

О ПРОИСХОЖДЕНИИ И ИЗМЕРЕНИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

**О.В. БОЛЬШАКОВ (ПАО “ФСК ЕЭС”, г. Москва),
 О.А. ВАСИЛЬЕВА (ЗАО “Алгоритм”, г. Санкт-Петербург)**



Рассмотрен вариант количественного учета искажений качества электроэнергии на основе понятия энергии искажений, которая может являться базовой величиной для организации бизнеспроцесса, мотивирующего улучшение качества электроэнергии в процессе генерации, транспорта, распределения и потребления. Приведены результаты измерений параметров и показателей качества электрической энергии у потребителей с нелинейной нагрузкой.

Ключевые слова: качество электроэнергии, гармонические искажения, энергия искажений.

Наиболее часто встречающиеся систематические нарушения качества электроэнергии – это отклонения напряжения, несимметрия фазных (линейных) напряжений и гармоники основной частоты. Эти нарушения качества электроэнергии могут приводить к заметному изменению режима работы силового оборудования и требуют специального рассмотрения. Изучение влияния различных параметров качества электроэнергии на технологические процессы может приводить к противоречивым выводам [1]. Например, зависимость вредного влияния от номера гармоники может быть спадающая (амплитуда вибрации роторов) или нарастающая (нагрев сердечников токами Фуко). Поэтому количественное измерение компенсации за некачественную электроэнергию, в общем случае, является трудной задачей.

Для упрощения рассмотрения предлагается использовать одну интегральную характеристику, с помощью которой можно выразить количественные отклонения стационарных

параметров качества электроэнергии. Этой характеристикой может быть энергия искажений. Она включает в себя энергию гармоник выше первой, а также энергию нулевой и обратной последовательностей для основной частоты (возможно реактивную энергию). Эти составляющие электроэнергии не имеют сейчас средств регулирования и компенсации в сети. Отклонения установившегося напряжения не попадают в энергию искажений, поскольку должны регулироваться балансом мощности, переключением схемы сети и условиями в договорах на электроснабжение.

Дальнейшее рассмотрение гармонических искажений базируется на законе сохранения энергии и ортогональности базисных векторов гармонического ряда.

Рассмотрим потребителя с линейным нагревательным элементом и тиристорным регулятором мощности, присоединенного к сети в точке общего присоединения, с эквивалентным сопротивлением короткого замыкания шины $R_{кз}$, через счетчик электроэнергии [2] и средство измерения показателей качества электроэнергии. Предполагаем в дальнейшем рассмотрении, что внутреннее сопротивление генератора равно нулю. Упрощенная схема показана на рис. 1.

Дальнейший анализ можно выполнять рассмотрением токов либо мощностей всех гармоник в узлах. Полный ток равен сумме тока основной гармоники и всех остальных гармоник с учетом углов и сумма всех токов узла равна нулю, например [3]. В некоторых зару-

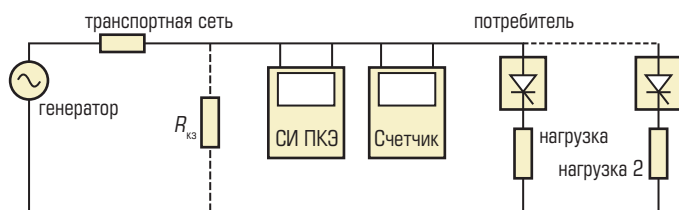


Рис. 1. Эквивалентная схема подключения искажающей нагрузки к распределительной сети. На границе между сетью и потребителем установлены счетчик электроэнергии и средство измерения показателей качества электроэнергии

бежных стандартах [4] ограничиваются значения токов искажений. Токи обладают аддитивностью по определению, и векторная сумма токов в узле равна нулю по закону Кирхгофа. Мощности же обладают аддитивностью вследствие ортогональности гармонических составляющих (полная мощность равна сумме мощностей всех гармоник), и сумма мощностей в узле равна нулю из закона сохранения энергии. Поэтому математические рассуждения на основе мощностей и токов схожи.

Вариант, основанный на рассмотрении токов, хорошо описывает долевые вклады разных потребителей. Однако ввести обобщающую интегральную характеристику искажений для построения бизнес процесса на основе рассмотрения векторов токов затруднительно. Предлагается использовать интеграл по времени от мощности искажений – энергию искажений. Величина энергии является привычной и давно используется при экономических расчетах за электроэнергию.

Согласно закону сохранения энергии, сумма мощности, потребленной потребителем и оставшейся в сети (искаженной), равна полной мощности, поступившей в сеть:

$$W_{ген} = W_{потребитель} + W_{сеть}, \tag{1}$$

где $W_{ген}$ – полная энергия, выработанная генератором,

$W_{потребитель}$ – энергия, включая гармоническую, поглощенная потребителем,

$W_{сеть}$ – энергия, поглощенная сетью.

