

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

В.Н. БОВЫКИН, А.В. МОКЕЕВ
(ООО “ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР “ЭНЕРГОСЕРВИС”)



Рассматриваются вопросы совершенствования измерительных интеллектуальных электронных устройств, используемых в качестве источника информации для автоматизированных систем технологического управления. Особое внимание уделено вопросам повышения качества и достоверности измерений параметров режима электрической сети при несимметрии сети и несинусоидальности токов и напряжений.

Ключевые слова: автоматизированные системы технологического управления, интеллектуальные электронные устройства, цифровая подстанция, несинусоидальность, несимметрия сети, реактивная мощность, частотные фильтры.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве источников информации в автоматизированных системах технологического управления (АСТУ) в настоящее время используются различные многофункциональные устройства: измерительные преобразователи телемеханики, устройства синхронизированных векторных измерений, щитовые измерительные приборы, контроллеры присоединения и ряд других устройств. Перечисленные устройства обеспечивают различное качество измерений и существуют серьезные ограничения по применению ряда измерительных устройств в качестве источников информации в АСТУ [1, 2]. В наибольшей степени современным требованиям соответствуют устройства синхронизированных векторных измерений и многофункциональные измерительные преобразователи телемеханики [2].

Согласно технической политике ОАО “Россети” в составе АСТУ должны как можно чаще применяться интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) различного функционального назначения, в том числе устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики, измерительные устройства и др. Их принципиальное отличие от обычных устройств связано с реализацией стандартов цифровой подстанции МЭК 61850 [3].

ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ УСТРОЙСТВАМ

К интеллектуальным электронным устройствам, используемым в составе различных АСТУ, в том числе АСУ ТП подстанций, предъявляются повышенные требования по метрологическим характеристикам (точность измерений, диапазоны измерений, быстродействие, синхронность измерений и т.д.), выполняемым функциям, обеспечению требуемого уровня электромагнитной совместимости, поддержке стандартных протоколов обмена и, прежде всего, максимально полной реализации стандартов МЭК 61850 [3]. ИЭУ должны обеспечивать достоверность измерений в условиях несинусоидальности и несимметрии сети, в условиях электромагнитных и электромеханических переходных процессов. Для измерительных ИЭУ массового применения большое значение также имеет стоимость устройства, массогабаритные характеристики, расширенный температурный диапазон.

Рассмотрим реализацию указанных требований на примере многофункционального измерительного преобразователя телемеханики ЭНИП-2, который выполняет функции текущих и интегральных телеизмерений, телеуправления и телесигнализации, замещения щитового прибора, технического учета электроэнергии, мониторинга качества

Рис. 1.
Интеллектуальное электронное устройство
ЭНИП-2 с модулями расширения



электроэнергии, а также интеллектуального электронного устройства для цифровых подстанций (рис. 1).

Устройства ЭНИП-2 сертифицированы по относительным погрешностям измерений (0,2/0,5 %), обладают расширенными диапазонами измерений токов и напряжений, выполняют быстрые и медленные синхронные измерения параметров режима электрической сети по основной гармонике и/или с учетом высших гармоник.

Устройства ЭНИП-2 содержат от одного до трех портов RS-485 (МЭК 60870-5-101, Modbus RTU), один или два порта Ethernet 100BASE-TX или 100BASE-FX (МЭК 61850-8-1, МЭК 60870-5-104, МЭК 60870-5-101 по UDP, Modbus TCP). Также поддерживаются протоколы SNMP, NetBIOS, SNTP и протоколы резервирования локальных сетей PRP и RSTP.

Использование протокола PRP целесообразно при внедрении ЭНИП-2 в составе АСУ ТП подстанций. Для необслуживаемых подстанций рекомендуется применение интеллектуальных устройств ЭНИП-2 с поддержкой протокола резервирования RSTP и устройства сбора данных ЭНКС-3м. При этом отпадает необходимость в использовании сетевых коммутаторов Ethernet.

Устройство сбора данных ЭНКС-3м производит опрос ЭНИП-2, консолидацию и передачу данных в АСУ по протоколам МЭК 60870-5-101 и МЭК 60870-5-104, а также может подписываться на GOOSE-сообщения. ЭНКС-3м поддерживает передачу данных по

различным каналам, в том числе GSM, и имеет встроенный GPS/ГЛОНАСС-приемник.

