

УДК 621.3.08

Д.И. ИВАНЧЕНКО, к.т.н., доцент (Горный университет)

О.С. ВАСИЛЬКОВ, аспирант (Горный университет)

Д.Е. БАТУЕВА, аспирант (Горный университет)

О.Е. БАТЫРЕВ, магистрант (Горный университет)

г. Санкт-Петербург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЧЕТЧИКОВ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

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 неправильному учету реактивной энергии приборами, входящими в систему автоматизированного контроля и учета электроэнергии. 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.

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

$$(1) \quad Q = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i\left(t + \frac{T}{4}\right) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \dots dt$$

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 - $i\left(t + \frac{T}{4}\right)$. Для первого типа счетчиков реализуется сдвиг фазы напряжения или тока на 90° .

Для второго типа счетчиков математическое выражение реактивной мощности имеет вид:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \omega \left(- \int_0^T u(t) i(t) dt \right) = \frac{1}{T} \int_0^T \omega \int_0^T \left(-U_1 \sin \omega t - U_2 \sin 2\omega t - U_3 \sin 3\omega t - \dots \right) \times \left(I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + I_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + I_3 \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots \right) dt dt =$$

$$U_1 I_1 \sin \phi_1 + \frac{U_2 I_2 \cos \phi_2}{2} = Q_1 + \frac{Q_2}{2} + Q_3 + \dots \quad (2)$$

Для третьего типа счетчиков математическое реализуется следующее математическое выражение:

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

$$\dots \left(Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

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: $Q_6 = 335000$ вар, $U_{6i} I_{6i} = 2000$ ВА. Для примера на рис. 2 приведены зависимости реактивной энергии от угла сдвига фазы на пятой гармонике.

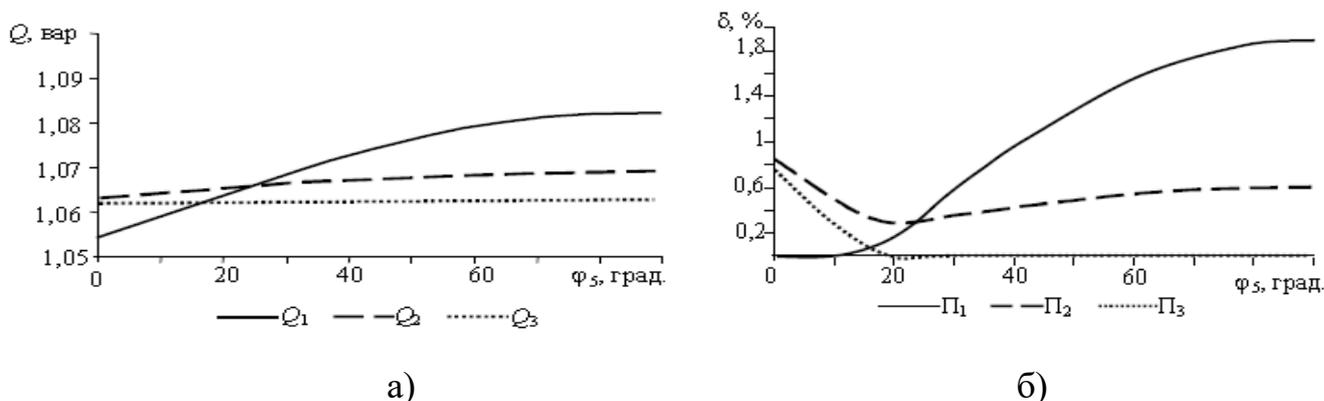


Рисунок 2. а)- Зависимость показаний трех типов счетчиков(1,2,3) при изменении угла сдвига фаз между напряжением и током на 5-ой гармонике; б) - Зависимость погрешности трех типов счетчиков(1,2,3) при изменении угла сдвига фаз между напряжением и током на 5-ой гармонике

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 ИСТОЧНИКОВ:

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