Каждый член уравнения (1) является суммарной энергией с учетом всех гармоник. Полная энергия, поступающая в сеть и потребителю – это энергия основной частоты 50 Гц, поскольку именно она вырабатывается генератором. Тогда уравнение (1) распадается на систему уравнений для каждой гармоники. Причем $W_{ген}$ для всех гармоник кроме первой будет равна нулю (генератор не вырабатывает напряжение гармоник и его внутреннее сопротивление для тока гармоник пренебрежимо мало). Нелинейный потребитель при подаче напряжения 50 Гц “вырабатывает” (генерирует) напряжения гармоник U_i разной амплитуды в соответствии с характером нелинейности. Для расчетов распространения гармонических искажений и режима работы сети можно рассматривать сеть в виде многослойной модели, где каждый слой описывает распространение одной гармонической составляющей (рис. 2).

Эти гармонические напряжения вызывают ток в контуре потребитель-сеть и приводят к перетоку энергии гармоник от потребителя в сеть. Тогда уравнение (1) примет вид (2)

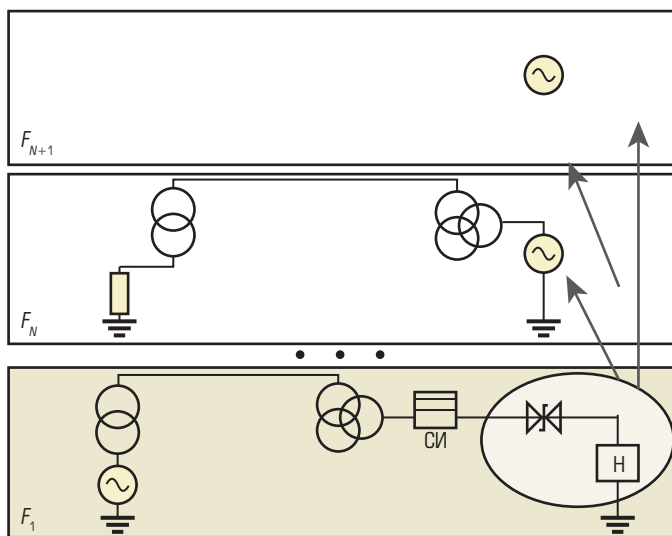
$$W_{ген(50)} = \left[\sum_{i=2}^{50} W_{искажений(i)} \right] + \left[W_{ген(50)} + \sum_{i=2}^{50} -W_{потребленная(i)} \right], \tag{2}$$

где $\sum_{i=2}^{50} -W_{потребленная(i)}$ – энергия, переходящая

из основной частоты в энергию всех гармоник на нелинейности потребителя. При этом в сети появится ровно столько энергии каждой гармоники, сколько ее “инициирует” нелинейный потребитель (больше источников энергии гармоник в схеме нет). Поэтому энергия $W_{потребленная}$ и энергия $W_{искажений}$ должны быть равны друг другу по модулю и противоположны по знаку для всех $i \neq 1$.

$$W_{потребленная(i)} = -W_{искажений(i)}. \tag{3}$$

Прибор контроля качества электроэнергии с возможностью отдельного измерения энергии гармоник [5], подключенный согласно рис. 1, покажет потребленную электроэнергию основной частоты, распространяющуюся к искажающему потребителю, и энергию гармоник (искажений), распространяющуюся от потребителя в сеть и наоборот. Таким образом, происходит параметрическое **генерирование гармоник потребителем** в сети.



▲ Рис. 2. Многослойная модель сети. На нижнем слое показана эквивалентная схема фрагмента сети с нелинейным потребителем (выделен овалом). На среднем уровне эквивалентная схема для гармоники N, где нелинейный потребитель выступает как генератор. На верхнем слое показана аналогичная схема для гармоники N + 1 и т.д.



Рис. 3. Счетчики – измерители показателей качества электрической энергии BINOM3 (<http://www.binom3.ru/>)

Искажающий потребитель, конечно, не является классическим генератором гармоник, поскольку не является источником энергии. В действительности нелинейный или импульсный потребитель создает токи с частотой гармоник только при подаче напряжения основной частоты. Эти токи на сопротивлении короткого замыкания шины подстанции создают напряжения гармоник на шине и соответственно переток энергии гармоник. Причем направление распространения энергии гармоник должно быть преимущественно к шинам, так как ни генераторы, ни сети (в идеальном случае) гармонические составляющие не генерируют. Математически эквивалентно считать, что – либо потребитель гармониками тока потребления искажил часть энергии в сети, либо потребил энергию для себя и для преобразования, а затем преобразованную энергию на частотах гармоник “генерировал” в сеть.

В действительности, если на шине присутствуют несколько искажающих потребителей, то для каждой частоты могут возникать эффекты перетоков, компенсации и передавливания, аналогичные тем, что известны для частоты 50 Гц. Искажающий потребитель может получать энергию на частотах гармоник от более мощного искажающего потребителя через точку общего присоединения и предъявлять за это претензии.

Учитывая характерный состав гармонических токов, потребляемых нелинейными нагрузками, по измерениям показателей качества электрической энергии в точке присоединения потребителя иногда можно определить тип электроприемника потребителя.

В качестве примера в статье приведены результаты измерений параметров электрической энергии в точке присоединения потребителя с компьютерной и люминесцентной осветительной нагрузкой и в сети с частотно-

регулируемыми приводами. В числе рассматриваемых параметров – гармонические составляющие тока и напряжения, мощность гармоник на разных частотах, энергия основной частоты, энергия прямой последовательности, энергия с учетом несинусоидальности и несимметрии тока и напряжения, показатели качества электрической энергии.

