

УДК 621.311

**ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ****БАЛАМЕТОВ А.Б., ХАЛИЛОВ Э.Д., ИСАЕВА Т.М.***АзНИИЭ и ЭП, АГНА*

Реферат. При несинусоидальных режимах вновь проявляется интерес к определению полной, реактивной и мощности искажения. Понятие «реактивная мощность» и ее определение является предметом споров. К настоящему времени строгое определение реактивной мощности имеется для случая синусоидального режима в однофазной цепи. Одной из актуальных проблем для энергосистем является определение реактивной мощности при несинусоидальных режимах. В данной работе рассматриваются сопоставления результатов определения реактивной мощности разными методами.

Понятие активной мощности, независимо от форм кривых тока и напряжений, определяется однозначно. Понятие полной мощности по смыслу является производной от активной мощности и определяется из положения передачи максимально возможной активной мощности при заданных значениях синусоидального тока и напряжения. Реактивная мощность определяется формально, через выражения активной и полной мощностей. Однако, при анализе работы электрических сетей и оценки работы электроэнергетического оборудования, большое значение имеет значение реактивной мощности и энергии, которое показывает степень использования возможностей элементов сети. Понятие реактивной мощности имеет еще большее значение при расчете распределения потоков энергии по электрическим сетям. Отсутствие строгой методической основы для определения реактивной мощности привело к разработке многочисленных подходов к определению этой величины [1-11].

В [1] отмечается ошибочность определения реактивной мощности как суммы различных гармоник и последовательностей.

В [2] было предложено понятие вторичной мощности (и энергии), направленной от потребителя в сеть. Такой подход позволяет определить источник нарушения качества энергии и уточнить потери мощности и энергии.

В [3,4] предлагается использовать интегральные выражения от произведения тока на функцию, ортогональную напряжению, либо наоборот.

В [5] и [6] предложено связать реактивную мощность с обменными процессами.

В [8] вводятся понятия и предлагается метод расчета мощности искажения, мощности пульсаций (вызванной токами обратной последовательности), скрытой мощности (вызванной токами нулевой последовательности), эквивалентной реактивной мощности, действительного коэффициента мощности.

В [9] динамические и энергетические показатели при несинусоидальных и несимметричных режимах предлагается определить по мгновенным значениям токов и напряжений.

В [10] предлагается метод расчета мощности и энергии искажения на основе мгновенных значений напряжения и тока гармоник как мощности и энергии, искажающих синусоидальный характер переменной составляющей мощности основной гармоники.

В [11] предлагается измерение реактивной мощности по действующим значениям реактивной мощности гармоник.

1. Определение реактивной мощности для синусоидального режима.

Для синусоидального режима реактивная и полная мощности определяются точно, и эти понятия дополняют друг друга.

$$\text{Если } u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

то для средней за период мощности имеем

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos(\psi_u - \psi_i) = UI \cos \varphi.$$

В электротехнике, по аналогии с активной мощностью, введено понятие реактивной мощности для синусоидального режима в линейной электрической цепи.

$$Q = UI \sin \varphi$$

Формула была введена формально, лишь по аналогии с формулой активной мощности и поэтому не отражает физики обменного процесса.

2. Определение реактивной мощности по действующим значениям тока и напряжения.

Понятие «реактивная мощность» определено только для синусоидального режима в линейной электрической цепи, что не позволяет без серьезных допущений производить анализ режимов работы энергосистемы с потребителями, искажающими форму тока и напряжения.

Средняя мощность периодического несинусоидального тока, состоящего из гармоник, равна сумме средних мощностей всех гармонических составляющих [7]:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots$$

По аналогии реактивная мощность определяется

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots \quad (1)$$

Для использования формулы (1) для токов и напряжений, представленных несинусоидальными функциями, требуется разложение этих функций в ряд Фурье.

Для полной мощности имеем [7]

$$S = UI = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots} \times \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$

В общем случае

$$S^2 \neq P^2 + Q^2.$$

Квадрат полной мощности не равен сумме квадратов активной и реактивной мощностей. В связи с этим неравенством вводят еще один вид мощности, характеризующий различие в форме кривых тока и напряжения; эту мощность называют мощностью искажения

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

3. Определение реактивной мощности по вольтамперной характеристике.