В ЭНИП-2 реализована программируемая логика, которая оперирует данными дискретных входов (сухие контакты или бесконтактные датчики) и GOOSE-сообщениями. Благодаря возможностям горизонтальных связей между устройствами ЭНИП-2 посредством GOOSE-сообщений обеспечивается эффективная реализация оперативных блокировок [4].

В июле 2015 года многофункциональный преобразователь ЭНИП-2 успешно прошел процедуру сертификации на соответствие стандарту МЭК 61850 (уровень А) в НТЦ ФСК ЕЭС при участии DNV GL (Лаборатория КЕМА).

С учетом роста нелинейных нагрузок для современных измерительных ИЭУ особое значение приобретают вопросы обеспечения точности и достоверности измерений в условиях несинусоидальности и несимметрии сети.

В ЭНИП-2 рассчитываются следующие параметры, характеризующие несинусоидальность и несимметрию сети: коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения и тока, коэффициент гармонических искажений напряжения и тока, напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательности, коэффициенты несимметрии напряжений и токов по обратной последовательности. Дополнительно рассчитываются среднеарифметические и средние квадратические значения напря-

жений и токов. Все перечисленные выше параметры, а также дополнительные параметры, характеризующие несинусоидальность и несимметрию сети, с целью минимизации трафика передачи данных могут быть рассчитаны и в АСТУ. В этом случае при конфигурировании ЭНИП-2 необходимо задать передачу определенного набора данных. Другой вариант уменьшения количества передаваемых данных связан с использованием спорадической передачи данных.

ИЗМЕРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ И НЕСИММЕТРИИ СЕТИ

В службу технической поддержки ООО “Инженерный Центр “Энергосервис” часто поступают запросы относительно работы многофункционального измерительного преобразователя ЭНИП-2 в условиях несинусоидальности и несимметрии электрической сети. Несмотря на то, что вопросы измерений параметров режима электрической сети достаточно полно изложены в отечественной и зарубежной литературе, например [5-7], считаем необходимым с учетом ряда особенностей современных ИЭУ пояснить данные вопросы.

Прежде всего, хотелось бы выделить известный факт о необходимости использования при больших уровнях несимметрии и несинусоидальности сети только трехэлементных измерительных устройств. Измерения при подключении по двухэлементной схеме даже с использованием эффективных алгоритмов измерения активной и реактивной мощности дает погрешность при несимметрии сети до нескольких десятков процентов. Несинусоидальность токов и напряжений приведет к дополнительным погрешностям измерений.

Параметры, характеризующие несинусоидальность и несимметрию сети, рассчитываются в ЭНИП-2 на основе предварительно измеренных действующих значений тока, напряжения и других параметров режима электрической сети по основной гармонике и с учетом высших гармоник.

Оценка действующего значения фазного напряжения (тока) в ЭНИП-2 производится согласно следующего выражения:

$$U(t) = \sqrt{\int_{t-T_1}^t u^2(\tau)g_1(t-\tau)d\tau}$$

Здесь и далее, для большей наглядности, все алгоритмы ИЭУ приведены для аналогового устройства-прототипа. Вместо обычного усредняющего фильтра с прямоугольной импульсной функцией ($g_1(t) = 1, T_1 = 0,02$ с) в ЭНИП-2, как и во многих других измерительных устройствах, применяется частотные фильтры с более сложной импульсной функцией. За счет применения в ЭНИП-2 специально синтезированного фильтра обеспечивается точное измерение действующего напряжения (тока) с учетом высших гармоник при отклонении частоты в широких пределах. Следует отметить, что в ЭНИП-2 реализована предварительная фильтрация сигналов тока и напряжения для подавления свободных составляющих переходных процессов

В общем случае оценка действующего значения $U(t)$ является функцией времени. В стационарном (установившемся) режиме работы и при номинальной частоте сети квадрат действующего напряжения (тока) равен сумме квадратов действующих значений отдельных гармоник:

$$U^2 = \sum_{n=1}^N U_{(n)}^2, \tag{1}$$

где N – число учитываемых высших гармоник (в ЭНИП-2 до 40).

При отклонении частоты сети от номинального значения возникает погрешность измерений. Усредняющий фильтр в ЭНИП-2 синтезирован таким образом, чтобы минимизировать погрешности измерений действующих значений напряжения (тока).