Измерения получены со счетчиков BINOM3 (рис. 3), установленных у потребителей. Прибор является сертифицированным счетчиком электрической энергии по требованиям ГОСТ 31819.22, ГОСТ 31819.23 и средством измерений показателей качества электрической энергии по ГОСТ 32144, ГОСТ 30804.4.30 (для класса А), ГОСТ 30804.4.7 (для класса точности I), ГОСТ 33073, ГОСТ Р 8.655, ГОСТ 1317.4.15, регистрирует аварийные события и осциллограммы тока и напряжения (подключение к измерительным обмоткам трансформаторов). Полученные измерения развивают подход к рассмотрению влияния характеристик электроэнергии на учет количества электроэнергии, опубликованный в [6].

ПОТРЕБИТЕЛЬ С КОМПЬЮТЕРНОЙ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

На одном из питающих вводов 0,4 кВ ЗАО “Алгоритм” (г. Санкт-Петербург) установлен счетчик BINOM337U3.220I3.5S16T2 (220 В, 5 А). В составе электроприемников ввода преобладают компьютерное и лабораторно-испытательное оборудование (мониторы, системные блоки, серверы, ноутбуки, источники бесперебойного питания, калибраторы переменного тока, имитаторы нагрузки и др.), люминесцентные лампы.

Форма напряжения и потребляемого тока в точке измерений (рис. 4) отличается от синусоидальной и является близкой к симметричной относительно оси абсцисс, что может свидетельствовать о наличии нечетных и незначительности четных гармоник в напряжении и токе.

В спектре тока (рис. 5а) выражены нечетные гармоники 3, 5, 7, 9, 11, 13 и 15-го порядков, что характерно для перечисленной нагрузки. В спектре напряжения (рис. 5б) преобладают гармоники таких же порядков, как в спектре тока.

В спектре мощности гармоник (рис. 5в) мощность тока и напряжения основной частоты в каждой фазе положительна (направлена от



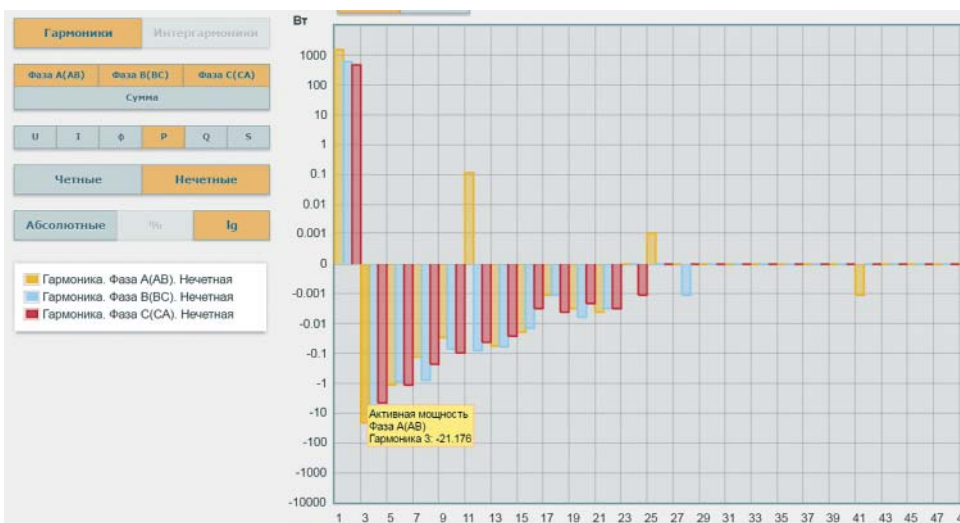
Рис. 4.
 Ввод 0,4 кВ.
 Осциллограмма фазных токов и напряжений (период измерений мгновенных значений – 31,25 мкс)



а) Спектр гармоник тока I_n / I_1 , % (линейная шкала)



б) Спектр гармоник напряжения U_n / U_1 , % (линейная шкала)



в) Спектр мощности гармоник P_n , Вт (логарифмическая шкала)

Рис. 5. Ввод 0,4 кВ. Спектры нечетных гармоник тока, напряжения, мощности гармоник (среднеквадратические значения на интервале 10 периодов частоты, 3 фазы: фаза А – желтый, фаза В – голубой, фаза С – красный)

Таблица 1. Среднеквадратические значения тока, напряжения, мощности гармоник в фазе А для спектров рисунка 4

Номер гармоники	$U_{(n)A}$		$I_{(n)A}$		$P_{(n)A}$
	B	%	A	%	$Вт$
1	217,653	100,000	7,32958	100,000	1555,714
3	12,471	5,728	3,23452	43,544	-21,176
5	2,689	1,218	1,75371	23,601	-1,140
7	2,934	1,377	0,69482	9,763	-0,130
9	1,269	0,611	0,29987	3,886	-0,029
11	0,730	0,367	0,40788	5,596	0,117
13	0,531	0,254	0,10470	1,338	-0,055
15	0,282	0,120	0,08776	1,205	-0,019

сети к потребителю), а мощность высших гармоник – на большинстве частот отрицательна (направлена от потребителя в сеть). Выборка для преобладающих гармоник в спектрах тока, напряжения, мощности в фазе А приведена в таблице 1. Наибольшее значение имеют параметры 3-ей гармоники.

