

Расширение функциональных возможностей и улучшение метрологических характеристик интеллектуальных электронных устройств

*Мокеев А.В.
ООО "Инженерный центр "Энергосервис",
Северный (Арктический) федеральный университет*

Введение

Согласно технической политике ПАО "Россети" в составе автоматизированных систем технологического управления (АСТУ) должны применяться преимущественно интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) различного функционального назначения, в том числе устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики, измерительные устройства [1]. Принципиальные отличия ИЭУ от традиционных устройств обусловлены преимуществами технологий цифровой подстанции, обеспечивающими не только более быстрые и надежные коммуникации, но и реализацию так называемых горизонтальных связей между ИЭУ [2]. Организация горизонтальных связей между ИЭУ позволяет реализовать надежную систему оперативных блокировок на подстанции, обеспечить реализацию более эффективных алгоритмов устройств защиты и автоматики, централизованных автоматических систем компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения на подстанции и т.д.

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 и т.д.), динамическим характеристикам, синхронности измерений, выполняемым функциям, обеспечению требуемого уровня электромагнитной совместимости. ИЭУ должны обеспечивать достоверность измерений в условиях несинусоидальности и несимметрии сети, в условиях электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

В докладе представлен опыт разработки и внедрения интеллектуальных электронных устройств, разработанных специалистами ООО "Инженерный центр "Энергосервис".

Интеллектуальные электронные устройства ЭНИП-2

Общие сведения. В ЭНИП-2 реализованы функции телемеханики (ТИ, ТУ, ТС), мониторинга качества электроэнергии, технического учета электроэнергии, замещения щитового измерительного прибора [3,4]. Наличие в ЭНИП-2 программируемой логики и

возможность обмена GOOSE-сообщениями с другими устройствами позволяет реализовывать оперативные блокировки и устройства режимной автоматики [5].

Устройства ЭНИП-2 сертифицированы по относительным погрешностям измерений (0,2, 0,5%), обладают расширенными диапазонами измерений токов и напряжений, выполняют быстрые синхронные измерения параметров режима электрической сети по основной гармонике и/или с учетом высших гармоник, обеспечивают подавление помех в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов [3,6].

Для расширения функциональных возможностей ЭНИП-2 дополняются модулями дискретного ввода/вывода, блоками телеуправления со встроенными реле, модулями ввода-вывода с различных датчиков по шине 1-Wire (температурные датчики, датчики влажности, датчики охранных систем и т.д.), модулями индикации на основе светодиодных индикаторов, черно-белых и цветных сенсорных ЖКИ (рис. 1).



Рис. 1. Многофункциональное интеллектуальное устройство ЭНИП-2

Для интеграции в АСУ ТП подстанций устройства ЭНИП-2 наряду с поддержкой протоколов МЭК 61850-8-1 (MMS- и GOOSE-сообщения) поддерживаются отраслевые и общепромышленные протоколы обмена МЭК 60870-5-101, МЭК 60870-5-104, Modbus RTU, МЭК 60870-5-101 поверх UDP, Modbus TCP, протокол TCP/IP Raw для подключения к сети Ethernet внешних устройств, протоколы локальных сетей SNMP, NetBIOS и протоколы резервирования PRP и RSTP. Для синхронизации внутренних часов ЭНИП-2 используются возможности протоколов SNTP, МЭК 60870-5-101, МЭК 60870-5-104. В модификации ЭНИП-2 с двумя портами Ethernet (100BASE-TX или 100BASE-FX) возможна как независимая работа портов, так и работа через встроенный сетевой коммутатор.

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).

При интеграции ЭНИП-2 в АСУ ТП подстанций совместно с устройствами релейной защиты и автоматики рационально использовать раздельную работу двух портов Ethernet в ЭНИП-2 и протокол бесшовного резервирования сети PRP (МЭК 62439-3).