Для нелинейной электрической цепи понятие реактивной мощности не определено. Поэтому при решении некоторых практических задач были предприняты попытки, использовать интегральные выражения для оценки консервативных процессов [3,4]. Эти выражения представляют собой интегралы либо от произведения тока на функцию, ортогональную напряжению, либо наоборот. Такой, по существу формальный, подход привел к появлению двух совершенно равноправных интегральных выражений

$$Q = -\frac{1}{\omega T} \int_0^T i \frac{du}{dt} dt = \frac{1}{\omega T} \int_0^T u \frac{di}{dt} dt; \quad (2)$$

При синусоидальном режиме эта формула приводит к одинаковому результату с (1). Однако для несинусоидального режима в линейной цепи формула (2) дает

$$Q = \sum_{k=0}^n kQ_k \quad (3)$$

где k – номер гармоники.

Интегральные формулы позволяют определить реактивную мощность без разложения несинусоидальной функции в ряд Фурье. Рассмотрим вольтамперную характеристику по мгновенным значениям. Как известно, ее площадь для синусоидального режима в линейной цепи можно определять следующим образом:

$$Q = \frac{1}{2\pi} \oint u di. \quad (4)$$

Следовательно, вольтамперная характеристика по мгновенным значениям отражает интенсивность консервативных процессов, протекающих в электросистемах.

Для несинусоидального режима в линейной цепи имеем

$$\oint u di = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^n U_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ku}) \left[\sum_{k=1}^n I_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ki}) \right]' dt = 2\pi \sum_{k=1}^n kQ_k. \quad (5)$$

Энергетическая неэквивалентность реактивной мощности различных частот делает использование выражения (1) для определения реактивной мощности при частотных преобразованиях нерациональным. Поэтому в [3] рекомендуют использовать понятие приведенной реактивной мощности

$$Q_{\Pi} = \frac{\omega}{\omega_{\Pi}} \sum_{k=0}^n kQ_k \quad (6)$$

где ω_{Π} – частота приведения.

4. Определение реактивной мощности по мгновенным значениям тока и напряжения.

Наиболее общей формулировкой пространственно-временных преобразований электромагнитной энергии является теорема Умова-Пойнтинга, которая позволяет количественно характеризовать энергетический обмен при произвольно изменяющихся во времени токах и напряжениях

$$\oint \Pi ds = p_0 + \frac{\partial w}{\partial t} = p = ui$$

Мгновенная мощность показывает величину и направление движения потока электромагнитной волны сквозь поверхность в данный момент времени. Наличие знакопеременности мощности означает изменение направления движения этого потока.

Накопленную потребителем электромагнитную энергию можно определить по мгновенным значениям мощности и ее среднему значению P из следующих соображений [5,6]. Допустим, в течение времени t^+ энергия источника в нагрузке в каждый момент преобразуется в иные формы p_0 и запасается в накопителях электромагнитной энергии. В течение времени t^- происходит возврат энергии, энергия в каждый момент времени преобразуется в иные виды p'_0 , причем этот процесс идет за счет энергии, запасенной в накопителях электромагнитной энергии.

Аналогично активной мощности, интенсивность обменных процессов – обменная мощность определяется при помощи усреднения обменной энергии за рассматриваемый промежуток [5,6]

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} p_0(t) dt, \quad P'_0 = \frac{1}{T} \int_0^{t^-} p'_0(t) dt, \quad (7)$$

$$P^+ = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} p^+(t) dt, \quad P^- = \frac{1}{T} \int_0^{t^-} p^-(t) dt,$$

$$t^+ \in t \text{ при } p \geq 0, \quad t^- \in t \text{ при } p < 0,$$

$$p^+ = p, \text{ если } p \geq 0, \quad p^- = p \text{ если } p \leq 0.$$

С учетом (7), для усредненного за период T значения обменной мощности получаем

$$P^+ = P_0 + \frac{dW}{dt}, \quad P^- = P'_0 - \frac{dW}{dt},$$

Отсюда для активной мощности следует

$$P = P^+ + P^- = P_0 + P'_0$$

Таким образом, для обменной энергии имеем равенство

$$W_{об} = W^+ \frac{t^-}{T} + W^- \frac{t^+}{T} = P^+ t^- + P^- t^+. \quad (8)$$

$$Q_{об} = \frac{W_{об}}{T}, \quad Q = \frac{2\pi}{T} W_{об} = \pi Q_{об}, \quad (9).$$

Определение реактивной мощности по выражениям (7-9) требует интегрирования за конечные повторяемые интервалы времени. Для расчета данных интервалов необходимо применить численные методы.

Сравнение методов оценки реактивной мощности.