Согласно определению для активной мощности при периодических несинусоидальных токах и напряжениях как сумме активных мощностей всех гармонических составляющих тока и напряжения с учетом знака (в целях упрощения интергармонические составляющие не рассматриваются), имеем:

$$P_{\Sigma} = \sum_{n=1}^{n=\infty} P_{(n)} = P_1 + P_2 + \dots + P_{(n)} + \dots = U_1 I_1 \cos\varphi_1 + U_2 I_2 \cos\varphi_2 + \dots + U_{(n)} I_{(n)} \cos\varphi_{(n)} + \dots \quad (4)$$

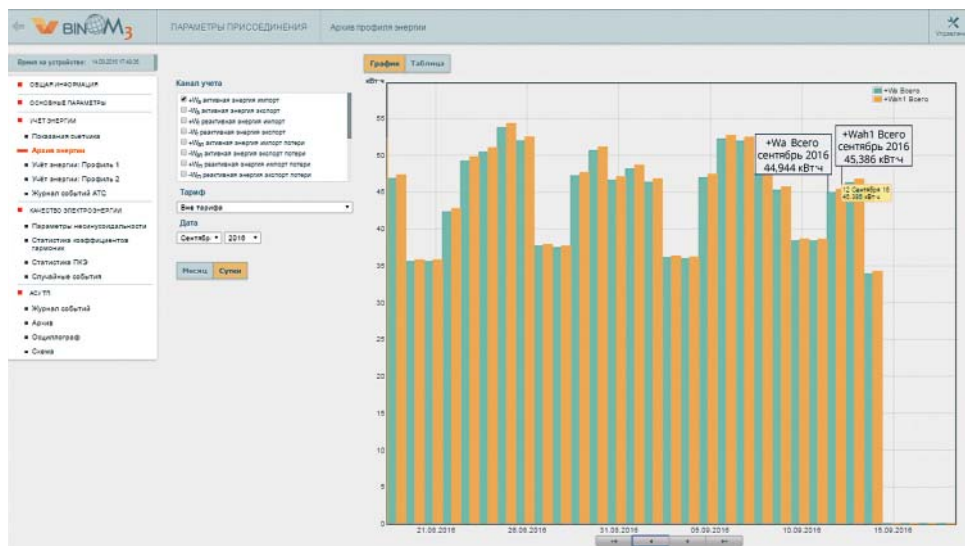
где $U_{(n)}$ – среднеквадратическое значение гармоники напряжения частотой n ,
 $I_{(n)}$ – среднеквадратическое значение гармоники тока частотой n ,

$\cos\varphi_{(n)}$ – угол фазового сдвига между током и напряжением частотой n ,
 $P_{(n)}$ – активная мощность гармоник тока и напряжения частотой n .

В данном случае результирующая активная мощность в фазе А с учетом всех частот (до 50-го порядка в BINOM3) P_{Σ} составила 1 533,273 Вт, что меньше значения активной мощности основной частоты P_1 , равной 1 555,714 Вт (таблица 1). Таким образом, в точке присоединения потребителя мощность содержит отрицательные гармоники, направленные от потребителя в сеть. Эта отрицательная мощность гармоник уменьшает значение положительной мощности основной частоты (возможно, и других частот), поступающей из сети к потребителю.

То же самое имеет место в отношении энергии. Активная энергия трехфазного ввода является интегральной величиной по времени активной мощности в фазах. На графиках суточного и месячного потребления (рис. 6 и 7 соответственно) сопоставлено количество

Рис. 6.
Ввод 0,4 кВ.
Потребление активной энергии посуточно (каналы учета: активная энергия основной частоты, активная энергия с учетом гармоник и несимметрии)



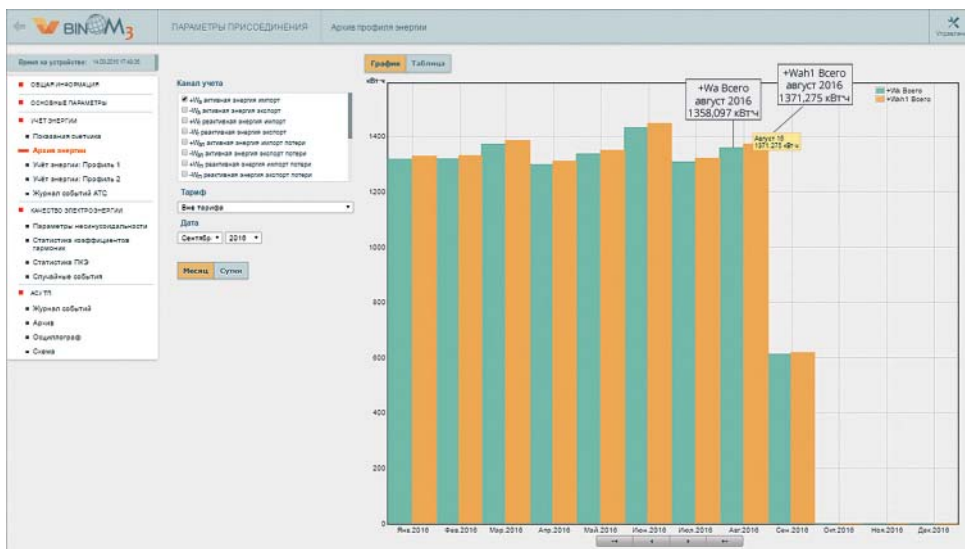


Рис. 7. Ввод 0,4 кВ. Потребление активной энергии по месяцам (каналы учета: активная энергия основной частоты, активная энергия с учетом гармоник и несимметрии)

энергии с учетом гармоник и несимметрии – “+Wa Всего” и количество энергии основной частоты – “+Wah1 Всего”.

