

Измерение реактивной энергии в распределённых системах электроснабжения с искажениями: анализ технических характеристик серийных электронных счётчиков

Аннотация - в настоящей статье проводится сравнительный анализ технических характеристик традиционного электродинамического счётчика реактивной энергии и различных типов серийных электронных счётчиков реактивной энергии, предназначенных для измерения реактивной энергии, при наличии гармонических искажений.

Этот вопрос весьма актуален, поскольку на рынке предлагаются несколько типов таких электронных счётчиков, основанные на различных принципах действия. В соответствии с действующими стандартами, эти счётчики предназначены для эксплуатации в условиях синусоидальных напряжений и токов, и их технические характеристики не проверяются в присутствии гармонических искажений. Но, из-за возрастания уровня искажений в системах электроснабжения, эти счётчики приходится использовать и в присутствии искажений напряжений и токов, и в таких случаях точность счётчиков может сильно отличаться от её номинальных значений, и разные счётчики могут показывать разные уровни потребления энергии при одной и той же нагрузке. В настоящей статье анализ подтверждается несколькими экспериментальными проверками, выполненными с помощью калибратора мощности.

Ключевые слова – измерение электроэнергии, электродинамические счётчики, гармоники системы электропитания, реактивная мощность, электронные счётчики.

I. ВВЕДЕНИЕ

Как правило, взимание платы за использованную электроэнергию производится с учётом как активной, так и реактивной составляющей потреблённой энергии, т.е. с учётом коэффициента мощности. По этой причине, как правило, требуется измерение как активной, так и реактивной энергии.

Раньше использовались электромеханические (электродинамические) счётчики. В настоящее время предпочтение отдаётся электронным счётчикам, ввиду их более высокой стабильности, точности и расширенного набора измерительных функций (например, включению в один прибор средств измерения как активной, так и реактивной энергии, и возможности одновременного измерения других важных электрических параметров), а также ввиду возможности передачи данных, полученных в результате дистанционного измерения, с помощью ВЧ-связи по ЛЭП или других технологий передачи информации.

Как правило, действие электромеханических счётчиков для измерения реактивной энергии основано на использовании электродинамического счётчика ватт-часов и устройств для сдвига фазы напряжения на 90° ; в трёхфазных системах измерение реактивной энергии осуществляется на основе измерения активной энергии, путём соответствующего подсоединения выводов напряжения и использования соотношения между фазными и линейными напряжениями в симметричных системах.

Известно, что при наличии гармоник реактивная энергия, измеряемая электродинамическими счётчиками, из-за особенностей их частотной характеристики определяется преимущественно основными гармониками напряжений и токов [1].

На рынке предлагаются несколько типов электронных счётчиков реактивной энергии, основанные на различных принципах работы. Необходимо заметить, что при синусоидальных напряжениях и токах эти принципы эквивалентны, и при измерении в пределах заданных классов точности при одних и тех же рабочих условиях они дают сравнимые результаты. Однако, в связи с увеличением уровня искажений в системах электроснабжения, счётчики энергии используются и при наличии искажённых напряжений и/или токов. В таких условиях различные типы электронных счётчиков вар-часов при одних и тех же рабочих условиях могут давать различные показания, что может привести к различным затратам на энергию для клиентов.

Поэтому, очень злободневным стал вопрос измерения технических характеристик этих счётчиков при наличии гармонических искажений [2]-[5]. В этом отношении действующие в настоящее время стандарты [6], [7] не применимы, так как они относятся к эксплуатации счётчиков при синусоидальных напряжениях и токах, и приводимые в них технические требования к счётчикам по точности не учитывают возможного наличия гармонических искажений.

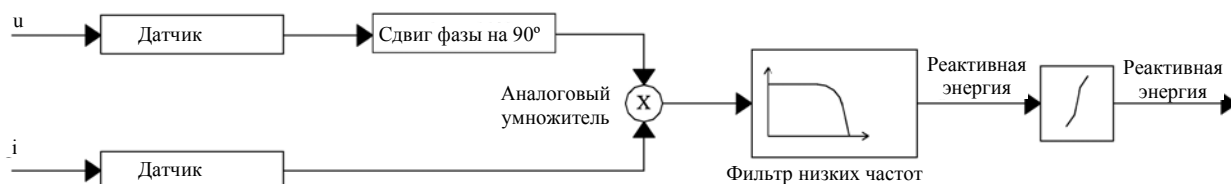
В настоящей статье авторы представляют теоретический и экспериментальный анализ технических характеристик электронных счётчиков для измерения реактивной энергии при наличии гармонических искажений. В начале статьи кратко рассматривается содержание стандартов по данной тематике и научные дебаты, которые ведутся вокруг этого содержания. Далее приводится краткое описание различных принципов действия электронных счётчиков, которое показывает, что при наличии гармонических искажений, измерения с помощью счётчиков, построенных на разных принципах работы, приводят к разным результатам. И, наконец, представлено несколько экспериментальных проверок, проведённые на разных серийных электронных счётчиках для измерения реактивной энергии при наличии гармонических искажений напряжения и тока. Также проводится сравнение результатов измерений, выполненных с помощью этих электронных счётчиков, и измерений, выполненных с помощью традиционных электродинамических счётчиков.

