

**ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТОЧНОСТЬ ПОКАЗАНИЙ  
ЭЛЕКТРОСЧЕТЧИКОВ: ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ**

**А. В. Волошко, Д. В. Филянин**

Национальный технический университет «Киевский Политехнический Институт»  
просп. Победы, 36, г. Киев, Украина, 03056. E-mail: dany@mn.ru

Потребители с нелинейной нагрузкой преобразуют часть энергии синусоидального тока в энергию несинусоидального тока и возвращают ее в сеть. Влияние этого «возврата» различно для различных типов счетчиков. Счетчики активной энергии алгебраически суммируют мощности всех гармоник, т.е. из мощности первой гармоники вычитается мощность высших гармоник. Зависимость показаний счетчиков реактивной энергии от характеристик несинусоидальности тока и напряжения более сложная. Аналогично, потребители с несимметричной нагрузкой возвращают в сеть энергию обратной последовательности, которая вычитается из энергии прямой последовательности. Все эти факторы приводят к увеличению погрешности счетчиков электроэнергии.

**Ключевые слова:** достоверность показания счетчиков, качество электроэнергии, измерение мощности, высшие гармоники, несимметрия.

**ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТОЧНІСТЬ ПОКАЖЧИКІВ ЕЛЕКТРОЛІЧІЛЬНИКІВ:  
ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ**

**А. В. Волошко, Д. В. Філянін**

Національний технічний університет «Київський Політехнічний Інститут»  
просп. Перемоги, 36, м. Київ, Україна, 03056, E-mail:dany@nm.ru

Споживачі з нелінійним навантаженням перетворюють частину енергії синусоїдального струму в енергію несинусоїдального струму і повертають її в мережу. Вплив цього «повернення» розрізняється для різних типів лічильників. Лічильники активної енергії алгебраїчно підсумовують потужності всіх гармонік, тобто із потужності першої гармоніки віднімається потужність вищих гармонік. Залежність показчиків лічильників реактивної енергії від характеристик несинусоїдальності струму і напруги є більш складною. Аналогічно, споживачі з несимметричним навантаженням повертають в мережу енергію зворотної послідовності, яка вираховується з енергії прямої послідовності. Всі ці чинники призводять до збільшення похибки лічильників електроенергії.

**Ключові слова:** достовірність показів лічильників, якість електроенергії, вимірювання потужності, вищі гармоніки, несиметрія.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Определения активной, реактивной и полной мощности, которые в настоящее время используются, основаны на знаниях, разработанных и согласованных еще в 40-х годах прошлого столетия, пока форма сигналов тока и напряжения была синусоидальной [1–4].

В последние 50 лет произошли важные изменения. Новые условия функционирования электрических сетей обуславливаются следующими факторами:

- силовое электронное оборудование, такое как частотно-регулируемый привод, управляемые выпрямители, дуговые и индукционные печи, газоразрядные лампы с электронным балластом, кластеры персональных компьютеров представляют собой нелинейную нагрузку. Такие нагрузки обладают потенциалом для создания помех и нарушения работы оборудования энергосистемы и конечного пользователя. Основная проблема возникает от потока энергии, вызванного гармоническими составляющими токов и напряжений;

- традиционный парк измерительных приборов, откалиброван при частоте 50Гц;

- современный уровень развития микропроцессорной техники позволяет производителям измерительного оборудования создавать более точное и гибкое по своей функциональности оборудование для измерения электрических величин.

Электроэнергия – это товар, качество которого зависит не только от поставщика, но и от потребителя. Величина платы за него зависит как от действующего тарифа, так и от точности учета. В связи с увеличением доли нелинейных и несимметричных нагрузок, возникает проблема точности учета по-

требленной энергии имеющимся на сегодняшний день парком счетчиков и выявления источника искажения ПКЭ для полноценного функционирования имеющейся системы штрафов и санкций.