Для каждого временного интервала (сутки, месяц) значение энергии с учетом гармоник и несимметрии меньше значения энергии основной частоты. Например, 12 сентября 2016 г. энергия основной частоты составила 45,386 кВт·ч, энергия с учетом гармоник и несимметрии – 44,944 кВт·ч, разность значений – 0,442 кВт·ч. В августе 2016 г. энергия основной частоты составила 1 371,275 кВт·ч, энергия с учетом гармоник и несимметрии – 1 358,097 кВт·ч, разность значений – 13,178 кВт·ч.

Разность значений энергии основной частоты и энергии с учетом гармоник и несимметрии представляет энергию гармонических искажений $W_{искажений}$, обусловленную отрицательной мощностью гармоник, на-

правленной от потребителя с нелинейной нагрузкой в питающую сеть, что практически подтверждает приводимые выше теоретические положения.

Аналогичные рассуждения могут быть проведены и относительно симметричных составляющих тока и напряжения. При несимметричной и нелинейной нагрузке энергия искажений может содержать две составляющие: обусловленную несинусоидальностью и обусловленную несимметрией. В таблице 2 приведены данные потребления электроэнергии, измеренной счетчиком по трем каналам учета по месяцам с начала года.

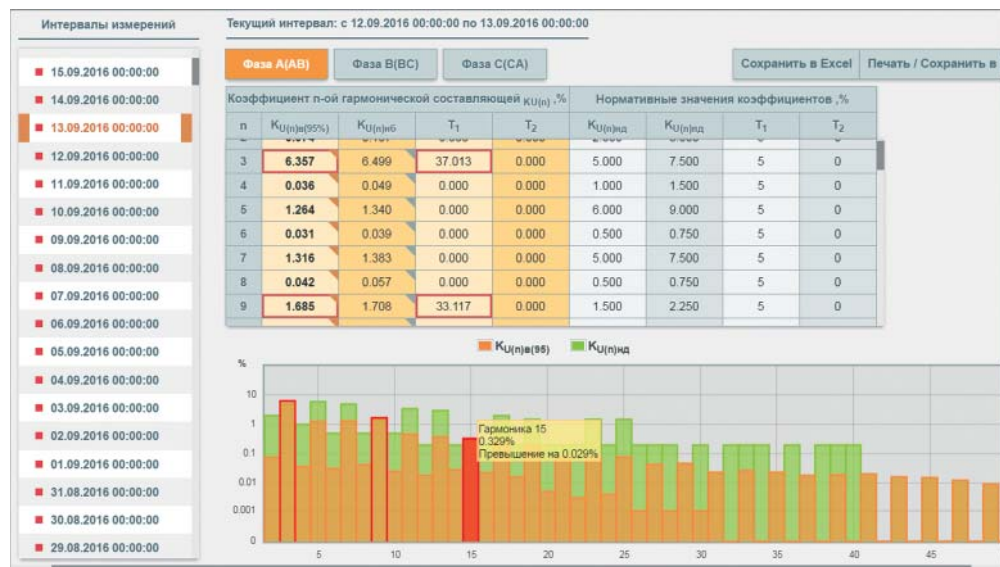
В каждом месяце значение активной энергии с учетом гармоник и несимметрии “+Wa” меньше значения активной энергии основной частоты “+Wah1”, которое, в свою очередь, меньше значения активной энергии основной частоты прямой последовательности “+Wad”.

Таблица 2. Параметры активной энергии, измеренной на вводе 0,4 кВ

Время	+Wa, кВт·ч канал учета 1	+Wah1, кВт·ч канал учета 2	+Wad, кВт·ч канал учета 3	(+Wad – +Wa), кВт·ч	(+Wad – +Wa)/ +Wad, %
Январь 2016	1316,904	1328,351	1331,860	14,956	1,12 %
Февраль 2016	1318,242	1329,943	1334,375	16,133	1,21 %
Март 2016	1371,341	1384,504	1389,288	17,947	1,29 %
Апрель 2016	1297,703	1310,168	1317,308	19,605	1,49 %
Май 2016	1336,379	1349,405	1354,277	17,898	1,32 %
Июнь 2016	1431,716	1446,793	1449,881	18,165	1,25 %
Июль 2016	1307,645	1320,591	1324,308	16,663	1,26 %
Август 2016	1358,097	1371,275	1374,852	16,755	1,22 %
Итого 2016	10 738,027	10 841,031	10 876,149	138,122	1,27 %

+Wa – активная энергия с учетом гармоник и несимметрии,
 +Wah1 – активная энергия основной частоты,
 +Wad – активная энергия прямой последовательности основной частоты.

Рис. 8.
Ввод 0,4 кВ.
Статистика коэффициентов гармоник (коэффициенты гармоник напряжения, усредненные на интервале времени 10 минут)



Разность значений потребленной энергии прямой последовательности основной частоты “+Wad” и энергии с учетом высших гармоник и несимметрии “+Wa”, измеренной с января по август 2016 г., составила 138,122 кВт·ч (1,27% энергии основной частоты).