II ОБЗОР СТАНДАРТОВ НА СЧЁТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В соответствии с требованиями международных стандартов EN 62053-23 [6] и EN 62052-11 [7], счётчики для измерения реактивной мощности изготавливаются для работы с синусоидальными напряжениями и токами. Указанные стандарты действительны для «*общепринятого определения реактивной энергии синусоидальных напряжений и токов, содержащих только основную частоту*».

В отношении метрологических характеристик измерительного оборудования, указанные выше стандарты определяют требования, которым приборы должны удовлетворять в случае синусоидальных напряжений и токов; кроме того, в них даны условия испытаний и требований по точности, которым счётчики должны удовлетворять, когда какие-либо влияющие величины отклоняются от заданных условий синусоидальности. К этим величинам относятся изменения напряжения, частоты, постоянные составляющие токов и т.д.; однако, гармонические искажения среди них не присутствуют. В отличие от этого, для счётчиков активной энергии в международных стандартах EN 62053-21 [8] и EN 62053-22 [9] задаётся проверка точности при наличии гармоник.

Необходимо заметить, что в старом стандарте EN 61268 [10], заменённом на [6] и выведенном из использования в марте 2006 г., уровень гармонических искажений включался в число влияющих величин; а именно, предполагалось испытание при наличии 10% третьей гармоники в токе. Но в [6] этот вид испытаний был отменён.



Таким образом, требования к счётчикам вар-часов по точности, определённые для условий синусоидальных напряжений и токов, при наличии гармонических искажений теряют своё значение.

Более того, стандарт [6] относится только к счётчикам класса 2 и 3, а для более высоких классов точности стандартов не существует, несмотря на то, что в продаже имеются счётчики, заявленная точность которых превышает значения, указанные в [6]. В настоящее время в МЭК изучается возможность введения новой номенклатуры работ по электронным счётчикам с классом точности 0,5 и 1 [1].

Недостатки стандартов, указанные выше, обусловлены тем, что в научном сообществе нет согласия по понятию реактивной мощности в несинусоидальных напряжениях и токах [12]. В действительности, общепринятое определение реактивной мощности при наличии гармоник в напряжениях и/или токах теряет смысл. В технической литературе можно найти обсуждение этой проблемы, и в научном мире до сих пор ведутся споры о понятии реактивной мощности (а также о понятии кажущейся мощности) при несинусоидальных напряжениях и токах.

В целом, сущность вопроса заключается в том, что при наличии гармонических компонентов в напряжениях и токах создаются несколько термов (компонентов) мгновенной мощности, которые не участвуют в чистой передаче энергии. Было сформулировано несколько подходов к группированию этих компонентов, предложено несколько теорий мощности и несколько определений реактивной и «неактивной» мощности (*Budeanu, Fryze, Kusters-Moore, Page, Sherherd-Zakikhani, Sharon, Czarnecki* и т.д.).

Целью большинства этих теорий была попытка распространить свойства реактивной мощности в синусоидальных напряжениях и токах на системы с искажениями. Однако, в настоящее время доказано, что распространить эти свойства на системы с искажениями невозможно. В связи с этим, некоторые из предложенных определений были подвергнуты серьёзной критике с физической точки зрения; на этот предмет до сих пор ведутся оживлённые дискуссии, и в настоящий момент пока нет единой общепринятой теории мощности, которая могла бы использоваться в качестве основы для взимания платы за использованную электроэнергию, оценки качества электропитания, определения источников гармонических искажений в системах электроснабжения и их компенсации.

Вследствие этого, действующие стандарты описывают только синусоидальные системы и не дают основополагающего определения реактивной энергии (или мощности) в несинусоидальных напряжениях и токах. Точно также, они не дают конкретных требований по точности и условий соответствующих проверок при наличии гармонических искажений. Единственный стандарт, относящийся к данной проблеме - это стандарт IEEE 1459-2000 [13], но он не вводит конкретного определения реактивной мощности при несинусоидальных напряжениях и токах. В нём приводится набор определений для осуществления измерений параметров электропитания при синусоидальных и несинусоидальных напряжениях и токах, при сбалансированных и несбалансированных условиях. Эти определения основаны на отделении первых гармоник (с прямой последовательностью) напряжений и токов от всех других составляющих, которые считаются паразитными. Например, подчёркивается, что традиционно при расчётах за потреблённое электричество используются такие параметры, как активная, реактивная и кажущаяся мощности основной гармоники и соответствующий коэффициент мощности. В документе [11], в соответствии с предложением Шведской комиссии, также описывается реактивная мощность основной гармоники. Однако этот подход был подвергнут критике другими национальными комиссиями (например, итальянская комиссия подчеркнула необходимость дальнейшего обсуждения этой проблемы с целью оценки возможных альтернативных решений).

III ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СЧЁТЧИКОВ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ

В продаже имеются электронные счётчики, основанные на разных принципах действия. В однофазных системах измерение реактивной энергии (или реактивной мощности) может осуществляться путём аналогового или цифрового перемножения напряжения и тока, при этом напряжение (или ток) путём использования интегрирующей цепи или смещения времени на четверть периода предвари-

тельно сдвигается на 90° , далее используется фильтр или иная цифровая обработка сигнала (эти принципы действия схематично показаны на Рис.1 и Рис.2).

