”, Львів, 2003, 36 с.
- [14] 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.
- [15] Саенко Ю.Л. К вопросу о компенсации реактивной мощности в сетях с вентильными преобразователями // Изв. Вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2002, № 4. – С. 11–25

Поступила 14.10.2004