Целью данной работы является исследование влияния на точность показаний счетчиков электроэнергии несинусоидальных и несимметричных режимов работы сети.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Мгновенное значение мощности при несинусоидальных процессах определяется произведением мгновенных значений несинусоидальных напряжений и токов [3]:

$$p = u \cdot i$$

Активная мощность определяется как среднее значение мгновенной мощности за период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

Если мгновенные значения напряжения и тока представить в виде ряда Фурье и учесть, что интегралы от синусоидальных функций за целое число периодов равны нулю, то:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k, \quad (1)$$

где  $U_0, I_0$  – значения постоянных составляющих тока и напряжения;  $U_k, I_k$  – действующие значения напряжения и тока k-й гармоники;  $\varphi_k$  – угол фазово-

го сдвига между напряжением  $U_k$  и током  $I_k$   $k$ -й гармоники.

Для расчета активной мощности электронных счетчиков используют формулу (1).

Потребители, имеющие в своем составе электроприемники, потребляющие несинусоидальный ток, преобразуют часть электроэнергии синусоидального тока в энергию несинусоидального тока и возвращают ее в сеть [5]. В [6] приводятся результаты ис-

следования одного из трехфазных электронных счетчиков, сведенные в табл. 1. Были рассмотрены предельные случаи, когда напряжения и токи высших гармоник совпадали по фазе (чисто активная нагрузка и источник искажений находится во внешней сети), либо, когда напряжения и токи гармоник были в противофазе (чисто активная нагрузка, источником искажения является сам потребитель).

Таблица 1 – Результаты тестирования трех фазного электронного счетчика по влиянию пятой и седьмой гармоник на величину измеренной активной электроэнергии (мощности) [6]

Гармоника 5			Гармоника 7			PΣ расчетн. (%)	PΣ измерен. (%)	ΔPΣ (%) КПС
U5(%)	I5(%)	ΔP5(%)	U7(%)	I7(%)	ΔP7(%)			
–	–	–	–	–	–	100,0	100,0	0,0
10	10	1	–	–	–	101,0	100,8	0,8
20	20	4	–	–	–	104,0	103,8	3,8
20	40	8	–	–	–	108,0	107,7	7,7
30	40	12	–	–	–	112,0	111,2	11,2
10	10	1	10	10	1	102,0	101,8	1,8
10	10	1	20	20	4	105,0	104,8	4,8
20	20	4	20	20	4	108,0	107,6	7,6
10	–10	–1	–	–	–	99,0	98,9	–1,1
20	–20	–4	–	–	–	96,0	95,9	–4,1
20	–40	–8	–	–	–	92,0	91,8	–8,2
30	–40	–12	–	–	–	88,0	88,5	–11,5
10	–10	–1	10	–10	–1	98,0	97,9	–2,1
10	–10	–1	20	–20	–4	95,0	94,9	–5,1
20	–20	–4	20	–20	–4	92,0	91,8	–8,2
10	–10	–1	10	10	1	100,0	99,9	–0,1
10	–10	–1	20	20	4	103,0	102,9	2,9
20	–20	–4	20	20	4	100,0	99,8	–0,2

\*) все переменные приведены к аналогичным номинальным значениям по первой гармонике (U1, I1, P1)

В двух предпоследних столбцах таблицы приведены расчетные значения, которые должен был теоретически показывать счетчик в каждом эксперименте  $PΣ_{расчетн}$  и реальные значения  $PΣ_{измерен}$ , которые показал счетчик в соответствующем режиме, смоделированном с помощью калибратора. В последнем столбце приведена так называемая коммерческая погрешность счетчика  $ΔPΣ$  (КПС) – разность показаний счетчика при «чистой» сети и при наличии в сети высших гармоник напряжения и тока [6] – в каждом исследовавшемся режиме по отношению к режиму, когда все высшие гармоники отсутствуют (первая строка табл. 1).