Как отмечалось, токи высших гармоник, протекая по сети, вызывают падение напряжения на элементах сети, форма которого повторяет форму тока, и приводят к искажению показателей качества электрической энергии (ПКЭ) по напряжению.

Счетчик установлен стационарно и ведет постоянный контроль показателей качества электрической энергии. Длительность периода наблюдений для оценки соответствия ПКЭ нормативным значениям в примере составляет 1 сутки. Результаты статистической обработки ПКЭ показывают, что во всех периодах наблюдений превышены нормально допускаемые [7] значения коэффициентов гармоник напряжения 3-го, 9-го, 15-го порядков (рис. 8).

Из рисунка видно, что 12 сентября 2016 г. верхнее значение для 3-ей гармоники напряжения в фазе А в 95% времени наблюдений $K_{u(95\%)}$ составило 6,357% при нормативном 5%, относительное время превышения нормально допускаемого значения T_1 – 37,013% интервала времени наблюдения при нормативном – 5%.

Частоты, на которых нарушены нормативные значения коэффициентов гармоник напряжения, присутствуют в спектрах потребляемого тока и мощности (направлена от потребителя в сеть), что может свидетельствовать о вкладе, вносимом данным потребителем,

в ухудшение качества электрической энергии по напряжению.

Для самостоятельного ознакомления с представленными результатами и другими измерениями открыт on-line доступ непосредственно к счетчику по адресу <http://www.binom3.com/>

СЕТЬ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПРИВОДАМИ

В промышленности и коммунальном хозяйстве увеличивается использование частотно-регулируемых приводов (ЧРП). ЧРП обеспечивают работу механизмов собственных нужд на электростанциях и подстанциях, применяются на тяговых подстанциях электрифицированного транспорта, нефтегазовых производственных объектах, в системах водо- и теплоснабжения. На нефтедобывающих предприятиях мощность ЧРП установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), используемых при добыче нефти, может составлять 80% мощности всех электроприемников распределительной сети предприятия [8].

Преобразователи частоты в ЧРП, являясь нелинейной нагрузкой, ухудшают качество электроэнергии в системах электроснабжения. Порядок высших гармоник тока n, потребляемых частотными преобразователями приводов, определяется из выражения (5):

$$n = kp \pm 1 \tag{5}$$

где p — количество фаз выпрямителя ЧРП, k — натуральное число (k = 1, 2, ...).

Например, для трехфазной мостовой схемы (рис. 9) $p = 6$, и характерны 5 и 7, 11 и 13, 17 и 19, 23 и 25, 29 и 31 и т.д. гармоники в потребляемом токе.

Для иллюстрации приведены результаты измерений с месторождения нефти в Западной Сибири. От распределительного устройства (РУ) 6 кВ газотурбинной электростанции (ГТЭС) через подстанцию 35/6 кВ получает питание куст трансформаторных подстанций КТПН 6/0,4 кВ. От РУ 0,4 кВ КТПН электроэнергия распределяется непосредственно к УЭЦН.

Результаты измерений сняты со счетчика, установленного в РУ 6 кВ ГТЭС на присоединении линии в сторону подстанции 35/6 кВ и со счетчика на вводе 0,4 кВ одной из КТПН.

На секции шин 6 кВ ГТЭС суммарные коэффициенты гармоник напряжения превышают допустимые уровни в 100 % времени наблюдений (рис. 10 – таблица 5): верхнее значение $K_{u(95\%)}$ находится в пределах 14,391-14,521 % в фазах при нормативном значении 5 %, наибольшее значение $K_{u(100\%)}$ находится в пределах

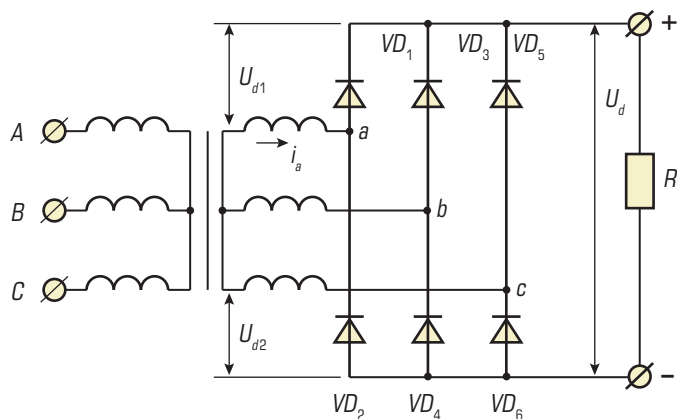


Рис. 9. Трехфазная мостовая схема выпрямления

14,418-14,552 % в фазах при нормативном значении 8 %.

