

Ю.Е.БУНТЕЕВ, студент, *yuriybunteev@mail.ru*
А.К.РАДКОВСКИЙ, студент, *radenergy@mail.ru*
В.А. КУЗНЕЦОВ, студент, *russelman@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

Y.E.BUNTEEV, student, *yuriybunteev@mail.ru*
A.K.RADKOVSKIY, student, *radenergy@mail.ru*
V.A.KUZNETSOV, student, *russelman@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

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 при оплате электрической энергии потребителем.

Ключевые слова: высшие гармоники, счетчики, реактивная мощность, качество электрической энергии.

MEASUREMENT OF REACTIVE POWER IN ELECTRIC CIRCUITS WITH HIGHT HARMONICS

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 at payment of electric energy by the consumer.

Ключевые слова: high harmonics, electricity meter, reactive power, quality of electric energy.

Оплата за электроэнергию в настоящее время производится с учетом как активной, так и реактивной энергии. В связи с этим необходимо их измерение, причем в условиях быстро изменяющегося технического оснащения предприятий.

Зачастую новые типы оборудования приводят к нежелательным явлениям в электрических сетях: возникновению высших гармоник в токе и напряжению питанияющей сети вследствие применения вентильных преобразователей в управлении электроприводами – все это способствует усложнению учета энергии.

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.

Как правило, действие электромеханических счетчиков для измерения реактивной энергии основано на использовании счетчика активной энергии и устройства для сдвига фазы напряжения на 90° . В трехфазных

системах измерение реактивной энергии осуществляется при соответствующем подсоединении токовых выводов и выводов напряжения в счетчиках активной энергии. Действие электронных счетчиков основано на реализации «измерительного» уравнения, введенного в его микропроцессор при заданной конфигурации присоединения прибора к сети.

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.

Однако при появлении высших гармоник в токе и напряжении в системах электроснабжения счетчики реактивной энергии могут давать разные показания, что может привести к различным затратам на энергию при оплате ее предприятием.

Поэтому чрезвычайно актуальным является изучение вопроса технических характеристик этих счетчиков и их сравнительный анализ при наличии гармонических искажений.

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 авторами 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.

В работе рассматривается три наиболее распространенных типа счетчиков реактивной энергии, отличающихся «измерительными» уравнениями.

Для первого типа счетчиков математическое выражение реактивной мощности имеет вид

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

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 – $(i[t + (\pi/4)])$.

Соответствующая блок-схема измерения реактивной энергии для этого случая на основе аналого-цифрового преобразования приведена на [рис.1](#).

Для второго типа счетчиков математическое выражение реактивной мощности имеет вид

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

Для третьего типа счетчиков математическое выражение имеет вид



Рис.1. Блок-схема измерения реактивной энергии путем аналого-цифрового преобразования напряжения и тока, цифрового поворота фазы напряжения или тока на 90°



Рис.2. Экспериментальная блок-схема измерения реактивной энергии путем аналого-цифрового преобразования напряжения и тока и последующей реализации математических формул реактивной мощности и энергии

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

где n – номер соответствующей гармоники тока и напряжения.

Блок-схема измерения реактивной энергии, соответствующая второму и третьему типам счетчиков, представлена на [рис.2](#).

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:

Номер гармоники	1	5	7
Амплитуда U_a	532,99	61,66	38,72
Фаза ϕ_{ia} , град.	38,01	-0,82	60,74
Амплитуда ϕ_{ia}	71,269	15,447	7,129
Фаза ϕ_{ia} , град.	-31,52	-2,25	-10,38
ϕ , град.	69,53	1,43	71,12

Для определения закономерности изменения показаний разных типов счетчиков в зависимости от изменения гармонического состава тока и напряжения было принято,