Интересные зависимости выявили специалисты НПФ «Солис» при исследовании однотипных счетчиков в одинаковых условиях работы [7]. При испытаниях счетчиков в качестве выходного параметра принята погрешность измерения активной энергии испытываемым счетчиком. В качестве варьируемых параметров выбраны:

- коэффициент мощности в диапазоне – 0,1–1,0;
- отклонение напряжения – (+10 %)– (–40 %);
- коэффициенты несимметрии пообратной и нулевой последовательностям 0–10,0 %;
- коэффициент искажения кривых тока и напряжения – 0–25 %;
- коэффициенты гармонических составляющих для нечетных кратных трем гармоник – 0–12 %;

- коэффициенты гармонических составляющих для нечетных нечетных трем гармоник – 0–12 %;
- коэффициенты гармонических составляющих для четных кратных трем гармоник – 0–12 %;
- коэффициенты гармонических составляющих для нечетных нечетных трем гармоник – 0–12 %.

Кроме того, варьировались и различные сочетания перечисленных параметров.

На рис. 1 представлена зависимость погрешности измерений активной мощности (энергии) пятью различными типами счетчиков одного класса в зависимости от коэффициента мощности нагрузки и наличия нечетных и нечетных трем гармонических составляющих в спектрах напряжений и токов. Отрицательная погрешность соответствует недоучету энергии.

На рис. 2 представлены погрешности учета активной мощности и энергии в зависимости от величины коэффициентов несинусоидальности напряжения и тока в случае наличия в составе нечетных, кратных трем гармоник различными типами счетчиков.

Влияние уровня напряжения прямой последовательности на работу тех же типов счетчиков иллюстрирует рис. 3, где добавлен еще один фактор – нечетные кратные трем гармонические составляющие фазных напряжений и токов (12 %).

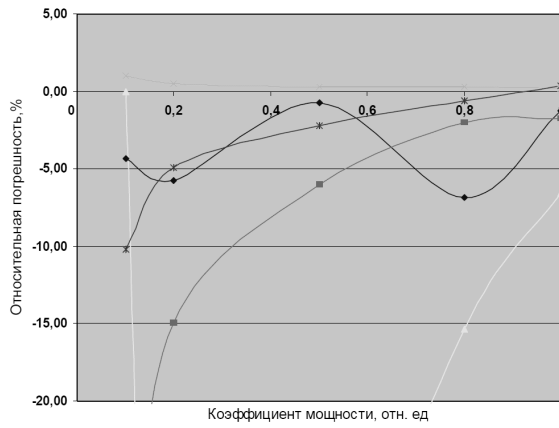


Рисунок 1 – Зависимость погрешности измерения активной мощности от коэффициента мощности нагрузки пяти типов счетчиков при наличии нечетных и некратных трех гармонических составляющих напряжения и тока [7]

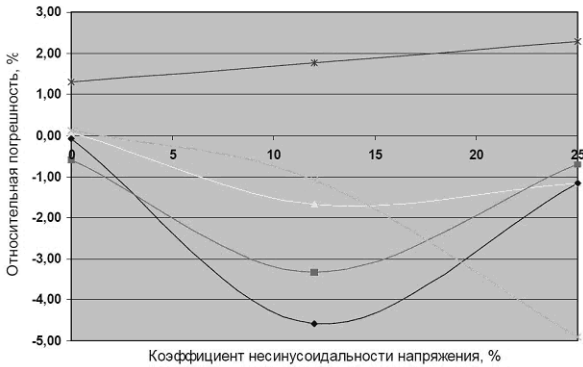


Рисунок 2 – Зависимость погрешности учета активной мощности и энергии в зависимости от величины коэффициентов несинусоидальности напряжения и тока в случае наличия в составе нечетных, кратных трех гармоник различными типами счетчиков [7]