Для **автоматизации необслуживаемых подстанций** рекомендуется применение интеллектуальных устройств ЭНИП-2 с поддержкой протокола резервирования RSTP и устройства сбора данных ЭНКС-3м. В этом случае отпадает необходимость в использовании большого количества сетевых коммутаторов Ethernet. Такой вариант обеспечит эффективный и сопоставимый по стоимости переход от использования промышленной сети RS-485 с протоколами Modbus, МЭК 60870-5-101 и т.д. к более производительной сети на базе Ethernet (на рис.2.).

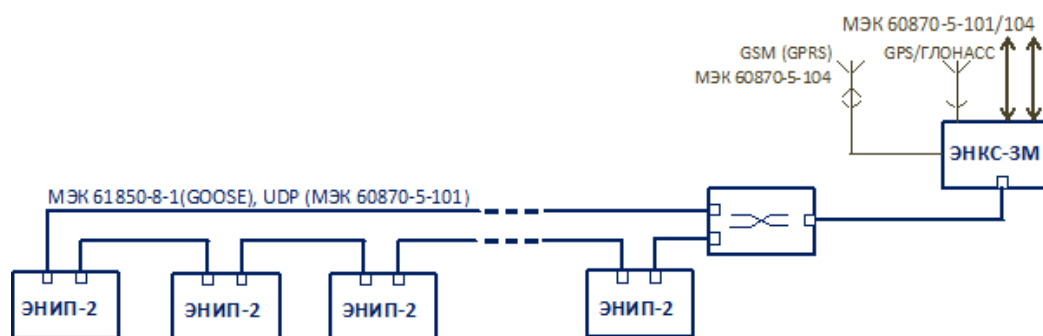


Рис.2. Автоматизация необслуживаемой подстанции

Для сбора и передачи данных в автоматизированные системы технологического управления используется устройство сбора данных ЭНКС-3м, которое производит опрос ЭНИП-2 по протоколу МЭК 60870-5-101 поверх UDP и обеспечивает агрегирование и передачу данных в АСТУ по протоколам МЭК 60870-5-101 и/или МЭК 60870-5-104 при использовании проводных каналов связи или МЭК 60870-5-104 через GSM канал. Устройство ЭНКС-3м содержит встроенный GPS/ГЛОНАСС-приемник, что обеспечивает синхронизацию времени для всех ИЭУ на подстанции.

Для организации горизонтальных связей между устройствами ЭНИП-2 используется протокол МЭК 61850-8-1. В ЭНИП-2 реализована программируемая логика, которая оперирует данными дискретных входов (сухие контакты или бесконтактные датчики) и GOOSE-сообщениями от других устройств. Благодаря возможностям горизонтальных связей между устройствами ЭНИП-2 посредством GOOSE-сообщений обеспечивается эффективная реализация оперативных блокировок [5].

Специалистами ООО “Инженерный центр ”Энергосервис” постоянно ведется работа по **совершенствованию метрологических характеристик ЭНИП-2**, в том числе связанных с

требованиями “Положения о Единой технической политике в ОАО ”Россети” по обеспечению высокой точности измерений в широком диапазоне измерения параметров режима электрической сети.

В новых модификациях ЭНИП-2 относительная погрешность измерений параметров режима электрической сети значительно ниже предельных значений, приведенных в документации на ЭНИП-2 и заявленных в описании типа [7].

На рис. 3 приведены графики относительных погрешностей измерения фазных токов (кривые 1,2,3), желтым цветом выделена область допустимых значений (4). На графике также приведены относительных погрешностей измерений для измерительных трансформаторов тока различного класса точности 0,2 и 0,2S (кривые 6 и 7) и измерительных устройств с основной приведенной погрешностью 0,2 (кривая 5). Метрологические характеристики ЭНИП-2 при измерении действующих значений токов значительно лучше, чем у ИТТ класса 0,2S.