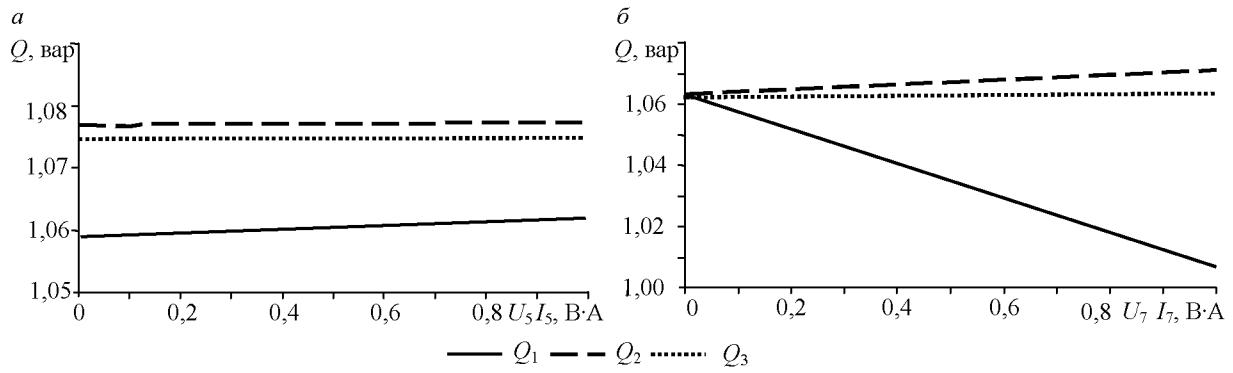


Рис.3. Зависимость показаний счетчиков трех типов при изменении пятой (а) и седьмой (б) гармоник

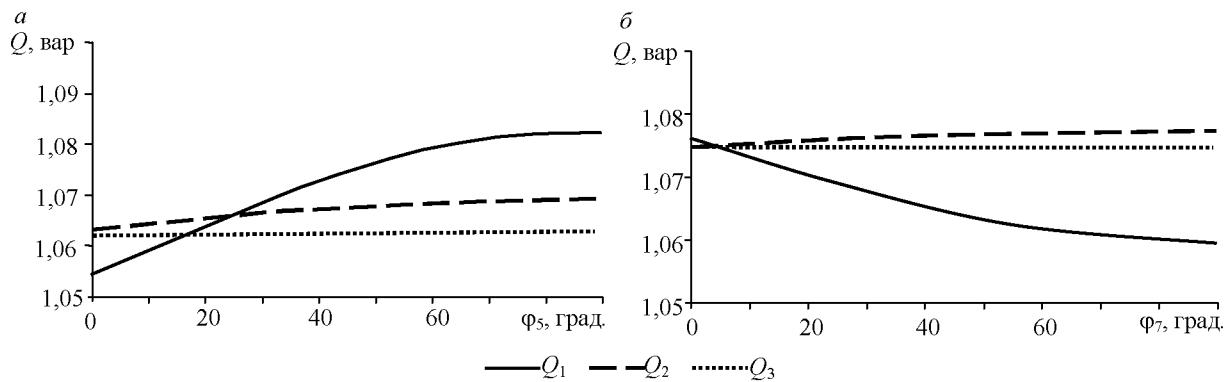


Рис.4. Зависимость показаний счетчиков трех типов при изменении разности фаз между напряжением и током на пятой (а) и седьмой (б) гармониках

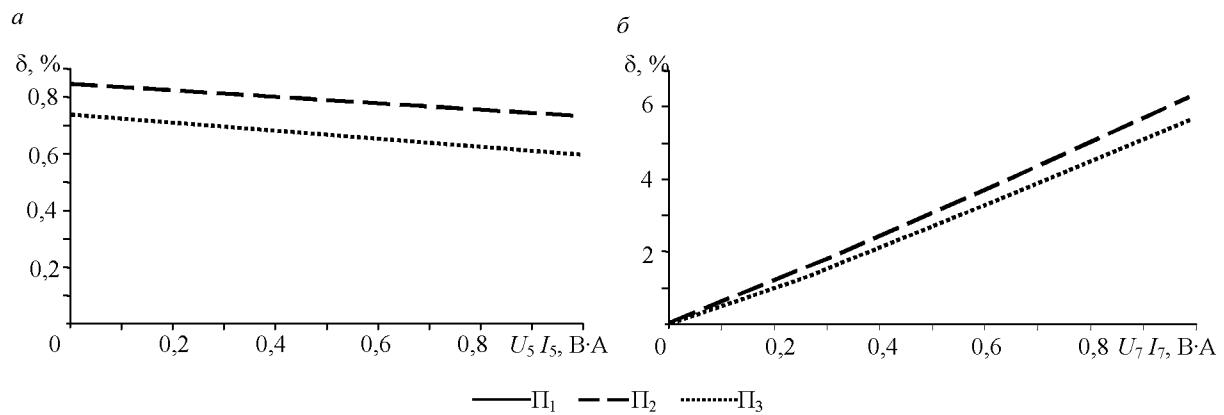


Рис.5. Погрешности показаний счетчиков при изменении мощности на пятой (а) и седьмой (б) гармониках