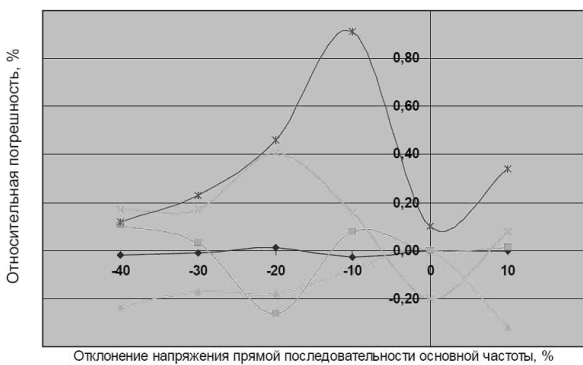


Рисунок 3 – Зависимость погрешности от отклонения напряжения прямой последовательности основной частоты при наличии нечетных, кратных трех, гармонических составляющих фазных токов и напряжений (12 %) [7]

Приведенные в виде графиков и таблицы результаты испытаний счетчиков, показывают существенный рост погрешности измерения активной мощно-

сти от качества энергии и коэффициента мощности в основном в сторону недоучета. Так как показания счетчиков активной энергии определяются алгебраической суммой мощностей всех гармоник, то потребитель, получающий некачественную электроэнергию, платит за нее больше, а потребитель, вносящий искажение, платит за нее меньше по сравнению с потребленной неискаженной энергией. Эта разница может быть весьма существенной [6].

По исследованиям, проведенным в [6, 7], при определенных сочетаниях параметров качества электроэнергии некоторые счетчики выходили из строя.

Более сложным является вопрос о влиянии характеристик несинусоидальности электрической энергии на показания счетчиков реактивной энергии. Как правило, все счетчики реактивной энергии, в настоящее время реализуют следующий алгоритм измерения реактивной мощности [6]:

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

где  $S$  – полная мощность;  $P$  – активная мощность.

Полная мощность  $S$  определяется как произведение действующих значений тока  $I$  и напряжения  $U$ :

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2 \cdot \sum_{j=1}^n I_j^2}, \quad (2)$$

где  $U$  и  $I$  – действующие значения напряжения и тока;  $U_j$  и  $I_j$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $j$ -й гармонической составляющей.

Объединяя (1) без учета постоянной составляющей  $U_0, I_0$  и (2), получаем выражение для реактивной мощности:

$$Q = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2 \cdot \sum_{j=1}^n I_j^2 - \left(\sum_{j=1}^n U_j I_j \cos \varphi_j\right)^2}.$$

После проведения математических преобразований выражение зависимости показаний счетчика реактивной электроэнергии от характеристик высших гармоник напряжения и тока сети будет выглядеть так [6]:

$$Q = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2 I_j^2 \sin \varphi_j + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n [(U_k I_l)^2 - 2(U_k I_l I_k) \cos \varphi_k \cos \varphi_l + (U_l I_k)^2]}$$

где  $U_j$  и  $I_j$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $j$ -й гармонической составляющей ( $j$  – от 1 до  $n$ );  $U_k$  и  $I_k$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $k$ -й гармонической составляющей ( $k$  – от 1 до  $n-1$ );  $U_l$  и  $I_l$  – действующие значения напряжения и тока каждой первой высшей гармонической составляющей ( $l$  – от  $k+1$  до  $n$ );  $\varphi_j$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_j$  и током  $I_j$  каждой  $j$ -й гармонической составляющей ( $j$  – от 1 до  $n$ );  $\varphi_k$  –

угол фазового сдвига между напряжением  $U_k$  и током  $I_k$  каждой  $k$ -й гармонической составляющей ( $k$  – от 1 до  $n-1$ );  $\varphi_l$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_j$  и током  $I_j$  каждой первой высшей гармонической составляющей ( $l$  – от  $k+1$  до  $n$ ).

При чисто активной нагрузке по всем гармоникам, когда выполняется равенство

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \dots = \cos \varphi_n = 1:$$

$$Q = \sqrt{\sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n (U_k I_l - U_l I_k)^2}.$$

Из этого равенства следует, что даже в случае, когда ни на одной гармонике нет потребления реактивной мощности, счетчик все равно покажет некоторое значение потребляемой реактивной мощности.