Оценка действующего значения напряжения (тока) основной гармоники и начальной фазы производится в ЭНИП-2 с использованием алгоритма на базе оконного преобразования Фурье. Специально для ЭНИП-2 синтезирован усредняющий фильтр с конечной импульсной характеристикой, обеспечивающий эффективное подавление высших гармоник при отклонении частоты сети и подавление свободных составляющих электромагнитных переходных процессов.

Отдельно следует рассмотреть вопросы измерений активной, реактивной и полной мощности. В недорогих многофункциональных измерительных устройствах массового применения, в том числе измерительных преобразователях телемеханики, щитовых приборах и счетчиках электрической энергии, реализованы упрощенные алгоритмы измерения реактивной и полной мощности, использование

которых при несинусоидальности сети приводит к большим погрешностям измерений. Поэтому следует знать об ограничениях использования таких устройств при измерении ряда параметров режима электрической сети.

Измерение активной мощности (энергии) в большинстве измерительных устройств производится реализацией следующего алгоритма:

$$P(t) = \int_{t-T_3}^t u(\tau)i(\tau)g_3(t-\tau)d\tau.$$

Так же, как и в случае измерения действующих значений токов и напряжений, для повышения точности измерений при отклонении частоты сети используются специальные фильтры.

В установившемся режиме работы измерение активной мощности при номинальной частоте сети будет равно сумме активных мощностей гармоник:

$$P = \sum_{n=1}^N P_{(n)}.$$

Значения погрешностей, возникающих при отклонении частоты энергосистемы от номинального значения, зависят от применяемых алгоритмов частотной фильтрации.

Во многих измерительных устройствах российских и зарубежных производителей реактивная и полная мощность вычисляются по алгоритмам, справедливым только для синусоидальной сети: вначале вычисляется активная и полная мощность, а затем реактивная мощность

$$S = UI, \tag{2}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}. \tag{3}$$

В ряде измерительных устройств реактивная мощность и энергия рассчитываются только по основной гармонике, что во многих практических случаях приводит к меньшим погрешностям измерений, чем в случае реализации выражений (2) и (3).

Рассмотрим простой пример. Пусть в токах и напряжениях наряду с основной гармоникой содержится третья гармоника: $U_1, I_1, U_3, I_3, \varphi_1, \varphi_3$.

В этом случае активная, реактивная и полная фазные мощности определяются следующими выражениями:

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3,$$

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_3 I_3 \sin \varphi_3,$$

$$S^2 = U_1^2 I_1^2 + U_3^2 I_3^2.$$

Рассмотрим погрешности измерений при использовании двух перечисленных выше алгоритмов измерения реактивной и полной мощности.

Квадрат полной мощности при использовании выражения (2) будет равен

$$S^2 = U^2 I^2 = (U_1^2 + U_3^2)(I_1^2 + I_3^2) = (U_1^2 I_1^2 + U_3^2 I_3^2) + (U_1^2 I_3^2 + U_3^2 I_1^2).$$

Как следует из полученного выражения, квадрат полной мощности, рассчитанный с помощью выражения (2), содержит не только квадраты полной мощности первой и третьей гармоник, но и дополнительные компоненты, обусловленные напряжениями и токами разных гармоник, приводящие к погрешностям измерений полной и реактивной мощностей.

Погрешность измерения квадрата полной мощности для рассматриваемого примера равна $\Delta S^2 = U_1^2 I_3^2 + U_3^2 I_1^2$. В реальных условиях $U_3 \ll U_1$, тогда $\Delta S \approx U_1 I_3$. Относительная погрешность измерений полной мощности пропорциональна току третьей гармоники $\delta S \approx I_3 / I_1$ и, следовательно, может быть значительна даже при пренебрежимо малом уровне третьей гармоники в напряжении.

Реактивная мощность при рассматриваемых условиях $U_3 \ll U_1$ определяется в основном параметрами первой гармоники $Q \approx U_1 I_1 \sin \varphi_1$, а при использовании выражения (3) содержит весомую ошибочную компоненту

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \approx \sqrt{U_1^2 I_1^2 \sin^2 \varphi_1 - U_1^2 I_3^2}.$$

Третий метод измерения реактивной мощности основан на реализации следующего выражения:

$$Q = \sum_{n=1}^N Q_{(n)}. \tag{4}$$

Возможна прямая реализация алгоритма в измерительных устройствах, в которых производится измерение параметров сети по всем высшим гармоникам.

Для реализации выражения (4) для ЭНИП-2 был разработан специальный алгоритм, основанный на применении цифрового преобразования Гильберта и дополнительной фильтрации сигнала.

