

DOI: 10.17117/na.2017.04.03.166

<http://ucom.ru/doc/na.2017.04.03.166.pdf>

Поступила (Received): 27.04.2017

Смирнов А.И., Васильков О.С.
**Измерение реактивной энергии в распределенных
системах электроснабжения при наличии
высших гармоник**

Smirnov A.I., Vasilkov O.S.
**Measurement of reactive energy in distributed power
supply systems in the presence of higher harmonics**

В статье рассматриваются электронные счетчики реактивной энергии. Сравниваются показания различных типов счетчиков при наличии гармонических составляющих напряжения и тока в сети, а также оценивается погрешность измерений в зависимости от различных составляющих гармоник. Было показано, что высшие гармоники существенно влияют на показания различных типов счетчиков реактивной энергии, что может привести к нежелательным последствиям

Ключевые слова: высшие гармоники, счетчики, реактивная мощность

Смирнов Артем Иванович

Аспирант

Санкт-Петербургский горный университет
г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21
линия, 2

Васильков Олег Сергеевич

Магистр

Санкт-Петербургский горный университет
г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21
линия, 2

In this article electronic electricity meters are considered. Indications of various types of meters in the presence of harmonious components of voltage and a current in a circuit are estimated. The error of measurements depending on various making harmonics are compared. It has been shown that the higher harmonics essentially influence indications of various types of electricity meters of reactive energy that can lead to undesirable consequences

Key words: high harmonics, electricity meter, reactive power

Smirnov Artem Ivanovich

Graduate

Saint-Petersburg mining university
St. Petersburg, Vasilievsky ostrov, 21 liniya, 2

Vasilkov Oleg Sergeevich

Master

Saint-Petersburg mining university
St. Petersburg, Vasilievsky ostrov, 21 liniya, 2

При оплате электроэнергии предприятием учитывается как активная, так и реактивная составляющие электрической энергии, при этом необходимо их точное измерение. Все чаще в электрических сетях предприятий возникают высшие гармоники тока и напряжения, вызванные наличием нелинейной нагрузки, что в свою очередь приводит к таким проблемам, как нарушение правильной работы приборов и оборудования, сокращение сроков их службы, а также, что особенно важно, к неправильному учету реактивной энергии

приборами, входящими в систему автоматизированного контроля и учета электроэнергии. До недавнего времени для измерения энергии чаще всего применялись электродинамические счетчики энергии. На смену им пришли электронные счетчики. Достоинством последних является высокая стабильность, точность, расширенный набор измерительных функций, а также возможность передачи данных при дистанционных измерениях. На рынке приборов предлагается несколько типов электронных счетчиков реактивной энергии, работа которых основана на различных принципах, а иначе говоря – на различных видах уравнения. Необходимо отметить, что при синусоидальном напряжении и токе эти принципы эквивалентны и при измерении в пределах заданных классов точности при одних и тех же рабочих условиях они дают сравнимые результаты.

При наличии же высших гармоник в питающей сети показания счетчиков реактивной энергии разных типов могут быть различны, что ведет к увеличению или снижению оплаты за электроэнергию предприятием. Поэтому изучение вопроса совершенствования счетчиков и их сравнительный анализ при наличии гармонических искажений весьма актуален. Ряд публикаций по этой теме содержат, прежде всего, результаты экспериментальных исследований разных типов счетчиков [1-3]. Эксперименты выявили, что расхождения в показаниях различных типов счетчиков значительны (до 4 %). Это в условиях крупных предприятий является существенным фактором, влияющим на затраты на потребление электроэнергии.

Однако экспериментальные исследования, ограниченные техническими возможностями, не дают полного представления о закономерностях изменения погрешностей измерений. Поэтому была поставлена цель – дополнить экспериментальные исследования теоретическими для получения более полной картины в области измерения реактивной мощности при наличии искажений. В настоящей работе приведены результаты исследований, позволяющие оценить расхождение показаний разных типов счетчиков при различном составе гармоник в токе и напряжении, включая учет разности фаз между ними на фиксированных гармониках. Общий принцип измерения реактивной энергии приведен на рис.1. В зависимости от типа счетчиков в блок-схеме изменяется блок «Вычисление».