При этом нарушены нормально и предельно допускаемые значения коэффициентов гармоник напряжения 3-го и 15-го порядков, и характерных для трехфазной мостовой схемы выпрямления 5-го и 7-го, 11-го и 13-го, 17-го порядков (рис. 10 – таблица 6). В спектрах среднеквадратических значений напряжения

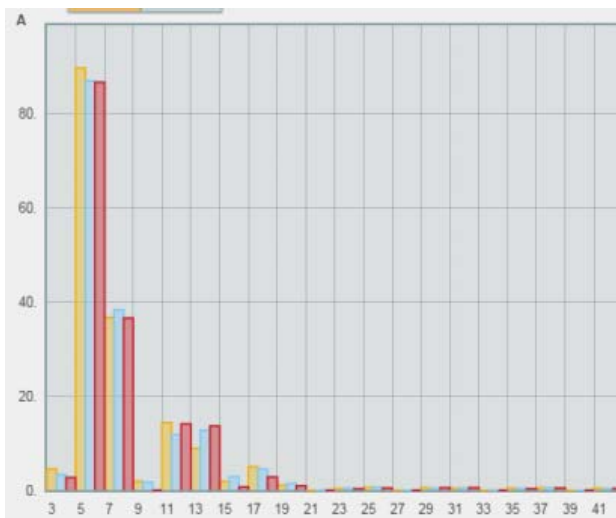
Таблица 5 - Результаты измерений суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжений

Измеряемая характеристика	Напряжение А (АВ)			Напряжение В (ВС)			Напряжение С (СА)			Нормативное значение
	Результат измерен.	T ₁ , %	T ₂ , %	Результат измерен.	T ₁ , %	T ₂ , %	Результат измерен.	T ₁ , %	T ₂ , %	
$K_{u(95\%)}$, %	14.521	100.000		14.395	100.000		14.391	100.000		5.000
$K_{u(100\%)}$, %	14.552		100.000	14.418		100.000	14.420		100.000	8.000

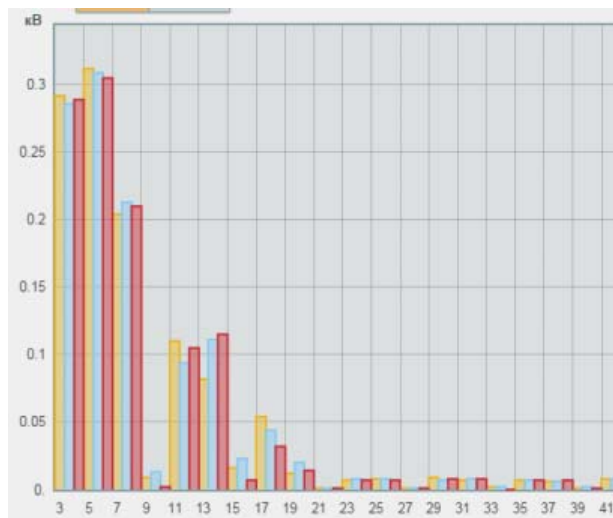
Таблица 6 - Результаты измерений коэффициентов гармонических составляющих напряжений порядка n

n	Результат измерений, %												Нормативное значение	
	Напряжение А (АВ)				Напряжение В (ВС)				Напряжение С (СА)					
	$K_{U(n)}(95\%)$	$K_{U(n)}(100\%)$	T ₁ , %	T ₂ , %	$K_{U(n)}(95\%)$	$K_{U(n)}(100\%)$	T ₁ , %	T ₂ , %	$K_{U(n)}(95\%)$	$K_{U(n)}(100\%)$	T ₁ , %	T ₂ , %	$K_{U(n)}(95\%)$	$K_{U(n)}(100\%)$
2	0.049	0.050	0.000	0.000	0.046	0.048	0.000	0.000	0.055	0.059	0.000	0.000	1.500	2.250
3	8.662	8.690	100.000	100.000	8.405	8.427	100.000	100.000	8.516	8.539	100.000	100.000	3.000	4.500
4	0.052	0.053	0.000	0.000	0.048	0.049	0.000	0.000	0.030	0.031	0.000	0.000	0.700	1.350
5	9.297	9.318	100.000	100.000	9.136	9.169	100.000	100.000	9.008	9.033	100.000	100.000	4.000	6.000
6	0.038	0.039	0.000	0.000	0.029	0.030	0.000	0.000	0.038	0.039	0.000	0.000	0.300	0.450
7	6.066	6.099	100.000	100.000	6.279	6.300	100.000	100.000	6.183	6.207	100.000	100.000	3.000	4.500
8	0.032	0.033	0.000	0.000	0.031	0.033	0.000	0.000	0.026	0.027	0.000	0.000	0.300	0.450
9	0.271	0.277	0.000	0.000	0.399	0.404	0.000	0.000	0.063	0.070	0.000	0.000	1.000	1.500
10	0.028	0.029	0.000	0.000	0.048	0.050	0.000	0.000	0.060	0.062	0.000	0.000	0.300	0.450
11	3.298	3.313	100.000	97.222	2.826	2.849	100.000	0.000	3.122	3.135	100.000	63.889	2.000	3.000
12	0.040	0.042	0.000	0.000	0.032	0.032	0.000	0.000	0.051	0.053	0.000	0.000	0.200	0.300
13	2.496	2.520	100.000	0.000	3.338	3.357	100.000	96.528	3.478	3.503	100.000	100.000	2.000	3.000
14	0.041	0.044	0.000	0.000	0.036	0.037	0.000	0.000	0.032	0.033	0.000	0.000	0.200	0.300
15	0.484	0.489	100.000	34.722	0.711	0.719	100.000	100.000	0.258	0.262	0.000	0.000	0.300	0.450
16	0.048	0.049	0.000	0.000	0.040	0.044	0.000	0.000	0.025	0.027	0.000	0.000	0.200	0.300
17	1.572	1.615	39.583	0.000	1.277	1.312	0.000	0.000	0.937	0.956	0.000	0.000	1.500	2.250

Рис. 10. Присоединение РУ 6 кВ ГТЭС. Протокол испытаний электрической энергии (значения, усредненные на интервале 10 мин.)