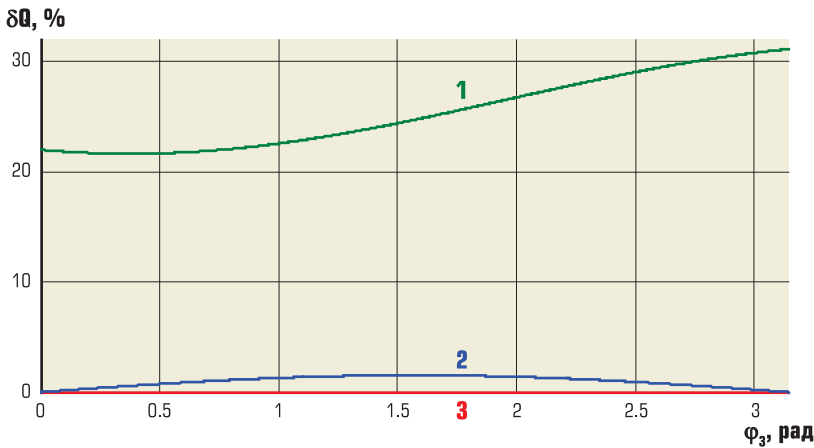


Рис. 2. Графики относительных погрешностей измерения реактивной мощности при малом уровне высших гармоник в напряжении

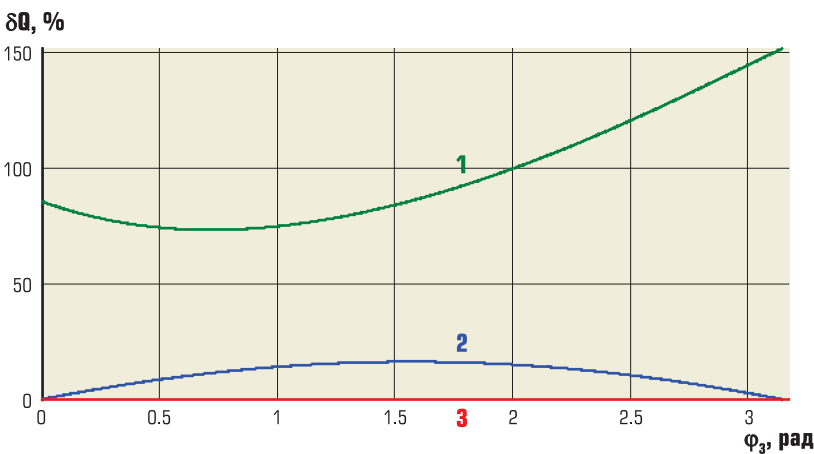


Рис. 3. Графики относительных погрешностей измерения реактивной мощности

На рис. 2 приведены графики относительных погрешностей измерений реактивной мощности при использовании алгоритма (3, кривая 1), при измерении реактивной мощности по реактивной мощности первой гармоники (кривая 2), в ЭНИП-2 (кривая 3) при следующих условиях: $U_3 = 0,02U_1$, $I_3 = 0,2I_1$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $\varphi_3 = 0^\circ \dots 180^\circ$ ($0 \dots \pi$).

На рис. 3 приведены аналогичные кривые при следующих условиях: $U_3 = 0,1U_1$, $I_3 = 0,5I_1$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $\varphi_3 = 0^\circ \dots 180^\circ$ ($0 \dots \pi$).

Следует отметить, что при определенном сочетании параметров основной и высших гармоник погрешность измерения реактивной мощности по первому методу может быть и меньше, чем по второму методу. Но однозначно можно констатировать, что второй метод более привлекателен в случаях, когда уровень высших гармоник в напряжении мал (для рассматриваемого примера $U_3 \ll U_1$), что очень часто и имеет место в эксплуатации.

Согласно стандарту IEEE 1459-2010 мощность несинусоидальной сети, рассчитываемая по выражению (2), называется неактивной [7]. Такое дистанцирование от привычного термина *реактивная мощность* связано, как следует

из рис. 2 и рис. 3, с очень большими погрешностями измерений.

По первому методу рассчитывается реактивная мощность в большинстве измерительных преобразователей телемеханики и в большинстве многофункциональных щитовых приборов. В одном из популярных в Российской Федерации многофункциональных приборов зарубежного производителя реактивная мощность по выбору пользователя вычисляется с использованием двух перечисленных методов (кривые 1 и 2 на рис. 2 и рис. 3). Причем четко подчеркивается, что по первому методу производится измерение так называемой неактивной мощности.