Рис. 1. Экспериментальная блок-схема измерения реактивной энергии путем аналого-цифрового преобразования величин напряжения и тока и последующей реализации математических формул реактивной мощности и энергии

Рассматриваются три наиболее распространенных типа счетчиков реактивной энергии, отличающихся «измерительными» уравнениями. Для первого типа счетчиков математическое выражение реактивной мощности имеет вид:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i\left(t + \frac{T}{4}\right) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots \right] \times \\ \times \left[I_1 \sin(\omega t + 90) + I_2 \sin(2\omega t + 180) + I_3 \sin(3\omega t + 270) + \dots \right] dt = \\ U_1 I_1 \sin \varphi_1 - U_2 I_2 \cos \varphi_2 - U_3 I_3 \sin \varphi_3 + U_4 I_4 \cos \varphi_4 = Q_1 - P_2 - Q_3 + P_4 + \dots, \quad (1)$$

где $u(t)$, $i(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока; T – период первой гармоники; U_i , I_i – амплитудные значения напряжения и тока для i -й гармоники; ω – частота первой гармоники; t – текущее время; Q_k , P_j – реактивная и активная мощности соответственно на k -й и j -й гармониках; φ_i – разность фаз между напряжением и током на i -й гармонике.

В этом случае производится сдвиг времени на четверть периода для тока $-i\left(t + \frac{T}{4}\right)$.

В блоке «Вычисление» определяется численное значение при помощи математической формулы реактивной мощности. Кроме того, для первого типа счетчиков реализуется сдвиг фазы напряжения или тока на 90° . Однако при наличии гармонических искажений или нарушений качества энергии, поскольку фазовый сдвиг применяется к искаженной форме волны напряжения или тока, получаются разные значения. Это ограничивает применение этого подхода к случаям, когда нет искажений; в противном случае реактивная мощность, полученная в этом случае, не имеет прямого физического смысла и поэтому не может быть отнесена к какой-либо реактивной мощности

Для второго типа счетчиков математическое выражение реактивной мощности имеет вид:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \omega \left(- \int u(t)i(t) dt \right) = \frac{1}{T} \int_0^T \omega \int (-U_1 \sin \omega t - U_2 \sin 2\omega t - U_3 \sin 3\omega t - \dots) \times \\ \times (I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + I_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots) dt dt = \\ U_1 I_1 \sin \varphi_1 + \frac{U_2 I_2 \sin \varphi_2}{2} = Q_1 + \frac{Q_2}{2} + \frac{Q_3}{3} + \dots \quad (2)$$

Для третьего типа счетчиков математическое реализуется следующее математическое выражение:

$$Q = \left\{ \sum_0^T \left[\frac{nT}{\omega} \int_0^t i_n(t) \left(\int u_n(\tau) dt \right) dt \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \sum_1^{\infty} \left[\frac{nT}{\omega} \int_0^t I_n(\omega t) \left(\int U_n(\omega t + \varphi) dt \right) dt \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \\ = (Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

где n – номер соответствующей гармоники тока и напряжения.

На основе приведенных уравнений в дальнейшем производились расчеты показаний приборов учета реактивной энергии, которая будет представлена реактивной мощностью. Для получения реальной картины искажений, возникающих при работе частотно-управляемых приводов, были использованы данные

экспериментальных исследований АД, проведенных авторами совместно со специалистами ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии». Полученные результаты были приняты за исходные данные и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные о гармониках напряжения и тока на входе частотно-управляемого электропривода

Номер гармоники	Напряжение, U		Ток, I		Фазовый сдвиг между током и напряжением φ , град.
	Амплитуда	Фаза, град.	Амплитуда	Фаза, град.	
1	532,99	38,01	71,269	-31,52	69,53
5	61,66	-0,82	15,447	-2,25	1,43
7	38,72	60,74	7,129	-10,38	71,12

Для определения закономерности изменения показаний разных типов счетчиков в зависимости от изменения гармонического состава тока и напряжения было принято, что зависимости будут формироваться при следующих условиях:

- 1) величины первой гармоники тока и напряжения остаются неизменными, согласно исходным данным;
- 2) изменяется произведение $U_5 I_5$ при постоянном произведении $U_7 I_7$, либо наоборот. При этом разность фаз между током и напряжением остается неизменной;
- 3) при постоянстве действующих значений всех гармонических составляющих тока и напряжения поочередно меняется угол сдвига фаз между напряжением и током сначала пятой гармоники, затем седьмой от 0 до 90°.

За базисные величины приняты: $Q_0 = 335000$ вар, $U_{\omega} I_{\omega} = 2000$ ВА. Для примера на рис. 2 приведены зависимости реактивной энергии от угла сдвига фазы на пятой гармонике.