а) Спектр гармоник тока $I_{(n)}$, А (линейная шкала)



б) Спектр гармоник напряжения $U_{(n)}$, кВ (линейная шкала)

Рис. 11. Присоединение РУ 6 кВ ГТЭС. Спектры нечетных гармоник (среднеквадратические значения на интервале 10 периодов частоты, 3 фазы: фаза А – желтый, фаза В – голубой, фаза С – красный)

и потребляемого тока выделяются гармоники таких же порядков (рис. 11).

На вводе 0,4 кВ КТПН уровень нелинейных искажений формы напряжения на сборных шинах 0,4 кВ также превышает нормативное значение в 100 % времени наблюдений (рис. 12).

Согласно протоколу испытаний электроэнергии (в статье не приводится) превышены коэффициенты гармоник напряжения 5, 7, 11, 15, 21, 23, 27, 33 и 39-го порядков. Различия в гармоническом составе напряжения на секциях 6 кВ ГТЭС и 0,4 кВ КТПН могут быть связаны с взаимным влиянием нелинейных нагрузок куста КТПН и других объектов, запитанных от сборных шин ГТЭС.

Пример показывает, что частотные приводы потребляют ток с характерным составом гармоник. Порядок гармоник – на единицу больше и на единицу меньше, чем каждое число, кратное числу фаз схемы выпрямления

во входной цепи частотного преобразователя. Искажения сетевого напряжения могут превышать нормально и предельно допускаемые уровни в 100 % времени. Высокий уровень несинусоидальности тока и напряжения в сети с частотно-регулируемыми приводами подтверждают и результаты исследований других авторов [8].

Выводы

1. Предложено количественное описание искажений качества электроэнергии с помощью интегрального параметра – энергии искажений и показана правомерность такого подхода.
2. Проанализированы закономерности проявления энергии искажений и предложена физическая интерпретация аппаратно измеряемых параметров. Показано влияние энергии искажений на аппаратно регистрируемую потребленную энергию.

Таблица 5 - Результаты измерений суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжений

Измеряемая характеристика	Напряжение А (АВ)			Напряжение В (ВС)			Напряжение С (СА)			Нормативное значение
	Результат измерен.	T ₁ , %	T ₂ , %	Результат измерен.	T ₁ , %	T ₂ , %	Результат измерен.	T ₁ , %	T ₂ , %	
K _U , (95%), %	21.416	100.000		20.918	100.000		21.503	100.000		8.000
K _U , (100%), %	21.477		100.000	20.966		100.000	21.540		100.000	12.000

Рис. 12. Ввод 0,4 кВ КТПН-8. Протокол испытаний электрической энергии (значения усредненные на интервале 10 мин.)

3. Результаты измерений у потребителей с разным характером нелинейной нагрузки подтверждают нарушение норм, установленных стандартами, для коэффициентов гармоник напряжения.
4. Экспериментальные результаты подтверждают, что энергия, потребляемая нелинейным потребителем с учетом гармоник меньше, чем энергия основной частоты.
5. Из рассмотрения следует, что подход, изложенный в [7], является недостаточным для создания механизма управления качеством электроэнергии.
4. *Стандарт IEEE 519-1992.* Допустимые уровни гармоник напряжений и тока для сетей США.
5. *“Методика (метод) измерений для расширенного списка показателей качества электроэнергии”*, ОАО “Фирма ОРГРЭС” атт. № 010-01/00032-2013, ФР.1.34.2014.17965.
6. *Киселев В.В., Пономаренко И.С.* Качество электроэнергии. – М. Промышленная энергетика № 2, 2004 г.

Список литературы

1. *Большаков О.В.* Экологичность электроэнергетики. Энергорынок № 10(81), 2010.
2. *ГОСТ 31819.22-2012.* “Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Часть 22. Статические счетчики активной энергии классов точности 0,2S и 0,5S”. Дата введения – 01.01.2014.
3. *Висяцев А.Н., Луцкий И.И., Тигунцев С.Г., Баглейбтер О.И.* Определение ДВП электрической энергии в ухудшение ее качества // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Тезисы докладов ежегодной Международной научно-технической конференции. – Иркутск: ИрГТУ, 2000. – С. 110-113.
7. *ГОСТ 32144-2013.* “Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”. Дата введения – 01.07.2014.
8. *Абрамов Б.И., Державин Д.А., Чуриков А.М., Новоселов Ю.Б., Суслов М.А., Шевырев Ю.В.* Инструментальные исследования качества электроэнергии на нефтепромыслах в условиях широкого применения частотно-регулируемых приводов. // “Нефтяное хозяйство”. 2016, № 01. С. 90-92.

Большаков Олег Владимович – главный метролог ПАО “ФСК ЕЭС”,

Васильева Ольга Алексеевна – генеральный директор ЗАО “Алгоритм” г. Санкт-Петербург.