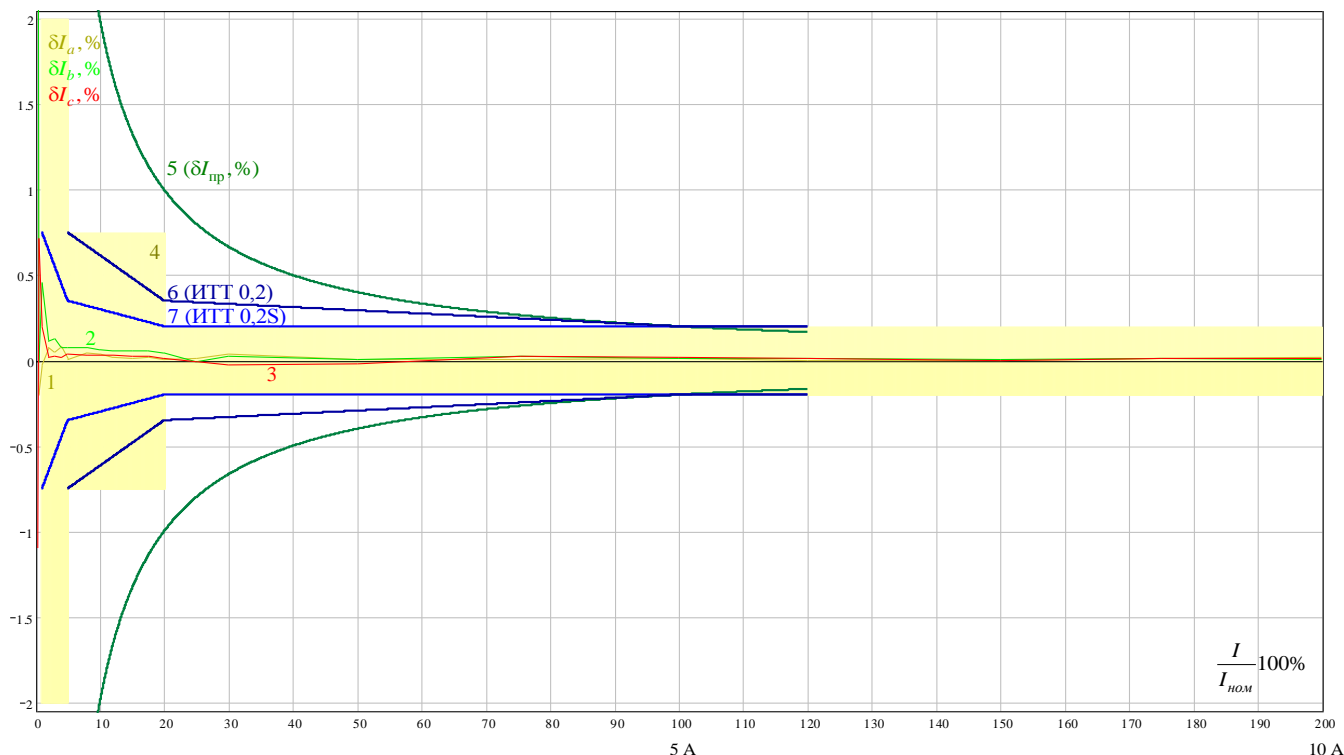


Рис. 3. Относительные погрешности измерений тока

С учетом роста нелинейных нагрузок для современных измерительных ИЭУ особое значение приобретают вопросы по обеспечению точности и достоверности измерений. В службу технической поддержки ООО «Инженерный Центр “Энергосервис”» часто поступают запросы относительно работы ЭНИП-2 в условиях **несинусоидальности и несимметрии электрической сети**. Несмотря на то, что вопросы измерений параметров режима электрической сети при ее несимметрии и несинусоидальности достаточно полно изложены в отечественной и зарубежной литературе, например, [8,9], 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, так как при подключении по двухэлементной схеме погрешности измерения активной и реактивной мощности могут достигать нескольких десятков процентов.

В современных измерительных ИЭУ реализуются один из трех способов измерения реактивной мощности (энергии):

1. на основе параметров токов и напряжений основной гармоники;
2. на основе измерения полной $S=UI$ и активной P мощности: $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$;
3. как сумма реактивных мощностей (энергий).