При потреблении только реактивной мощности по всем гармоникам, когда выполняется равенство  $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \dots = \cos \varphi_n = 0$ :

$$Q = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2 I_j^2 + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n [(U_k I_l)^2 + (U_l I_k)^2]}.$$

Это подтверждает, что суммарная реактивная мощность (энергия) в сети больше, чем просто сумма всех реактивных мощностей по всем гармоникам.

Эксперименты, проведенные с разными электронными счетчиками энергии, подтверждают правильность этих зависимостей [6]. Результаты исследований отражены на рис. 4–6.

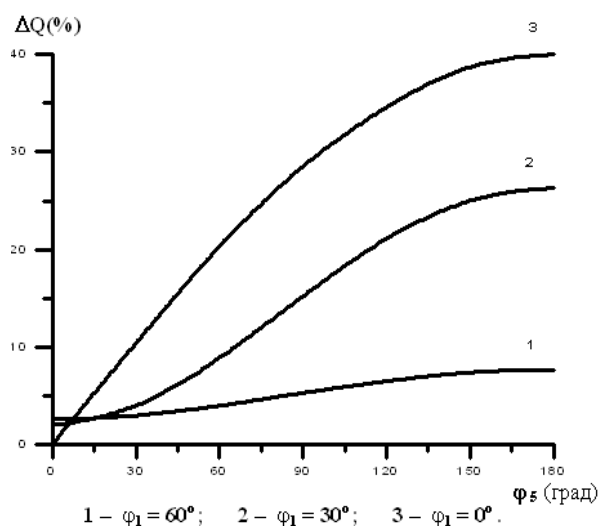


Рисунок 4 – Погрешности электронного счетчика реактивной электроэнергии  $\Delta Q$  при наличии пятой гармоники, в зависимости от ее фазы и загрузки реактивной мощностью по первой гармонике ( $U_5=0,2 U_{ном}$ ,  $I_5=0,2 I_{ном}$ ) [6]

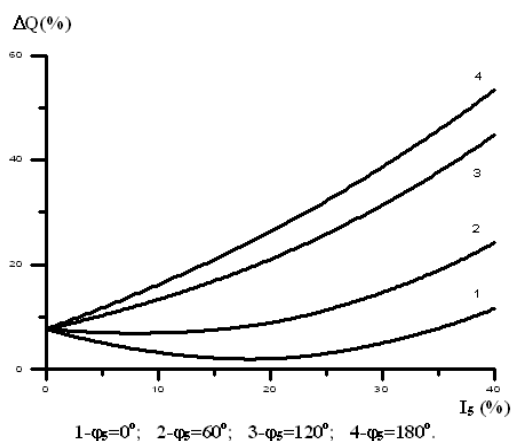
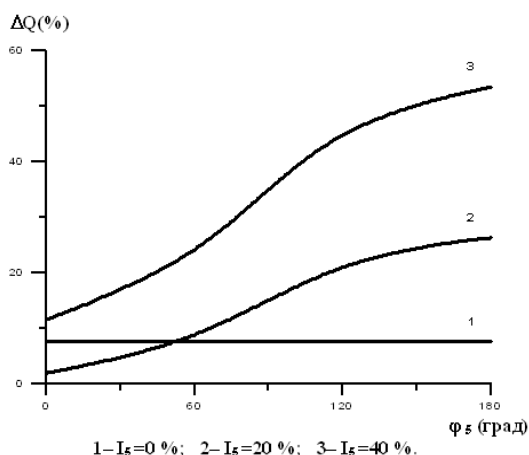


Рисунок 5 – Погрешности электронного счетчика реактивной электроэнергии  $\Delta Q$  при  $\cos \varphi_1=0,87$  ( $\varphi_1=30^\circ$ ) в зависимости от амплитуды и фазы тока пятой гармоники ( $U_5=0,2 U_{ном}$ ) [6]