Имеющиеся разнообразные решения по сдвигу фазы напряжения или тока разработаны для синусоидальных напряжений и токов, поэтому они работают правильно для частоты основной гармоники, а при наличии других гармонических составляющих они могут привести совсем к другим результатам [4].

Например, при наличии гармоник, если производится сдвиг времени на четверть периода для тока, математическое выражение реактивной мощности имеет вид:

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

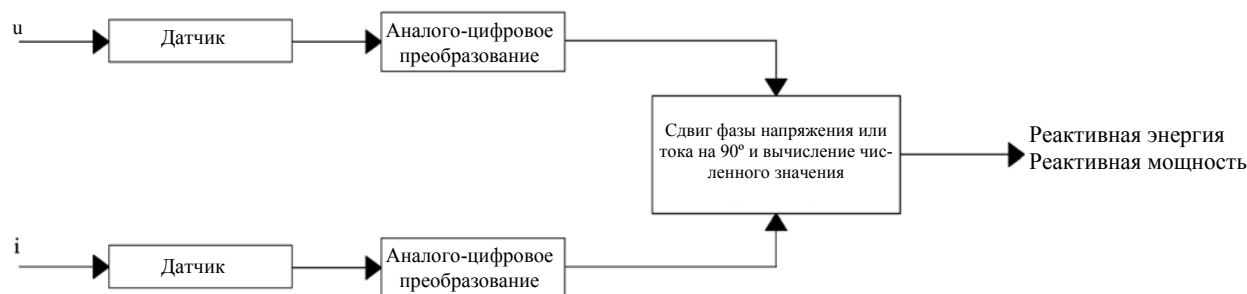


Рис. 2. Блок-схема измерения реактивной энергии путём аналого-цифрового преобразования величин напряжения и тока, цифрового поворота фазы напряжения или тока на 90° и последующих расчётов.

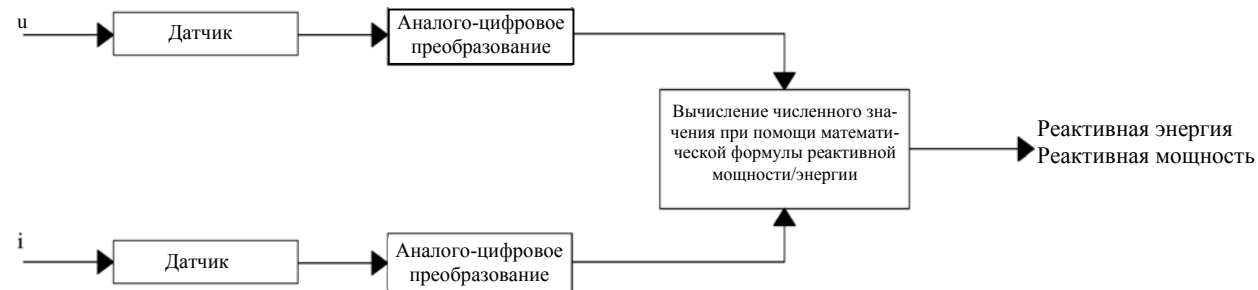


Рис. 3. Экспериментальная блок-схема измерения реактивной энергии путём аналого-цифрового преобразования величин напряжения и тока и последующей реализации математических формул реактивной мощности и энергии.

где U_h и I_h – среднеквадратичные значения гармонического напряжения и гармонического тока порядка h , φ_h – смещения их фаз, P_h и Q_h – соответствующая активная и реактивная мощность.

С другой стороны, если с помощью интегрирующей схемы выполняется сдвиг напряжения на 90° , математическое выражение реактивной мощности будет иметь другой вид:

$$\begin{aligned}
Q &= \frac{1}{T} \int_0^T w_1 \otimes (-\int u(t) dt \otimes i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T w_1 \otimes \int (-U_1 \sin wt - U_2 \sin 2wt - U_3 \sin 3wt - \dots) \otimes \\
&\otimes (I_1 (\sin(wt + \varphi_1) + I_2 \sin(2wt + \varphi_2) + I_3 \sin(3wt + \varphi_3) + \dots) \otimes dt = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + \frac{U_2 I_2 \sin \varphi_2}{2} + \dots = \\
&= Q_1 + \frac{Q_2}{2} + \frac{Q_3}{3} + \dots
\end{aligned} \tag{2}$$

Ясно, что численные значения реактивной мощности (или энергии), получаемые из уравнения (1) и (2) для одних и тех же рабочих условий, различны.

В цифровых электронных счётчиках, основанных на цифровом преобразовании сигналов напряжения и тока, может также использоваться математическое определение реактивной мощности (или энергии); блок-схема такого решения представлена на Рис.3.

Известно, что в случае синусоидального напряжения и тока реактивная мощность Q может быть вычислена из следующих выражений:

$$Q = UI \sin \phi \tag{3}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{4}$$

где U и I – среднеквадратичные значения напряжения и тока, ϕ - их смещение (сдвиг фазы), P – активная мощность, S – кажущаяся мощность.

