

Н. А. КОСТИН (ДИИТ)

## РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ В УСТРОЙСТВАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Викладено порівняльну характеристику різних понять і виразів визначення реактивної потужності в колах з несинусоїдними електричними величинами. Для перших українських електровозів типу ДЕ1 системи електричної тяги постійного струму визначено значення реактивної потужності за Будеані, за Фризе, а також диференціальної, інтегральної і узагальненої реактивних потужностей. Запропоновано заходи щодо зменшення її споживання електрорухомим складом постійного струму.

Изложена сравнительная характеристика различных понятий и выражений определения реактивной мощности в цепях с несинусоидальными электрическими величинами. Для первых украинских электровозов типа ДЭ1 системы электрической тяги постоянного тока определены значения реактивной мощности по Будеани, по Фризе, а также дифференциальной, интегральной и обобщённой реактивных мощностей. Предложены мероприятия по уменьшению её потребления электроподвижным составом постоянного тока.

A comparative characteristic of different concepts and expressions for determination of reactive power in the circuits with non-sinusoidal electric values has been given. For the first Ukrainian electric locomotives of DE1 type with the system of DC electric traction, the values of reactive power after Budeany, Fryze, and also the differential, integral and generalized reactive powers have been determined. Some measures on reducing its consumption by the DC electric rolling stock have been suggested.

### Введение

Решение проблемы эффективности электропитания и электропотребления в системах электрической тяги немислимо без оценки технологических потерь электрической энергии при её транспортировке до электроподвижного состава (ЭПС). Как известно, эти потери  $\Delta P$  в проводах питающей линии электропередач и тяговой сети определяют по выражению

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R, \quad (1)$$

где  $P$  и  $Q$  – потребляемые нагрузкой активная и реактивная мощности;

$U$  – действующее значение напряжения сети;

$R$  – эквивалентное активное сопротивление проводов питающей электросети.

Наиболее сложной задачей применения выражения (1) является определение реактивной мощности  $Q$ , т.к. известны неоднозначность понятий и формул её нахождения в электрических цепях с несинусоидальным напряжением и током [1]. Основными признаками наличия реактивной мощности в указанных цепях, характерных также для систем электрической тяги, являются [2]: неравенство активной и полной мощностей нагрузки ( $P \neq S$ ); отличие от нуля угла сдвига фаз между входными напря-

жением и током ( $\varphi^{(k)} = 0$ ); наличие возврата электроэнергии из нагрузки в источник; изменение во времени входного мгновенного сопротивления нагрузки. В наибольшей степени (по их количеству) указанным признакам отвечают понятия и выражения реактивной мощности по К. Будеани  $Q_B$  [3], по С. Фризе  $Q_F$  [4], а также дифференциальная  $Q_d$ , интегральная  $Q_I$  и обобщённая  $Q_{ог}$  реактивные мощности [1]. До настоящего времени численное сравнение значений и возможность использования указанных мощностей в научных публикациях отсутствует не только для систем электрической тяги, но и для электросистем промпредприятий. Поэтому целью настоящей работы является, хотя бы частичное, восполнение указанного пробела для системы электрической тяги постоянного тока.

### Теоретические предпосылки

Наиболее ранним понятием и выражением реактивной мощности в цепях несинусоидального тока является понятие и формула, известные из теоретической электротехники и современной практики и представляющей собой алгебраическую сумму реактивных мощностей всех гармоник ряда Фурье напряжения и тока:

$$Q_B = Q^{(1)} + Q^{(2)} + \dots + Q^{(k)} + \dots + Q^{(n)} =$$

$$= \sum_{k=1}^n U^{(k)} \cdot I^{(k)} \cdot \sin \varphi^{(k)}. \quad (2)$$

Эта формула предложена К. Будеани [3] и поэтому  $Q_B$  называют реактивной мощностью по Будеани или мощностью сдвига. Она обусловлена сдвигом по фазе между «одноимёнными» гармониками напряжения и тока. Понимая, что в (2) не учитываются «разноимённые» гармоники напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$  вследствие искажения формы  $i(t)$ , автор [3] ввёл понятие мощности искажения  $D$  и определил её как:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q_B^2)}. \quad (3)$$

Дальнейшим важным развитием «проблемы определения реактивной мощности» является концепция С. Фризе [4], направленная на сохранение существующего классического функционального характера описания энергетических свойств электрических цепей при синусоидальных и несинусоидальных процессах. С этой целью С. Фризе предложил использовать также (как и в цепях синусоидального тока) только две составляющих полной мощности: активную  $P$  и неактивную (реактивную по Фризе)  $Q_\Phi$  мощности, определяя последнюю по выражению:

$$Q_\Phi = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (4)$$

Величину  $Q_\Phi$  физически можно представить как мощность, среднее значение которой за период равно нулю и которая отвечает энергии, колеблющейся между источником и нагрузкой. При определении  $P$  и  $Q_\Phi$  С. Фризе исходил из разложения тока  $\underline{I}$  на две ортогональные составляющие ( $\underline{I} = I_p + j \cdot I_Q$ ), одна из которых  $I_p$  находится в фазе с напряжением и определяет  $P$  ( $P = U \cdot I_p$ ), а другая —  $I_Q$  ортогональная к напряжению и определяет  $Q_\Phi$  ( $Q_\Phi = U \cdot I_Q$ ). Т.е., мощность  $Q_\Phi$  характеризует степень отклонения действующего значения тока от его минимального возможного значения при данных  $U$  и  $P$ . Из сравнения выражений (2) и (4) вытекает, что реактивная мощность по Будеани учитывает лишь ту часть консервативного энергопроцесса, которая обуславливает перекрытие спектров гармоник напряжения и тока.