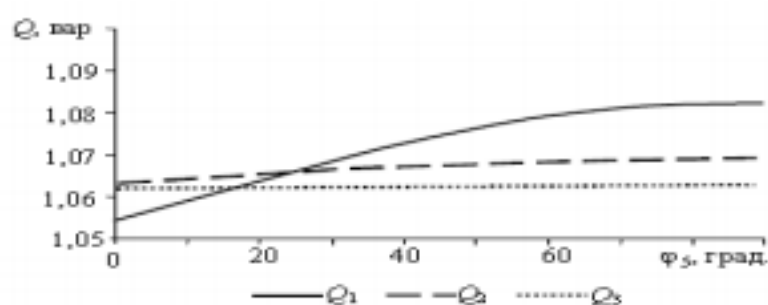


Рис. 2. Зависимость показаний трех типов счетчиков (1,2,3) при изменении угла сдвига фаз между напряжением и током на 5-ой гармонике

На основе полученных результатов была рассчитана относительная погрешность для четырех зависимостей:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} = \frac{x_i - x_j}{x_j}, \quad (4)$$

где x_i и x_j – большее и меньшее из сравниваемых показаний соответственно.

Для примера на рис. 3 приведены зависимости погрешности от угла сдвига фазы между током и напряжением на пятой гармонике для трех типов счетчиков.

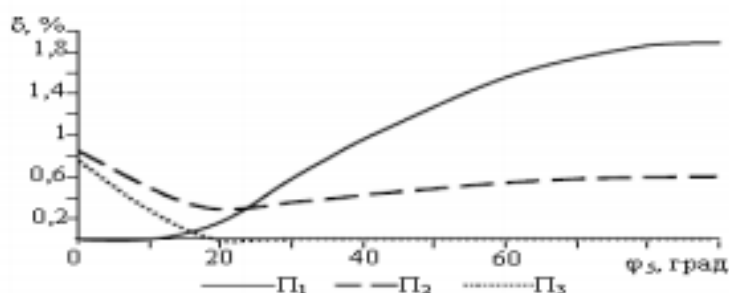


Рис. 3. Зависимость погрешности трех типов счетчиков (1,2,3) при изменении угла сдвига фаз между напряжением и током на 5-ой гармонике

Максимальные значения рассчитанных погрешностей в процентах представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные значения погрешностей трех типов счетчиков реактивной энергии(мощности) от угла сдвига фаз на 5-й и 7-й гармониках

Тип счетчика	Максимальная погрешность, %, При изменении			
	$U_5 I_5$	$U_7 I_7$	φ_5	φ_7
1-й	--	--	1,9	0,07
2-й	0,84	6,36	0,84	0,84
3-й	0,75	5,69	0,74	0,72

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) выявлено, что наличие гармонических искажений в токе и напряжении питающей сети значительно сказывается на показаниях счетчиков реактивной энергии и зависит как от амплитуд различных гармоник тока и напряжений, так и от угла сдвига фаз;

2) определено, что относительная погрешность измерения различными типами счетчиков при определенном соотношении гармоник и величине сдвига фаз между напряжением и током на исходной гармонике может значительно превышать погрешность самого прибора и достигать 6,35%. Это существенный фактор, который следует учитывать при оплате за электроэнергию;

3) установлено, что наибольшее влияние на погрешность измерения имеют амплитуды гармоник (более 6%). Разность фаз приводит к ошибке до 2%.

Выполненные теоретические исследования подтверждают ряд экспериментальных данных, полученных в реальных условиях нагрузки. Однако

теоретические исследования показали, что погрешность может быть и больших значений, чем это было установлено при эксперименте.

Список используемых источников:

1. Азунов М.В., Азунов А.В., Вербова Н.М. Новый подход к измерению электрической мощности // *Промышленная энергетика*. 2004. № 2.
2. Барбаро П.В., Каталиотти А., Козентино В., Нуксио С. Новый подход к идентификации нагрузок, создающих помехи, основанные на реактивных мощностях // *Электроснабжение*. 2007. Т.22. № 3.
3. Барбаро П.В., Каталиотти А., Козентино В., Нуксио С. Характеристики счетчиков реактивной энергии в системах электроснабжения с искажениями // *Метрология для стабильного развития*. Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2006.

© 2017, Смирнов А.И., Васильков О.С.

Измерение реактивной энергии в распределенных системах электроснабжения при наличии высших гармоник

© 2017, Smirnov A.I., Vasilkov O.S.

Measurement of reactive energy in distributed power supply systems in the presence of higher harmonics