Таким образом, измерение реактивной энергии можно осуществлять с использованием выражения (3) или (4). На практике система с использованием первого из двух выражений реализуется введением задержки тока на 90° , а при использовании второго реактивная мощность измеряется на основе измерения активной мощности. Для синусоидального напряжения и тока эти два выражения приводят к одному и тому же результату; поэтому, в соответствии с требованиями стандарта [6], относящегося к идеальным синусоидальным токам и напряжениям, для построения счётчика реактивной мощности могут использоваться оба этих метода. Можно заметить, что построение счётчика реактивной мощности на основе выражения (4) было бы технически и экономически разумным решением, так как это выражение легко реализуется.

При наличии в напряжениях и токах гармоник решения, основанные на (3) и (4), не будут эквивалентными. Если взять первое решение, технологии, существующие для смещения тока, работающие превосходно в условиях синусоидального напряжения, при наличии гармоник приводят к другим результатам. С другой стороны, для несинусоидальных напряжений активная мощность в выражении (4) даётся как сумма активных мощностей гармоник (включая основную гармонику и постоянную составляющую, если она есть); кажущаяся мощность даётся как сумма среднеквадратичных значений напряжения и тока, а реактивная мощность включает все термы мгновенной мощности, не участвующие в чистой передаче энергии [12], [13]. Таким образом, при наличии гармонических искажений применение выражения (4) для измерения реактивной мощности (или энергии) приводит к измерению величины, которая может превышать величину, получаемую при измерении с помощью других систем, например, с использованием (1) или (2), особенно при наличии высокого уровня гармонических искажений.

В заключение необходимо отметить, что большое внимание должно быть уделено выбору «измерительного» уравнения, реализуемого в электронном счётчике при измерении реактивной энергии (или мощности).

Кроме того, уместно провести сравнение измерений, выполняемых с помощью электронного счётчика, и измерений, выполняемых с помощью традиционных электромеханических счётчиков.

Ввиду особенностей своей частотной характеристики, электромеханические счётчики измеряют реактивную энергию, определяемую в основном реактивной энергией основных гармоник напряжений и токов, даже если присутствуют другие гармоники (реактивная мощность вычисляется по формуле $Q_1 = U_1 I_1 \sin \phi_1$). Электронные же счётчики, как было показано, в отличие от электромеханических, измеряют другие параметры, вид которых зависит от принципа работы электронного счётчика.

Поэтому, при наличии гармоник, измерения с помощью электронных счётчиков, использующих указанные выше принципы работы, могут привести к другим результатам, нежели измерения с помощью традиционных электродинамических счётчиков. Разница в результатах измерения зависит от уровня гармонических искажений и принципа работы электронных счётчиков. Например, если действие электронного счётчика основано на формуле (4), разница между измерениями с помощью электронного счётчика и электродинамического счётчика может быть весьма высокой, в особенности, если уровень гармонического искажения значительный (реактивная мощность равна $Q = \sqrt{S^2 - P^2} > Q_1$ [1], [2]).

И, наконец, в трёхфазных системах реактивную энергию можно измерять для каждой из фаз с помощью электронного счётчика, построенного по одному из указанных выше принципов. Кроме того, её можно определить из активной энергии путём соответствующего подсоединения выводов напряжения, как это делается в электродинамических счётчиках. Эта система также работает для синусоидальных напряжений и токов, а при наличии гармонических составляющих результаты могут быть иные.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальным проверкам были подвергнуты три электронных счётчика реактивной энергии класса 2, предлагающиеся в продаже. Методика измерения реактивной энергии с помощью этих счётчиков производителями не была указана. Проверяемые счётчики (ПС) сравнивались друг с другом и с традиционным электродинамическим счётчиком класса 3.

Необходимо отметить, что требования по точности ко всей электроизмерительной аппаратуре (для измерения как активной, так и реактивной мощности) выражались в процентной погрешности $e\%$ [6], [8], [9], которая в стандарте [7] определяется следующим образом:

$$e_j \% = \frac{W_j - W_1}{W_1} \times 100 \quad (5)$$

где W_r – энергия, измеренная счётчиком, а W_1 – «истинная» энергия. В этом же стандарте говорится, что *«поскольку истинное значение определить невозможно, в качестве этого значения принимается величина с указанной погрешностью, согласованная между изготовителем счётчика и пользователем, или приведённая в государственных стандартах»*.

Для случая наличия гармонических искажений нет чётко определённой формулы измерения, которую можно было бы применить для измерения реактивной энергии, и, как следствие, невозможно применить «истинную» энергию для определения величины процентной погрешности. Эта проблема касается не только серийных счётчиков, указанных в [6], но также эталонных стандартных счётчиков, которые должны применяться при определении процентной погрешности [14].

При экспериментальных проверках процентная погрешность вычислялась путём допущения, что реактивная энергия, связанная с основными гармониками напряжений и токов, W_1 – это общепринятое «истинное значение» энергии, поэтому процентные погрешности проверяемых счётчиков, $e_j\%$, выражались формулой:

.....

.....

$$e\% = \frac{W_r - W_t}{W_t} \times 100 \quad (6)$$

где W_j – реактивная энергия, измеряемая конкретным ПС.