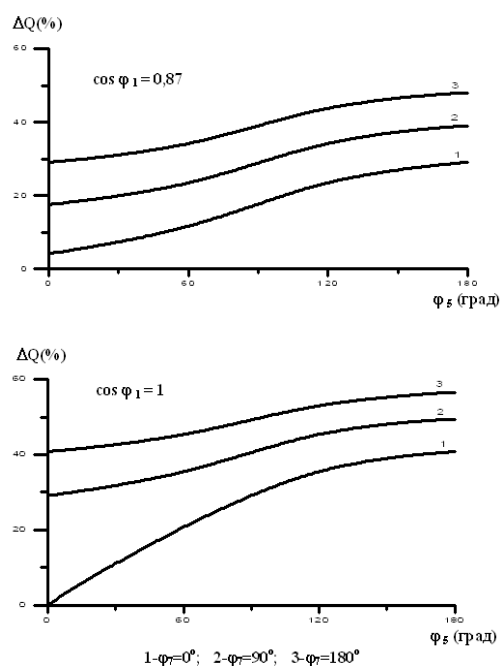


Рисунок 6 – Погрешности электронного счетчика реактивной электроэнергии  $\Delta Q$  в зависимости от амплитуд и фазовых углов пятой и седьмой гармоник ( $U_5=U_7=0,2 U_{ном}$ ,  $I_5=I_7=0,2 I_{ном}$ ) [6]

Для  $\cos\varphi_1=0,87$  – погрешности отнесены к текущей реактивной мощности по первой гармонике при  $U_1=U_{ном}$ ,  $I_1=I_{ном}$ ,  $\cos\varphi_1=0,87$ .

Для  $\cos\varphi_1=1$  – погрешности отнесены к максимальной реактивной мощности по первой гармонике при  $U_1=U_{ном}$ ,  $I_1=I_{ном}$ ,  $\cos\varphi_1=0$  ( $Q_{МАКС}=2Q_T$ ).

Как видно, для реактивной мощности значения ошибок измерения могут достигать значительных уровней. При этом на погрешность влияют, как величины, так и фазовые углы сдвига между напряжениями и токами каждой из гармоник. Здесь нет алгебраического сложения мощностей всех гармоник, как в случае с активной мощностью. Поэтому значение погрешности счетчика реактивной энергии потребителя, получающего некачественную электроэнергию, будет значительно ниже, чем у потребителя, генерирующего высшие гармоники. Так что в случае с реактивной мощностью потребитель. Генерирующий высшие гармоники в сеть, сам себя «наказывает».

Индукционные счетчики слабо учитывают энергию, поступающую к ним на повышенных частотах [5]. Это связано с их конструктивными особенностями [8]:

- изменение рабочего магнитного потока последовательной обмотки связано с тем, что при изменении частоты приблизительно ей изменяется угол потерь. В результате этого изменяется составляющая тока нагрузки, идущая на создание рабочего магнитного потока токовой обмотки. Чем больше частота, тем больше угол потерь и тем меньше рабочий магнитный поток токовой обмотки;

- изменение рабочего магнитного потока параллельной обмотки связано с тем, что при изменении частоты изменяются активные потери на пути рабочего и нерабочего магнитных потоков. Потери на пути рабочего потока являются значительными, на пути нерабочего потока незначительны. Соотношение между потоками меняется, что и вызывает дополнительную погрешность;

- изменение самоторможения параллельной цепи связано с приблизительно обратно пропорциональной зависимостью рабочего магнитного потока от частоты. Момент торможения пропорционален квадрату рабочего потока, то при увеличении частоты этот момент уменьшается, появляется дополнительная отрицательная погрешность;

- изменение компенсационного момента связано с прямой зависимостью этого момента от частоты. Следовательно, при увеличении частоты, появляется дополнительный компенсационный момент, положительная погрешность.