В многофункциональных счетчиках электрической энергии для измерения реактивной мощности и энергии преобладает применение второго метода (кривая 2).

Как следует из рис. 2 и рис. 3, измерительный преобразователь ЭНИП-2 среди массовых измерительных устройств выгодно отличается высокой точностью измерений реактивной мощности и энергии. Полная мощность в ЭНИП-2 вычисляется на основе выражения (2).

Известно, что для несинусоидальной сети:

$$S = UI \neq \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Поэтому в стандарте IEEE 1459-2010 вводят дополнительную мощность [7] – мощность искажения:

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

Вследствие возникновения методической погрешности измерений полной мощности из-за наличия в результате перемножения действующего напряжения на действующее значение тока компонентов от разных гармоник (так называемых взаимногармонических мощностей искажений) необходимо с пониманием относиться к полученным результатам расчета самой полной мощности и так называемой неактивной мощности. Следует отметить, что при наличии несинусоидальности сети не помогут никакие ухищрения, в том числе, предусмотренные в стандарте IEEE 1459-2010, с целью приблизить значения полных мощностей, рассчитываемых по выражениям $S = UI$ и $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Вместо формулы (2) для расчета квадрата полной мощности в несинусоидальных сетях более целесообразно определять полную мощность как сумму квадратов полных мощностей гармоник, аналогично тому, как вычисляются действующие значения напряжения (1):

$$S^2 = \sum_{n=1}^N S_n^2 = \sum_{n=1}^N U_n^2 I_n^2. \quad (5)$$

Другой способ вычисления полной мощности, приводящий к аналогичным результатам:

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^N P_{(n)}^2 + \sum_{n=1}^N Q_{(n)}^2}. \quad (6)$$

При этом будут отсутствовать методические погрешности измерений, и нет необходимости вводить дополнительные мощности, например, мощность искажения.

Алгоритмы (5) и (6) могут быть реализованы только в измерительных устройствах, в которых производится измерение параметров высших гармоник тока и напряжения. Такая возможность предусмотрена в новом многофункциональном измерительном интеллектуальном устройстве ESM, разработанном специалистами ООО “Инженерный Центр “Энергосервис” [8].

Список литературы

1. *Мокеев А.В.* Повышение качества телеинформации, используемой для оценки состояния и управления энергообъектами // Тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. “Современные энергетические системы и управление ими”. Новочеркасск, ЮРГТУ, 2006. Ч.1. С. 54-60.
2. *Бовыкин В.Н., Мокеев А.В.* Совершенствование метрологических характеристик интеллектуальных устройств // Автоматизация в энергетике. 2014. № 3. С. 4-10.
3. *Положение* ОАО “Россети” о Единой технической политике в электросетевом комплексе // ОАО “Россети”. 2013. 196 с.
4. *Бовыкин В.Н., Мокеев А.В.* Пример использования МЭК 61850 при создании ССПИ подстанций // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2015. № 7. С. 49-55.
5. *Шапиро Е.З.* О метрологическом обеспечении измерений реактивной электрической мощности и энергии // Сб. науч.-техн. конф. “Метрология электрических измерений в электроэнергетике”. ВНИИЭ, 2001.
6. *Смирнов С.С.* Высшие гармоники в сетях высокого напряжения. Новосибирск, Наука, 2010.
7. *Manuel A.* Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow. – Wiley & Sons Ltd, 2010. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. NY, 2015. P. 52.
8. *Мокеев А.В.* Интеллектуальные электронные устройства для распределительных устройств 6-35 кВ // Автоматизация в энергетике. 2014. № 12. С. 9-14.

ООО “ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР “ЭНЕРГОСЕРВИС”.

Мокеев Алексей Владимирович – докт. техн. наук, зам. генерального директора,

Бовыкин Владимир Николаевич – зам. директора департамента энергетических технологий.

E-mail: ed@ens.ru <http://www.enip2.ru>

Используйте

ЭНИП-2

для точных и достоверных измерений



совместно с модулем индикации ЭНМИ и модулями телеуправления ЭНМВ-1

поддержка МЭК 61850 | телесигнализация, телеуправление
технический учет электроэнергии | мониторинг качества электроэнергии
“сквозные каналы” для опроса счетчиков и доступа к терминалам РЗА



enip2.ru
(8182) 65-75-65