Благодаря использованию этого подхода появляется возможность напрямую сравнивать электронные ПС с электродинамическим счётчиком, который измеряет реактивную энергию, практически равную W_1 , даже если имеются гармонические искажения. Кроме того, поскольку эти счётчики предназначены для работы с синусоидальными напряжениями и токами, процентная погрешность $e_j\%$ относительно W_1 позволяет оценивать характеристики счётчиков в соответствии с действующими стандартами и с действующей методикой взимания платы за потреблённую электроэнергию, в которой не учитывается наличие гармонических искажений, и расчёт производится с допущением, что напряжения и токи имеют синусоидальную форму.

И, наконец, такой подход хорошо согласуется с документом [11], описывающим реактивную мощность основной гармоники, и со стандартом [13], основанным на разделении основных гармоник напряжения и тока от других гармонических составляющих.

Для проведения экспериментальных проверок использовался калибратор мощности марки Fluke, соответствующий электроэнергетическому стандарту 6100/E. Данный калибратор даёт значение реактивной мощности основной гармоники, а также значение соответствующей реактивной энергии (за заданный интервал времени), которое использовалось как эталонная величина при оценке процентной погрешности.

Первая серия испытаний проводилась с синусоидальным напряжением при номинальном напряжении ($U_n = 230\text{В}$ для электронных счётчиков и $U_n = 100\text{В}$ для электродинамического счётчика) и различных значениях тока ($I = 1 \div 5\text{А}$) и $\sin \varphi$ (индуктивных). В частности, испытания проводились при следующих значениях:

- $\sin \varphi = 1$, $\sin \varphi = 0,5$, $\sin \varphi = 0,25$ в соответствии с требованиями [6];
- $\sin \varphi = 0,6$, $\sin \varphi = 0,447$, соответствующие реактивной энергии, равной 75% и 50% активной энергии соответственно (коэффициенты мощности при этом $\cos \varphi = 0,8$ и $\cos \varphi = 0,9$; эти значения были выбраны потому, что они соответствуют пороговому значению штрафного коэффициента потребления реактивной энергии, принятому в Италии).

Для случая синусоидального напряжения и тока все ПС показали сравнимые результаты, с процентной погрешностью ниже, чем их точность по классу точности.

Затем эти проверки были повторены для несинусоидального напряжения и тока, при тех же среднеквадратичных значениях напряжения и тока и при тех же значениях $\sin \varphi$; а $\cos \varphi$ в данном случае являлся смещением между основными гармониками напряжения и тока. С помощью калибратора напряжения в напряжения и токи вводились известные гармонические составляющие.

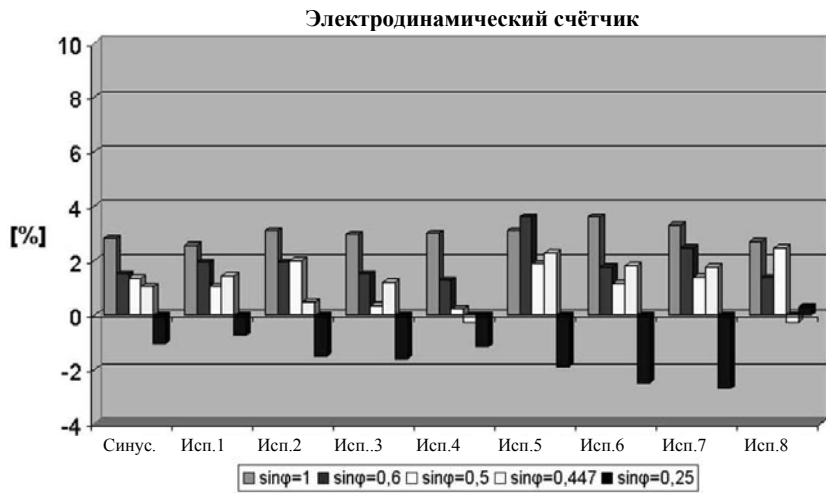


Рис. 4 Результаты экспериментальной проверки. Процентные погрешности при синусоидальных напряжениях и токах и при искажённых напряжениях и токах (проверки 1-8) - электродинамический счётчик.

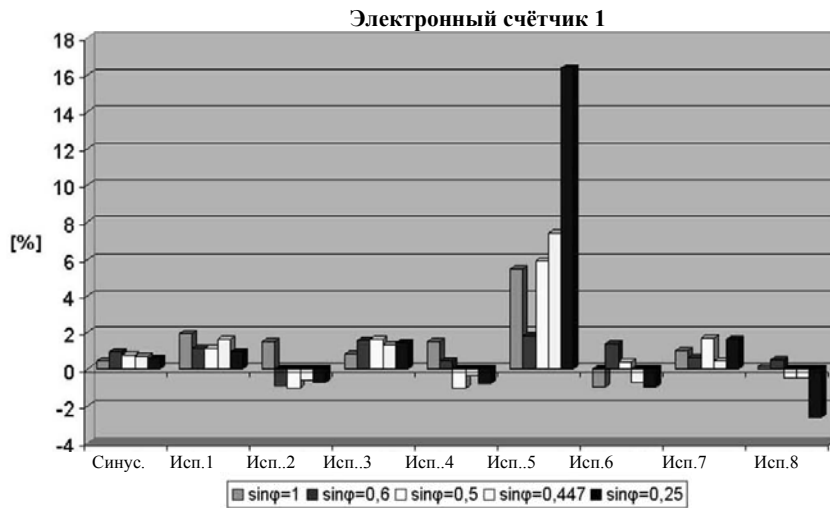


Рис. 5 Результаты экспериментальной проверки. Процентные погрешности при синусоидальных напряжениях и токах и при искажённых напряжениях и токах (проверки 1-8) - электронный счётчик 1.