Уровень основной погрешности индукционных счетчиков электроэнергии в условиях несинусоидальности может достигать десятков процентов [8].

Получается, что потребители с нелинейной нагрузкой оплачивают полное поступление энергии и не оплачивают ее «возврат» на повышенных частотах, а потребители с линейной нагрузкой получают своего рода «подарок» в виде некачественной электроэнергии.

Упоминание об индукционных счетчиках вовсе не дань истории. На сегодняшний день за рубежом наблюдается тенденция увеличения парка индукционных счетчиков. Так, например, в Англии доля элек-

тронных счетчиков электроэнергии достигла 95 %, однако, на сегодняшний день эта цифра уменьшилась до 65 % [9].

В случае, когда качество электроэнергии по коэффициенту обратной последовательности не соответствует ГОСТ [2], продавец, поставляющий покупателю активную энергию, не получает за нее от покупателя полную плату, поскольку счетчики электрической энергии алгебраически суммируют всю активную энергию, т. е. из энергии прямой последовательности вычитают энергию обратной [10]. На рис. 7 представлена диаграмма обмена некачественной активной электроэнергией между ее продавцом и покупателем для случая, когда продавец имеет симметричную систему генерирования, а покупатель – линейную несимметричную нагрузку. В этом случае продавец, поставляющий покупателю активную энергию, не получает за нее от покупателя полную плату, поскольку счетчики электрической энергии алгебраически суммируют всю активную энергию, т.е. из энергии прямой последовательности вычитают энергию обратной.



Рисунок 7 – Диаграмма обмена некачественной энергией при симметричной системе генерирования и несимметричной нагрузке [10]

Эта энергия распространяется по сетям и попадает к другим покупателям, имеющим симметричную линейную нагрузку. На рис. 8 показана диаграмма получения некачественной энергии таким покупателем. При этом наблюдается иная картина – покупатель оплачивает согласно показаниям счетчиков энергию не только прямой последовательности, но и обратной.



Рисунок 8 – Диаграмма обмена некачественной энергией при несимметричной системе генерирования и симметричной нагрузке [10]

**ВЫВОДЫ.** Точность показаний счетчиков электроэнергии существенно зависит от качества изме-

ряемой энергии. При этом погрешность может достигать значений 10–20 % (по данным фирмы Fluke до 68 % [11]) вплоть до выхода из строя счетчика.

С имеющимся на сегодняшний день парком счетчиков невозможно достоверно определить источник искажения качества электроэнергии. Соответственно, действующая система штрафов и санкций за нарушение ПКЭ неэффективна.

Для повышения точности учета и распределения ответственности за нарушение ПКЭ возникает необходимость создания принципиально новой распределенной микропроцессорной системы учета электроэнергии с использованием технологии синхронных векторных измерений, которая позволит в едином «абсолютном» времени определять величину и направление мощности разных гармоник, а также величину и направление мощности обратной и нулевой последовательности для каждого потребителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE Std 1459–2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. – March 2010. IEEE Standard 1459. – 40 p.
2. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 18.06.99. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 30 с.
3. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / А.Г. Каретин, А.А. Лучин, Ю.В. Раменский. – М.:

Московский Государственный Технический Университет МАМИ, 2011. – 298 с.

4. ADE7854/ADE7858/ADE7868/ADE7878: Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information Data Sheet (Rev H, 04/2014) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADE7854\\_7858\\_7868\\_7878.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7854_7858_7868_7878.pdf).

5. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

6. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроэнергии / В.В. Киеселев, И.С. Пономаренко // Промышленная энергетика. – 2004. – № 2. – С. 40–45.

7. Соколов В.С. Как работают электросчетчики при низком качестве энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.su/pdf/sokolov-2004.pdf>.

8. Исследование факторов, способных влиять на работу электросчетчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://habarok.com/issledovaniya/issledovaniya.shtml>.