Сопоставление результатов расчетов реактивной мощности в несинусоидальной цепи должно обосновываться на физике явления и должно аналитически и численно проверяться на тестовых примерах. Ниже приводятся тестовые примеры для проверки расчетов реактивной мощности в несинусоидальной цепи.

Пример 1. Электрическая цепь состоит из источника тока $i = I_m(\sin \omega t \pm (1/3)\sin 3\omega t)$, нагруженного на индуктивность L . Напряжение на источнике $u = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m (\cos \omega t \pm \cos 3\omega t)$.

На основании известного соотношения (1), независимо от знака третьей гармоники, получаем $Q = \frac{2}{3} \omega L I_m^2$. Реактивная мощность в соответствии с (5), пропорциональная площади вольтамперной характеристики, равна.

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \left(\frac{d}{dt} i(t) \right) dt = 1$$

На рис.1 приведены кривые мгновенной мощности при различных знаках третьей гармоники, $pm(x)$ при знаке плюс и $pp(x)$ при знаке минус. Используя рис.1, определяются пределы интегрирования для нахождения средней мощности по (7-9).

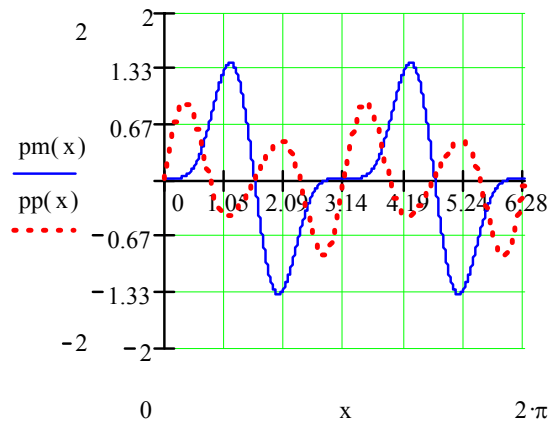


Рис.1.Кривые мгновенной мощности при различных знаках третьей гармоники

Значение интеграла для данного примера:
при положительном знаке перед третьей гармоникой тока

$$\int_0^{\pi/4} u(t) \cdot i(t) dt + \int_{\pi/2}^{3\pi/4} u(t) \cdot i(t) dt = 0.6667$$

при отрицательном знаке перед третьей гармоникой тока

$$\int_0^{\pi/2} u(t) \cdot i(t) dt = 0.8889$$

Сопоставим результаты расчета реактивной мощности по выражениям (1), (3) и (6).

Значения реактивной мощности в цепи с индуктивностью по выражениям (1) и (5) не зависят от знака третьей гармоники источника тока, а по выражениям (7-9) отличаются, и принимают разные значения. Значение реактивной мощности по известным выражениям (1) и по выражениям (7-9) [6] при знаке плюс перед третьей гармоникой получаются одинаковыми.

Результат по выражению (5), как и следовало ожидать, отличается, так как реактивная мощность по выражению (5) для третьей гармоники входит с коэффициентом $k=3$.

Пример 2. Электрическая цепь с параллельно встречными управляемыми тиристорами и активным сопротивлением $R=10$ Ом. Схема однофазной системы с синусоидальным напряжением $u(t) = 100 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$.

Угол включения тиристорov принят $\alpha=90^\circ$. На рис.2 приведены кривые мгновенной мощности.

Путем разложения в ряд Фурье для основной гармоники несинусоидального тока в цепи нагрузки получаем $i(t) = I_{m1} \cdot \sin(\omega t - \varphi_1)$.

$$I_{m1} = 8.37 \text{ A}, \quad I_I = 5.92 \text{ A}, \quad \varphi_1 = 32^\circ 30', \quad \cos \varphi_1 = 0.843, \quad \sin \varphi_1 = 0.537.$$

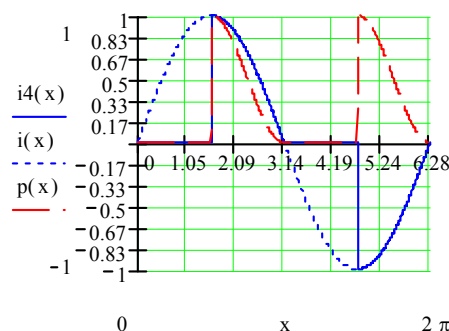


Рис. 2. Кривые мгновенных значений напряжения, тока и мощности в о.е.

Реактивная мощность по выражению (1) $Q = UI \sin \varphi_1 = 100 \cdot 5.92 \cdot 0.537 = 318 \text{ Вар}$.