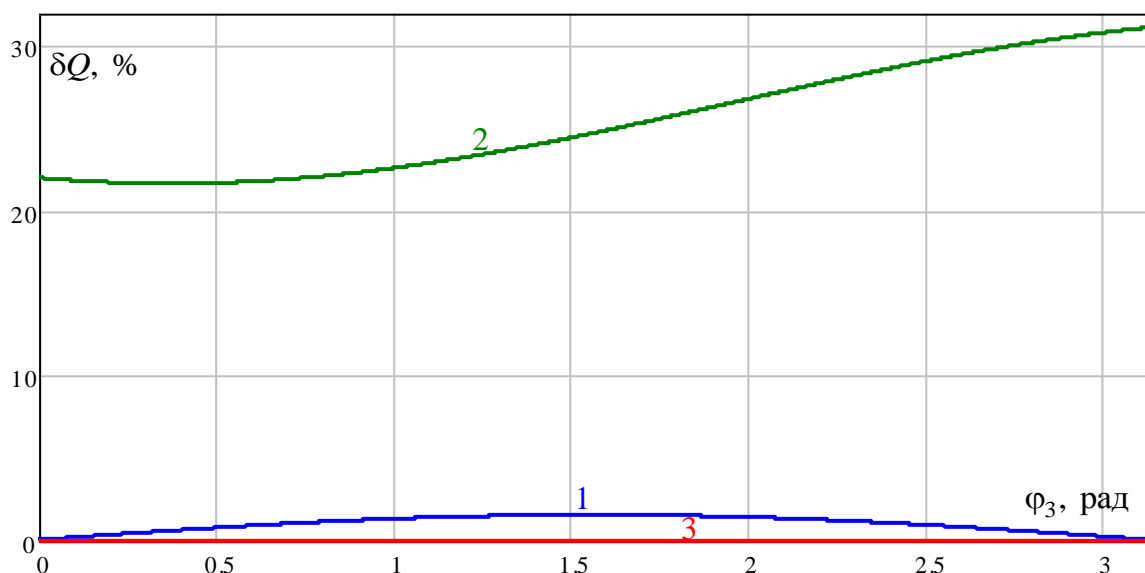


Рис. 4. Графики относительных погрешностей измерения реактивной мощности

Следует отметить, что при высоком уровне высших гармоник в токах и напряжениях только третий способ может обеспечить необходимую точность измерений. Возможна прямая реализация указанного способа в измерительных устройствах за счет измерения параметров режима сети по всем высшим гармоникам. В ЭНИП-2 реализован специальный алгоритм измерений реактивной мощности, основанный на применении цифрового преобразования Гильберта и дополнительной фильтрации сигнала.

На рис.4 приведены графики относительных погрешностей измерений реактивной мощности при измерении реактивной мощности по первому способу (кривая 1), при применении устройств с реализацией второго способа (кривая 1), при использовании ЭНИП-2 (кривая 3) при следующих условиях: $U_3 = 0,02U_1$, $I_3 = 0,2I_1$, $\phi_1 = 15^\circ$, $\phi_3 = 0^\circ \dots 180^\circ$ ($0 \dots \pi$).

Как следует из приведенных графиков, даже при небольшом уровне высших гармоник в напряжении, устройства с наиболее часто применяемым вторым алгоритмом измерения реактивной мощности (энергии) имеют чрезвычайно большие погрешности измерений. Это связано с наличием в полной мощности дополнительных составляющих от разных гармоник, так называемых взаимногармонических мощностей искажений [10].

Устройства синхронизированных векторных измерений

Устройства ЭНИП-2-PMU (ЭНИП-3) разработаны на базе многофункционального измерительного преобразователя телемеханики ЭНИП-2 и выполняют дополнительно функции устройства синхронизированных векторных измерений. Благодаря поддержке протоколов МЭК 60870-5-104 и IEEE C37.118.2 они могут интегрироваться как в СМНР, так и в АСТУ. Стоимость базовых модификаций ЭНИП-2-PMU сопоставима со стоимостью многофункциональных измерительных преобразователей телемеханики. Имеется модификация ЭНИП-2-PMU с цифровым входом согласно МЭК 61850-9-2LE.