О. Маевским [5] для цепей с несинусоидальными электрическими величинами пред-

ложено понятие приведенной (или дифференциальной) реактивной мощности, определяемой как:

$$Q_d = \frac{\omega}{\omega_\Pi} \cdot \sum_{k=1}^n k \cdot Q^{(k)}, \quad (5)$$

где  $Q^{(k)}$  — реактивная мощность « $k$ -ой» гармоники;

$\omega$  — частота основной гармоники;

$\omega_\Pi$  — постоянный коэффициент ( $c^{-1}$ ), названный частотой приведения.

Если в качестве  $\omega_\Pi$  выбрать частоту  $\omega$ , тогда дифференциальная реактивная мощность определится выражением:

$$\begin{aligned} Q_d &= \sum_{k=1}^n k \cdot Q^{(k)} = \\ &= \sum_{k=1}^n k \cdot U^{(k)} \cdot I^{(k)} \cdot \sin \varphi^{(k)}. \end{aligned} \quad (6)$$

В [1] также рассматривается подобная выражению (6) формула так называемой интегральной реактивной мощности  $Q_J$ :

$$\begin{aligned} Q_J &= \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \cdot Q^{(k)} = \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \cdot U^{(k)} \cdot I^{(k)} \cdot \sin \varphi^{(k)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Основываясь на понятиях дифференциальной и интегральной мощностей, авторы работ [6], [1], [7] предложили понятие так называемой обобщённой реактивной мощности  $Q_{об}$ :

$$Q_{об} = \sqrt{Q_d \cdot Q_J}. \quad (8)$$

Как вытекает из вышеприведенного анализа, большинство авторов в своих предложениях по определению реактивной мощности исходят из понятий ортогональной системы мощностей  $P$ ,  $Q$ ,  $S$ , что часто и приводит к неоднозначным, порой противоречивым, выводам относительно энергопроцессов, протекающих в системе.

В качестве сравнения определим по выражениям (1), (4), (6) — (8) значения реактивной мощности, потребляемой ЭПС постоянного тока.

## Результаты численных расчётов и их анализ

Количественная оценка значений реактивной мощности и коэффициента реактивной мощности  $\text{tg } \varphi$  была выполнена для первых

украинских электровозов постоянного тока ДЭ1, эксплуатирующихся на Приднепровской железной дороге. Временной интервал  $\Delta t$  дискретизации каждой реализации случайных процессов напряжения на токоприёмнике  $U(t)$  и

тягового тока  $I(t)$ , опытно зарегистрированных в 40 поездках, составлял 1 с. Результаты расчётов для 20 поездок представлены в табл. 1.

Таблица 1

№№ поездок	Активная мощность $P$ , $\times 10^6$ , Вт	Полная мощность $S$ , $\times 10^6$ , ВА	Реактивная мощность					Коэффициент реактивной мощности $\text{tg } \varphi$
			по Будеани $Q_B$ , $\times 10^4$ , вар	по Фризе $Q_\Phi$ , $\times 10^6$ , вар	дифференциальная $Q_d$ , вар	интегральная $Q_J$ , $\times 10^4$ , вар	обобщённая $Q_{об}$ , $\times 10^4$ , вар	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2,574	3,285	-4,982	2,041	$1,034 \cdot 10^5$	-3,872	6,328	0,793
2	1,932	2,381	3,53	1,392	$-1,792 \cdot 10^4$	2,655	2,181	0,720
3	3,208	3,906	-4,679	2,229	$-1,438 \cdot 10^5$	-2,81	6,357	0,695
4	1,754	2,263	3,346	1,442	$-1,239 \cdot 10^4$	2,516	1,766	0,822
5	2,694	3,441	4,556	2,14	$7,98 \cdot 10^3$	3,284	1,619	0,794
6	1,636	2,067	1,146	1,265	$-2,825 \cdot 10^4$	1,301	1,917	0,773
7	3,059	3,801	2,684	2,257	$2,227 \cdot 10^5$	2,464	7,408	0,738
8	1,798	2,278	-2,03	1,399	$-5,918 \cdot 10^4$	-2,421	3,785	0,778
9	2,202	2,783	2,642	1,701	$2,395 \cdot 10^4$	2,193	2,292	0,773
10	1,709	1,982	1,531	1,005	$4,83 \cdot 10^4$	1,002	2,2	0,585
11	2,616	3,389	2,63	2,154	$-2,572 \cdot 10^3$	2,803	8,49	0,823
12	1,846	2,242	2,314	1,273	$1,45 \cdot 10^5$	4,924	2,673	0,682
13	2,233	2,791	-2,264	1,674	$-3,875 \cdot 10^4$	-1,927	2,732	0,750
14	1,829	2,129	-1,089	1,09	$-5,97 \cdot 10^4$	-1,066	2,523	0,595
15	1,302	1,531	2,8	1,047	$4,855 \cdot 10^4$	3,855	1,372	0,804
16	2,541	3,157	-0,901	1,874	$9,853 \cdot 10^4$	-3,065	1,738	0,738
17	1,769	2,036	2,592	1,008	$9,556 \cdot 10^4$	2,446	4,834	0,570
18	2,054	2,58	2,58	1,561	$2,513 \cdot 10^5$	1,12	1,678	0,760
19	2,09	2,466	0,6023	1,309	$1,673 \cdot 10^5$	-3,552	2,438	0,626
20	2,478	3,124	-1,854	1,891	$-1,048 \cdot 10^5$	1,195	3,538	0,763