Реактивная мощность по выражению (5) равна $Q = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u(t) \cdot \frac{d}{dt} i(t) dt = 318.3 \text{ Вар}$

Реактивная мощность по выражению (7-9) равна нулю. В [5-6] также указывается на отсутствие реактивной мощности в таких цепях. В [7] и [8] на основании полной мощности вычисляются $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$ и реактивная мощность. В [3] появление реактивной мощности, или так называемого мощности сдвига, связывают со свойствами цепи, вызывающими сдвиг по фазе основной гармоники тока нагрузки относительно синусоидального напряжения.

Пример 3. Электрическая цепь состоит из источника неограниченной мощности с синусоидальным напряжением $u=U_m \sin(\omega t)$, питающую нелинейную нагрузку ($f=50 \text{ Гц}$). Ток на входе нелинейной нагрузки имеет значение $i=I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3)$. Выражение для определения мощности искажения имеет вид $D = U_{1,m} \sin(\omega t) \cdot I_{3,m} \sin(\omega t + \varphi_3)$.

Расчеты произведены при $U_m=1$, $I_{m1}=1$, $I_{m3}=1/3$, $\varphi_1 = -\pi/2$ и изменении знака и фазового сдвига тока третьей гармоники. Результаты определения реактивной мощности и мощности искажения приведены в таблице.

Таблица.

	Знак I_{m3}	фазовый сдвиг, φ_3	$Q_{обм}$ по (7-9)	Средняя мощность
1	+	$\pi/2$	0.6666	0.4244
2	-	$\pi/2$	0.3333	0.2122
3	+	0	0.5444	0.3467
4	-	$\pi/4$	0.4287	0.2730
5	-	$\pi/25$	0.5271	0.3356

На рис. 3 приведены кривые тока при различных знаках третьей гармоники.

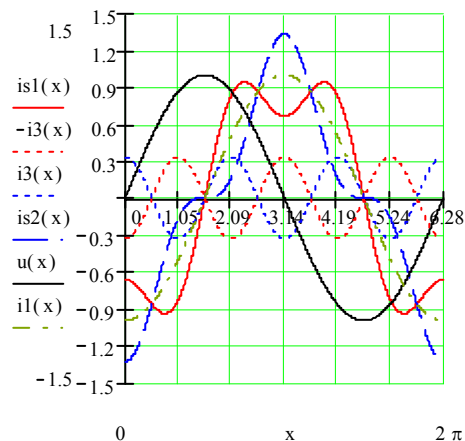


Рис. 3. Кривые тока при различных знаках третьей гармоники.

На рис. 4. приведены кривые обменной мощности и мощности искажения при различных знаках третьей гармоники.

Значения мощности, полученные по известным выражениям (1) не зависят от знака третьей гармоники и фазового сдвига тока третьей гармоники. При этом реактивная мощность основной гармоники $Q_1 = 0.5$, полная мощность $S=0.527$ и мощность искажения $T=0.1666$.

Только в частных случаях, для данного примера при $\varphi_1 = -\pi/2$ и знаке минус перед I_{m3} , значения мощности, полученные по (1) и (7-9), совпадают.

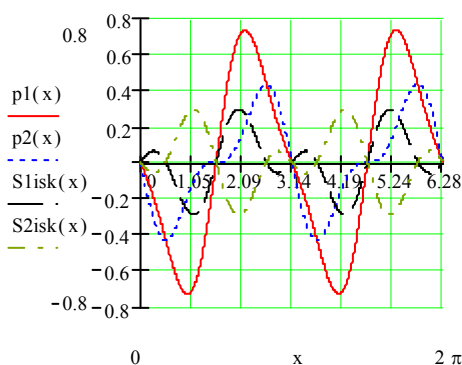


Рис. 4. Кривые обменной мощности и мощности искажения.

По выражениям (7-9) [6] обменная мощность в зависимости от знака и фазового сдвига тока третьей гармонике получает разные значения от 0.3333 до 0.6666 (табл.). Среднее значение модуля мощности также меняется в зависимости от знака и фазового сдвига тока третьей гармонике (табл.). Поэтому интенсивность обмена возможно оценить по среднему значению модуля мощности. Однако ее уровни при этом имеют относительно меньшие значения. Интенсивность обменных процессов, полученная по ее интегральным значениям, в отличие значения по (1), как и следовало ожидать, меняется в зависимости от знака и фазового сдвига тока гармоники.