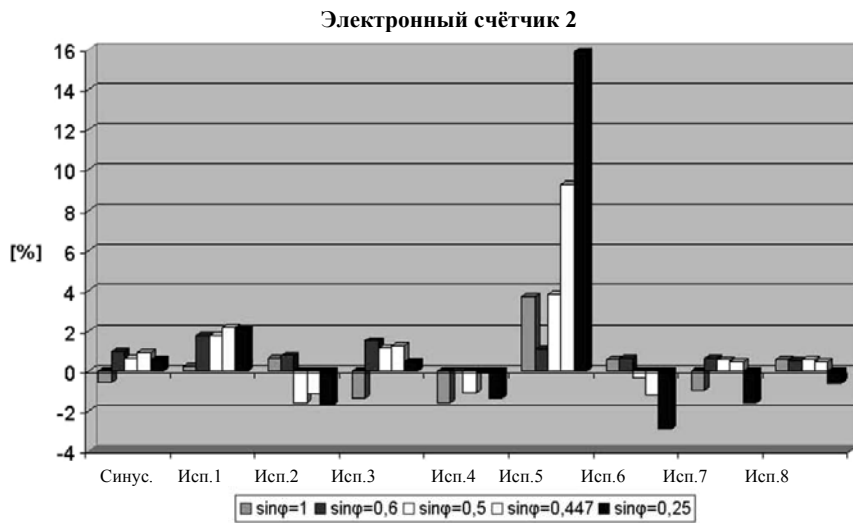


Рис. 6 Результаты экспериментальной проверки. Процентные погрешности при синусоидальных напряжениях и токах и при искажённых напряжениях и токах (проверки 1-8) - электронный счётчик 2.

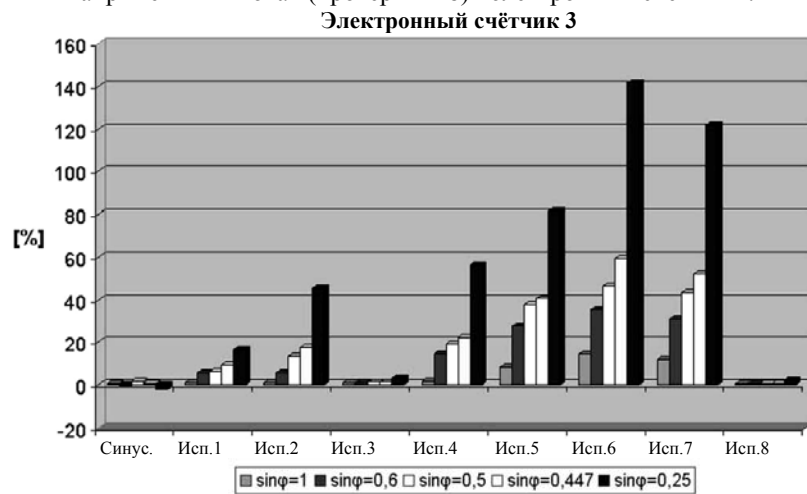


Рис. 7 Результаты экспериментальной проверки. Процентные погрешности при синусоидальных напряжениях и токах и при искажённых напряжениях и токах (проверки 1-8) - электронный счётчик 3.

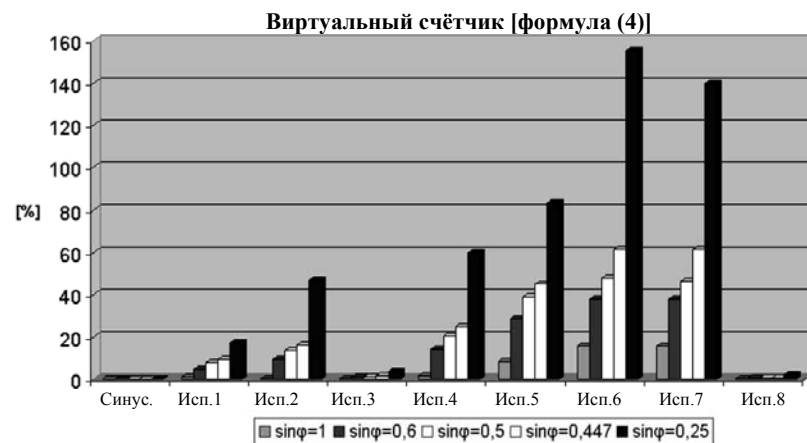


Рис. 8 Результаты экспериментальной проверки. Процентные погрешности при синусоидальных напряжениях и токах и при искажённых напряжениях и токах (проверки 1-8) - виртуальный счётчик [формула (4)].

Испытания проводились при нескольких формах напряжения и тока, при этом гармонические составляющие выбирались в соответствии со стандартами EN 50160 [15], 61000-3-2 [16] и 62053-21/22 [17], [18]. Последние два стандарта учитывались потому, что в них содержится проверка точности при наличии гармонических составляющих, несмотря на то, что эти стандарты относятся к электронным счётчикам для измерения активной энергии.