Из таблицы вытекает, что значения и знаки реактивной мощности, рассчитанные по разным предложенным формулам, существенно различаются. При этом наибольшие значения получены для  $Q_\Phi$  (столбец 5), вероятно, вследствие того, что, в отличие от остальных реактивных мощностей, величина  $Q_\Phi$  содержит две составляющих: мощность накопления (обмена) и мощность искажения. Мощность обмена обусловлена накоплением энергии в нелинейных индуктивностях силовых цепей электровоза и представляет собой обменную энергию между

этим индуктивностями и индуктивными и емкостными элементами подстанционных электрических фильтров.

Отрицательные значения реактивных мощностей  $Q_B$ ,  $Q_d$  и  $Q_J$  (столбцы соответственно 4, 6 и 7) обусловлены не знаками напряжения и тока (эти функции положительны), а отрицательным значением («отстающим» характером) угла сдвига фаз  $\varphi^{(k)}$  между « $k$ »-ми гармониками напряжения и тока.

Величина реактивной мощности, потребляемая электровозами ДЭ1, является случайной

величиной даже для одного и того же номера электровоза и зависит от массы поезда, профиля участка, квалификации машиниста, интервала и режима ведения поезда. Коэффициент реактивной мощности электровозов  $\operatorname{tg} \varphi$  (столбец 9) рассчитанный по  $Q_{\phi}$ , близкий единице (т.е.  $Q_{\phi} \approx P$ ), а коэффициент мощности  $\lambda$  колеблется в пределах 0,75...0,87, что является достаточно низким для ЭПС постоянного тока.

### Выводы

1. Ни классическое, приводимое в учебниках по теоретической электротехнике, выражение реактивной мощности, ни формулы для дифференциальной, интегральной и обобщённой реактивных мощностей не вытекают из физической сущности реально протекающих энергетических процессов и поэтому их применение неприемлемо для цепей с несинусоидальными электрическими величинами.

2. Из рассмотренных понятий реактивной мощности наиболее приемлемой для составления энергетического баланса и оценки потерь активной энергии в устройствах систем электрической тяги является концепция и выражение реактивной мощности по Фризе.

3. Электровозы постоянного тока являются мощными потребителями реактивной мощности, обуславливающие активные потери в тяговой сети и снижающие качество электроэнергии в системах электротяги.

4. Уменьшение потребления реактивной мощности ЭПС постоянного тока возможно в результате применения следующих мероприятий:

- установки непосредственно на ЭПС компенсирующих устройств реактивной мощности;
- повышения загрузки тяговых двигателей за счёт рационального планирования весов поездов;

- ограничения времени работы электровоза в режиме выбега;
- замены мощных электровозов менее мощными для каждой конкретной железной дороги.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баланс энергии в электрических цепях [Текст] / В. Е. Тонкаль [и др.] – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
2. Костин, Н. А. Неактивная мощность и дополнительные потери в электроподвижном составе постоянного тока [Текст] / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2007. – № 8 (141). – Ч. 2. – С. 49-53.
3. Budeany, C. Problème de la présence des puissances réactives dans les installations de production et distribution d'énergie électrique [Text] / C. Budeany // Rap. et discuss. Sur la puissance réactive. – 1929. – Pt. 3. – P. 117-218.
4. Fryze, S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusformigen Verlauf von Strom und Spannung [Text] / S. Fryze // Elektrotechn. Z. – 1932. – 25. – S. 596-599; 26. – S. 625-627; 29. – S. 700-702.
5. Маевский, О. А. Приведенная реактивная мощность цепей с нелинейными элементами [Текст] / О. А. Маевский, Ю. П. Гончаров // Электричество. – 1967. – № 3. – С. 22-27.
6. Крогерис, А. Ф. Ортогональные составляющие кажущейся мощности в несимметричных несинусоидальных системах [Текст] / А. Ф. Крогерис, Е. П. Трейманис // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1983. – № 3. – С. 72-82.
7. Крогерис, А. Ф. Мощность переменного тока [Текст] / А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевиц, Я. К. Шинка. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.

Поступила в редколлегию 29.04.2010.

Принята к печати 18.05.2010.