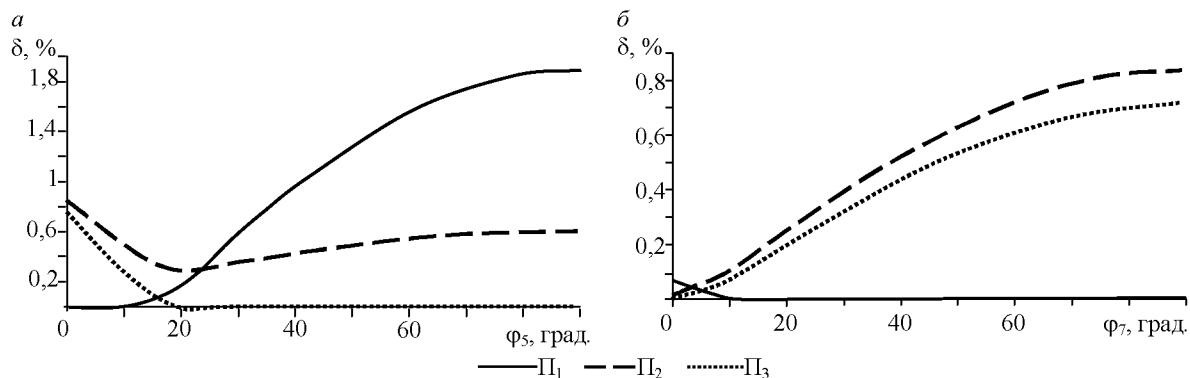


Рис.6. Погрешности показаний счетчиков при изменении сдвига фаз между напряжением и на током пятой (а) и седьмой (б) гармониках

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°.

Соответствующие зависимости приведены на [рис.3](#) и [4](#). Показания представлены в относительных единицах. За базисные величины приняты: $Q_6 = 335000$ вар, $U_6 I_{6i} = 2000$ В·А.

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

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} = \frac{x_i - x_j}{x_j},$$

где x_i и x_j – меньшее и большее из сравниваемых показаний соответственно. Зависимости погрешностей от изменяемых величин представлены на [рис.5, 6](#).

Максимальные значения погрешностей для различных типов счетчиков следующие:

Тип счетчика	$U_5 I_5$	$U_7 I_7$	φ_5	φ_7
1	–	–	1,9	0,07
2	0,84	6,36	0,84	0,84
3	0,75	5,69	0,74	0,72

Выводы

1. Наличие гармонических искажений в токе и напряжении питающей сети значительно сказывается на показаниях счетчиков реактивной энергии.

Научный руководитель д-р техн. наук, профессор Я.Э.Шклярский

2. Определено, что относительная погрешность измерения различными типами счетчиков при определенном соотношении гармоник и величине сдвига фаз между напряжением и током на каждой из гармоник может значительно превышать погрешность самого прибора и достигать 6,35 %, что является существенным фактором при оплате за электроэнергию

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

4. Сравнение экспериментальных и теоретических исследований, проводимых для реальных условий нагрузки, подтвердили тенденцию к изменению погрешности. Однако теоретические исследования показали, что погрешность может достигать больших значений, чем это было установлено при эксперименте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агунов М.В. Новый подход к измерению электрической мощности / М.В.Агунов, А.В.Агунов, Н.М.Вербова // Промышленная энергетика. 2004. № 2.

2. Новый подход к идентификации нагрузок, создающих помехи, основанные на реактивных мощностях / П.В.Барбаро, А.Каталиотти, В.Козентино, С.Нуксио // Электроснабжение. 2007. Т.22. № 3.

3. Характеристики счетчиков реактивной энергии в системах электроснабжения с искажениями / П.В.Барбаро, А.Каталиотти, В.Козентино, С.Нуксио // XVIII Всемирный конгресс IMEKO «Метрология для стабильного развития», Рио-де-Жанейро, Бразилия, 17-22 сентября, 2006.

REFERENCES

1. Agunov M.V, Agunov. A.V., Verbova N.M. A new approach to the measurement of electrical power // Industrial energy. 2004. N 2

2. Barbaro P.V., Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S. A novel approach based on nonactive power for the Identification of Disturbing Loads in Power Systems // Transactions on Power Delivery. 2007. Vol.22, Issue 3

3. Barbaro P.V., Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S. Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems. XVIII IMEKO World congress Metrology for a Sustainable Development September, 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.