В итоге можно утверждать, что оценки реактивной мощности по формулам (1) и (5) дают реактивную мощность даже при отсутствии в электрической цепи накопителей энергии. Однако, формула (5), в отличие формулы (1), позволяет определить реактивную мощность, минуя разложение кривых тока и напряжения в тригонометрические ряды.

Формулы (7-9) дают значения реактивной мощности, адекватные реальному значению. Это означает, что определение реактивной мощности для несинусоидальной цепи разложением в ряд Фурье и без анализа физики процессов обмена энергии в частных случаях может привести к противоречиям.

Реактивная мощность в некоторых электрических цепях обусловлена определенными свойствами, вызывающими сдвиг по фазе между кривыми токов и напряжений элементов цепи, определяющий непропорциональное изменение мгновенного тока при изменении мгновенного напряжения на выводах элемента. В схемах с управляемыми диодами эта составляющая полной мощности обусловлена смещением основной гармоники сетевого тока относительно напряжения. Эту составляющую мощности называют мощностью сдвига.

Заключение

1. Анализированы выражения для реактивной (обменной) мощности, позволяющей по кривым мгновенной мощности характеризовать процесс обмена мощности между генератором и нагрузкой. На тестовых примерах сопоставлены значения реактивной мощности по различным формулам.

2. Определение реактивной мощности для несинусоидальной цепи разложением в ряд Фурье и без анализа физики процессов обмена энергии может привести к противоречиям.

3. При определении реактивной мощности необходимо учитывать особенности объекта, физики процессов, и необходим индивидуальный подход в каждом конкретном процессе. В связи с этим, требуются уточнения по определению области применения для выражений реактивной мощности в линейных несинусоидальных цепях, в нелинейных цепях, в вентильных преобразователях и т.д.

1. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. М.: Энергия, 1975.
2. Зыкин Ф.А., Каханович В.С. Измерение и учет электрической энергии. М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляных преобразователей. – М.: Энергия, 1978.
4. Савиновский Ю.А., Королев С.Я., Стратонов А.В. К интегральному понятию «реактивная мощность». Изв. вузов. Энергетика. 1981, №7, с. 55-57 .
5. Демирчян К.С. Реактивная или обменная мощность. Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. 1984, №2.
6. Жарков Ф.П. Об одном способе определения реактивной мощности. Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. 1984, №2.
7. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М.:Л.; Госэнергоиздат, 1963.
8. Р. Дрехслер. Измерение и оценка качества электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Копылов И.П. К определению динамических энергетических показателей при несинусоидальном и несимметричном напряжении. Изв. АН Энергетика. 2001, №2.
10. Фархадзаде Э.М., Гулиев Г.Б. Расчет показателей несинусоидального режима узла нагрузки. Электричество. 2002, №8.
11. Агунов М.В., Агунов А.В., Вербова Н.М. Новый подход к измерению электрической мощности. - Промышленная энергетика. 2004. №2, с.30-33.

QEYRİ-SİNUSOİDAL REJİMLƏRDƏ REAKTİV GÜCÜN TƏYİN EDİLMƏSİ HAQQINDA

BALAMETOV A.B., XƏLİLOV E.D., İSAYEVA T.M.

Qeyri-sinusoidal rejimlərdə tam, reaktiv və təhrif gücünün təyin olunmasına yenidən maraq artmışdır. Reaktiv güc anlayışı və onun təyin olunması mübahisələr mənbəyinə çevrilib. Hal-hazırda reaktiv gücün dürüst təyini yalnız birləşli dövrlərdə sinusoidal rejimlər üçün mövcuddur. Odur ki, enerjisistemlərdə qeyri-sinusoidal rejimlərdə reaktiv gücün təyini aktual məsələlərdən biridir. Bu məqalədə reaktiv gücün təyin olunmasına vahid, fiziki nöqtəyə-nəzərdən baxılır.

ABOUT OF REACTIVE POWER DEFINITION IN NON-SINUSOIDAL MODES

BALAMETOV A.B., HALILOV E.D., ISAEVA T.M.

At non-sinusoidal modes interest to definition full, reactive and powers of distortion shown again. The concept a reactive power and its definition is a subject of disputes. To present time strict definition of a reactive power is present for a case of a non-sinusoidal mode in a single-phase circuit. Therefore one of actual problems for electric power systems is definition of a reactive power at non-sinusoidal modes. In the given work it is considered definitions active and a reactive power from uniform, physical positions.