Использование векторных измерений можно рассматривать как альтернативу *sampled values* (МЭК 61850-9-2LE), так как для многих ИЭУ достаточно использование синхрофазоров токов и напряжений основной гармоники для вычисления параметров режима энергосистемы. При этом резко снижаются требования к вычислительным ресурсам микропроцессоров ИЭУ различного функционального назначения и микропроцессорам централизованных систем управления. Дополнительно в ИЭУ целесообразно измерение эквивалентных векторов с учетом высших гармоник [11].

Интеллектуальные электронные устройства ESM

В настоящее время специалистами ООО “Инженерный центр “Энергосервис” завершаются работы по разработке нового многофункционального интеллектуального устройства ESM (рис.5), которое в дополнении к возможностям ЭНИП-2 выполняет функции счетчика коммерческого учета электроэнергии, прибора измерения показателей качества электроэнергии и устройства синхронизированных векторных измерений.

Интеллектуальное устройство ESM имеет 4 основные модификации (рис.5):

1. с аналоговыми входами (от измерительных трансформаторов тока и напряжения),
2. с аналоговыми низкочастотными входами (от преобразователей LPCT или датчиков тока на базе катушки Роговского, от емкостных или резистивных датчиков напряжения),
3. с цифровыми входами согласно МЭК 61850-9-2LE,
4. с цифровыми входами для подключения к низкочастотной шине процесса FlexRay.



Рис. 5. Многофункциональные измерительные устройства ESM

Все модификации ESM содержат встроенный сетевой коммутатор и внешних 4 порта Ethernet для подключения к шине подстанции (МЭК 61850-8-1) самого ESM и других ИЭУ.

Для индикации показаний ESM разрабатывается специальный модуль индикации ЭНМИ-5 с цветным сенсорным дисплеем. Возможна как отдельная установка ESM и ЭНМИ-5, так и их совмещение в единый конструктив с установкой на место щитового прибора.

Аналоговые устройства сопряжения с шиной процесса

Метрологические характеристики ИЭУ с поддержкой шины процесса во многом определяются метрологическими характеристиками аналоговых устройств сопряжения с шиной процесса (MU, Merging Unit). Указанные устройства “встраиваются” в современные первичные измерительные преобразователи на основе оптико-электронных преобразователей, катушек Роговского (AMU) или подключаются к традиционным трансформаторам тока и напряжения (SAMU, Stand-Alone Merging Unit).

Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU (рис.6) предназначено для подключения к традиционным измерительным трансформаторам и может использоваться совместно с ИЭУ различного функционального назначения, в том числе с устройствами релейной защиты и автоматики, устройствами синхронизированных векторных измерений, измерительными преобразователями телемеханики, измерительными устройствами.

ENMU содержит 2 порта 100BASE-FX с поддержкой протокола резервирования PRP (IEC 62439-3), предусмотрен дополнительный сервисный порт Ethernet. Синхронизация часов реального времени может производиться через оптический порт сигналом PPS, IRIG-A или IRIG-B, а также с помощью встроенного GPS/ГЛОНАСС-приемника (опционально).



Рис. 6. Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU

В ENMU дополнительно реализован *регистратора аварийных событий* и *PCMU* (Phasor Control and Measurement Unit). Дополнительно к протоколу МЭК 61850-9-2LE в ENMU реализованы протоколы IEEE C37.118.2 и МЭК 60870—5-104. Возможна одновременная передача 3 потоков sampled values (sv256, sv80m, sv80r) и потока векторных измерений.

Цифровая ячейка

Необходимость внедрения инновационных решений для КРУ 6-35 кВ связана прежде всего с большим количеством медных проводов как внутри ячейки, так и между ячейками, многократным дублированием аналоговых и дискретных сигналов для нужд релейной защиты, телемеханики, измерений и т.д., большой долей ручного труда и со сложностью тестирования ячейки во время ее сборки.