В частности, испытания проводились при введении следующих гармонических составляющих:

- испытание 1: нечётные гармоники порядков, не являющихся кратными 3; $\text{THD}_U = 7,9\%$, $\text{THD}_I = 13,9\%$;
- испытание 2: нечётные гармоники порядков, не являющихся кратными 3; $\text{THD}_U = 5,3\%$, $\text{THD}_I = 5,3\%-24,9\%-25,8\%-27,6\% 29,1\%$, соответственно при $\sin \varphi = 1$, $\sin \varphi = 0,6$, $\sin \varphi = 0,5$, $\sin \varphi = 0,447$, $\sin \varphi = 0,25$;
- испытание 3: чётные гармоники; $\text{THD}_U = 2,79\%$, $\text{THD}_I = 7,9\%$;
- испытание 4: чётные и нечётные гармоники порядков, не являющихся кратными 3 до 24 порядка; $\text{THD}_U = 7,8\%$, $\text{THD}_I = 16,0\%-28,8\%-29,5\%-31,2\% 732,5\%$, соответственно при $\sin \varphi = 1$, $\sin \varphi = 0,6$, $\sin \varphi = 0,5$, $\sin \varphi = 0,447$, $\sin \varphi = 0,25$;
- испытание 5: проверка точности при наличии гармоник, указанных в [17], [18], при наличии 5-ой гармоники в напряжении и токе; $\text{THD}_U = 10,0\%$, $\text{THD}_I = 40\%$;
- испытание 6-7-8: формы напряжения и тока получены из смоделированной системы электропитания, с синусоидальным напряжением питания или с напряжением питания с искажениями, с сопротивлением линии, с линейной RL-нагрузкой, с нелинейной нагрузкой, состоящей из выпрямительного диодного моста, питающего нагрузку постоянного тока (полное описание смоделированной системы электропитания приведено в [19]); указанные три испытания проводились при следующих условиях:
 - испытание 6: синусоидальное напряжение питания и нелинейная нагрузка; $\text{THD}_U = 2\%$, $\text{THD}_I = 58\%$;
 - испытание 7: напряжение питания с искажениями и нелинейная нагрузка; $\text{THD}_U = 7,9\%$, $\text{THD}_I = 54,4\%$;
 - испытание 8: напряжение питания с искажениями и линейная нагрузка; $\text{THD}_U = 6,9\%$, $\text{THD}_I = 4,6\%$;

(указанные коэффициенты THD определялись на участке нагрузки)

На Рис.4÷7 показаны результаты, полученные соответственно для электродинамического счётчика и трёх ПС (обозначенных соответственно электронный счётчик 1, 2 и 3). На Рис.8 показаны процентные погрешности, полученные при измерении с помощью «виртуального» счётчика, реализующего формулу (4) реактивной мощности. Как видно из рисунков, при наличии гармонических искажений данные электронные счётчики дают несопоставимые показания при одних и тех же рабочих условиях. В частности, как и предполагалось, электродинамический счётчик измерял значение реактивной энергии, близкое к реактивной энергии основной гармоники, с небольшой процентной погрешностью (см. Рис.4). Показания электронных счётчиков отличались от этой величины, притом процентная погрешность была разной и зависела от условий проверки (см. Рис.4÷7). В некоторых случаях величина процентной погрешности превышала значение, соответствующее классу точности прибора.

Самыми жёсткими рабочими условиями для всех ПС были условия проверки точности по [17], [18] (на рисунках – исп. 5); в этих условиях процентная погрешность ПС превышала значение, соответствующее классу точности 2.

Электронный счётчик 3 показал худшие характеристики и во всех экспериментальных проверках имел самую высокую процентную погрешность. Можно заметить, что характеристики электронного счётчика 3 схожи с характеристиками упомянутого выше виртуального счётчика. По всей вероятности, в электронном счётчике 3 реализуется формула (4), хотя изготовитель счётчика этого не указывает. С другой стороны, эксперименты подтверждают утверждение, что при измерении реактивной энергии показания счётчика, реализующего эту формулу, выше показаний счётчиков других типов.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье проводится сравнительный анализ технических характеристик различных типов серийных электронных счётчиков реактивной энергии, предназначенных для измерения реактивной энергии при наличии гармонических искажений.

Теоретический анализ и результаты экспериментов показывают, что внедрение таких счётчиков вместо традиционных электродинамических счётчиков может привести к изменению измеренных значений при одних и тех же рабочих условиях и, вследствие этого, росту размера платы за потреблённую электроэнергию в сравнении с использованием электродинамических счётчиков. Это может привести к разногласиям между потребителями электроэнергии и коммунальными службами из-за различия размера оплаты за одинаковое потребление энергии.

По мнению авторов, для того, чтобы можно было определить метрологические характеристики установленных приборов учёта потребления электроэнергии, изготовители всегда должны указывать принцип, на котором построены их счётчики.

С другой стороны, в стандартах должны указываться метрологические характеристики электронных счётчиков для измерения реактивной энергии при наличии гармонических искажений, а также надлежащие методы проверки этих метрологических характеристик. Например, способы проверки точности, заданные для счётчиков активной энергии, также должны быть внедрены и для счётчиков реактивной энергии. Кроме того, для определения точностных характеристик счётчиков при наличии гармоник могла бы использоваться процентная погрешность, которая применяется при измерении реактивной энергии основной гармоники.