9. Индукционные и электронные счетчики – что лучше? / Е.Г. Акимов, А.И. Шуляшко // Энергосбережение. – 2005. – № 5'2005. – С. 32–35.

10. Предложения по инженерному решению проблемы качества электрической энергии / В.С. Соколов, Н.В. Чернышева // Промышленная энергетика. – 2001. – № 8. – С. 51–53.

11. Проблемы качества электроэнергии в сетях 330–750 кВ ГП НЭК «Укрэнерго» / Д.В. Бородин, О.Г. Гриб, А.В. Сапрыка // Наукові праці ДонНТУ: Електротехніка і енергетика. – 2008. – Вип. 8 (140). – С. 179–182.

#### THE IMPACT OF POWER QUALITY ON THE ACCURACY OF METER READING: A REVIEW OF STUDIES

A. Voloshko, D. Filyanin

National Technical University of Ukraine “KPI”  
 prosp. Pobedy, 36, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: dany@mn.ru

This article describes functioning of various types of meters of active and reactive energy with non-sinusoidal and unbalanced conditions of the grid. Consumers with nonlinear load convert part of the sine wave energy into non-sinusoidal energy and return it back to the network. The impact of this "return" is different for different types of counters. Active energy meters algebraically summarize power of all the harmonics, that implies that powers of higher harmonics are subtracted from the power of the fundamental harmonic. Reactive energy meters dependent on the characteristics of nonsinusoidal current and voltage more complex. Similarly, consumers unbalanced load, return to the network energy negative-sequence, which is subtracted from energy positive-sequence. All these factors lead to an increase in error of power meters.

**Key words:** accuracy of meter readings, power quality, power measurement, harmonics, unbalanced conditions.

#### REFERENCES

1. IEEE Std 1459–2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions, March 2010.
2. GOST 13109–97. (1999), Quality standards of electrical energy in power systems for general use, introduced 18.06.99, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, Minsk, Belarus.
3. Karetin, A.G. (2011), *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Uchebnoe posobie* [Theory of Electrical Engineering: Tutorial], Moscow State Technical University MAMI, Moscow, Russia.
4. ADE7854/ADE7858/ADE7868/ADE7878: Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information Data Sheet (Rev H, 04/2014), available at: [www.analog.com/static/importedfiles/data\\_sheets/ADE7854\\_7858\\_7868\\_7878.pdf](http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/ADE7854_7858_7868_7878.pdf) (accessed May 29, 2014).
5. Zhelezko, Yu.S. (2009), *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moschnost. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Electricity losses. Reactive power. Power quality: a guide for practical calculations], ENAS, Moscow, Russia.

6. Kiselev, V.V., Pnomarenko, I.S. (2004), “Effect of non-sinusoidal voltage and current readings of digital electricity meters”, *Promishlennaya Energetika*, no. 2, pp. 40–45.

7. Sokolov, V.S. (2004), “How energy meters operate at low power quality”, available at: <http://www.autex.spb.su/pdf/sokolov-2004.pdf> (accessed May 29, 2014).

8. “Study of the factors which affect the electric power meters”, available at: <http://habarok.com/issledovaniya/issledovaniya.shtml> (accessed May 29, 2014).

9. Akimov, E.G., Shuleshko, A.I. (2005), “Induction and electronic meters – which is better?”, *Energoberegenie*, no. 5, pp. 32–35.

10. Sokolov, V.S., Chernysheva, N.V. (2001), “Suggestions for solution engineering problems of power quality”, *Promishlennaya Energetika*, no. 8, pp. 51–53.

11. Borodin, D.V., Grib, O.G., Sapryka, A.V. (2008), “Power quality problems in networks of 330–750 kV GP “Ukrenergo””, *Naukovi pratsi DonNTU-Elektrotekhnika i energetika*, vol. 8, no. 140, pp. 179–182.

Стаття надійшла 16.07.2014.