Наконец, при данных обстоятельствах разногласий между потребителями электроэнергии и коммунальными службами можно было бы избежать, если бы счётчики строились так, чтобы и при несинусоидальных напряжениях и токах они измеряли реактивную энергию основной гармоники. С более общей точки зрения, необходимо пересмотреть тарифную политику путём введения соответствующих параметров, позволяющих точно определить качественную характеристику энергии, и введения ответственности за генерацию помех в системах электропитания, влияющих на их работу.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] П.В. Барбаро, А. Каталиотти, В. Козентино и С. Нуксио, «Характеристики счётчиков реактивной энергии в системах электроснабжения с искажениями», представлена на XVIII Всемирном конгрессе ИМЕКО «Метрология для стабильного развития», Рио-де-Жанейро, Бразилия, 17-22 сентября 2006г.
- [2] Р. Арсено и М.В. Хьюз, «Выбор счётчиков для коммерческого измерения электроэнергии на нагрузках, генерирующих гармоники», представлена на 11 Международной конференции «Гармоники и качество электроснабжения», Лейк Плейсид, США, 12-15 сентября 2004г.
- [3] А. Дин и Д. Рейзц, «Что измеряют и что должны измерять цифровые счетчики коммерческого измерения электроэнергии в сетях электроснабжения с искажениями?», представлена на 11 Международной конференции «Гармоники и качество электроснабжения», Лейк Плейсид, США, 12-15 сентября 2004г.
- [4] П.С. Филиппи и П.В. Лабандж, «Оценка работы счётчиков реактивной энергии при наличии искажений высокими гармониками», *работа IEEE, энергоснабжение*, том 7, №4, стр. 1793-1799, октябрь 1992г.
- [5] М.Д. Кокс и Т.Б. Вилльямс, «Технические характеристики индукционных счётчиков вар-часов и твердотельных счётчиков вар-часов на нелинейных нагрузках», *работа IEEE, энергоснабжение*, том 5, №4, стр. 1678-1686, ноябрь 1990г.
- [6] EN 62053-23: Электроизмерительная аппаратура (переменного тока) – специальные требования – часть 23: электронные счётчики реактивной энергии (класса 2 и 3), декабрь 2003г.
- [7] EN 62052-11: Электроизмерительная аппаратура (переменного тока) – общие требования, проверки и условия проверки – часть 11: измерительная аппаратура, ноябрь 2003г.
- [8] EN 62053-21: Электроизмерительная аппаратура (переменного тока) – специальные требования – часть 21: электронные счётчики активной энергии (класса 1 и 2), март 2003г.

.....

.....

- [9] EN62053-22: Электроизмерительная аппаратура (переменного тока) – специальные требования – часть 23: электронные счётчики активной энергии (класса 0,2S и 0,5S), март 2003г.
- [10] EN 61268, Электронные счётчики вар-часов реактивной энергии переменного тока (класса 2 и 3) декабрь 1998г, представлена [5] и изъята в марте 2006г.
- [11] Потенциальная тема новой работы 13/1326/NP, проект IEC 62053-24: Электроизмерительная аппаратура (переменного тока) – специальные требования – часть 24: электронные счётчики реактивной энергии (класса 0,5 и 1).
- [12] П.В. Барбаро, А. Каталиотти, В. Козентино и С. Нуксио, «Сравнение неактивных мощностей в системах электропитания с искажениями», представлена на XVIII Всемирном конгрессе IМЕКО «Метрология для стабильного развития», Рио-де-Жанейро, Бразилия, 17-22 сентября 2006г.
- [13] IEEE, Стандартные определения опытного применения для измерения параметров электропитания в синусоидальных, несинусоидальных, сбалансированных и несбалансированных системах, Стандарт IEEE, 1459-2000, Стандарт IEEE, 21 июня 2000г., доработаны для полного использования в сентябре 2000г.
- [14] А. Каталиотти, В. Козентино и С. Нуксио, «Метрологические характеристики электронных счётчиков реактивной энергии при наличии гармонического искажения», представлена на конференции по КИПиА и измерительной технике (IMTC 2007), Варшава, Польша, 1-3 мая 2007г.
- [15] EN 50160, Характеристики напряжения электропитания, поступающего по распределённым системам электропитания, март 2000г.
- [16] IEC 61000-3-2, Электромагнитная совместимость (EMC) – часть 3-2: предельные значения – предельные значения по генерации гармоник токами (входной ток аппаратуры - <16 А на фазу), IEC, 2004.
- [17] EN 62053-21:, Электроизмерительная аппаратура (переменного тока) – специальные требования – часть 21: электронные счётчики активной энергии (класса 1 и 2), март 2003г
- [18] EN 62053-22: Электроизмерительная аппаратура (переменного тока) – специальные требования – часть 23: электронные счётчики активной энергии (класса 0,2S и 0,5S), март 2003г.
- [19] П.В. Барбаро, А. Каталиотти, В. Козентино и С. Нуксио, «Новый подход к идентификации нагрузок, создающих помехи, основанный на неактивных мощностях», работа IEEE, энергоснабжение, том 22, №3, стр. 1782-1789, июль 2007г.