Если следовать современным трендам в области промышленной автоматизации, то следует полностью исключить аналоговые и дискретные цепи за счет использования встраиваемых в исполнительные устройства и датчики микроконтроллеров с целью повышения надежности и увеличения функциональности ИЭУ. Для интеграции указанных датчиков и исполнительных устройств целесообразно использовать низкоуровневую шину процесса с топологией общая шина, например, на базе сети FlexRay (максимальная скорость 10 Мбит/с) [12]. Таким образом получим общую шину данных как для оцифрованных аналоговых данных (фазные токи и напряжение, напряжение и ток нулевой последовательности, данные от датчиков температуры и др.), так и для данных от дискретных источников.

На рис.7 приведена структурная схема цифровой ячейки, в которой все аналоговые и дискретные датчики и исполнительные устройства имеют цифровой выход: блок управления

вакуумным выключателем 1, комбинированные датчики тока и напряжения (КДТН), датчик тока нулевой последовательности 2, актуатор (привод) выдвижного элемента с выключателем и актуатор заземляющего разъединителя 3, бесконтактные датчики положения с цифровым интерфейсом 4, подключаемые к шине процесса с помощью специального устройства сопряжения (шлюза) 5, оптические датчики дуговой защиты 6, температурные датчики 7. Аналогичным образом могут быть интегрированы и другие датчики для контроля аналоговых и дискретных процессов, в том числе дополнительные датчики тока и напряжения.

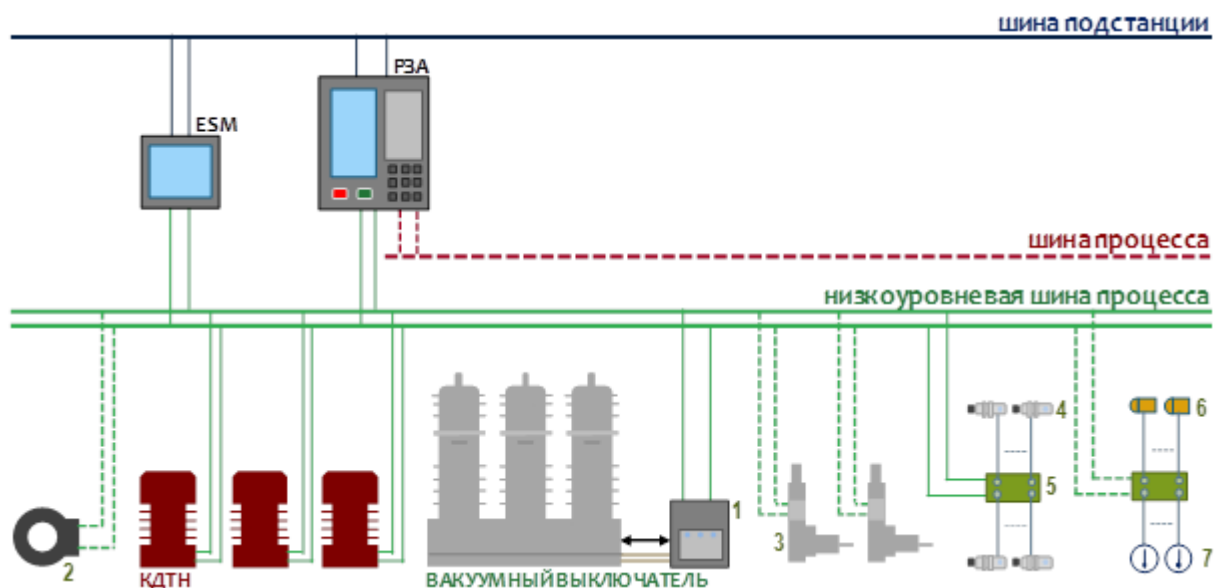


Рис. 7. Цифровая ячейка

Используемые в цифровой ячейке ИЭУ различного функционального назначения содержат только цифровые входы-выходы, что положительно скажется на их стоимости и массогабаритных показателях. Пунктиром на рис.7 выделено подключение устройств, применение которых не является обязательным. Сказанное относится и к шине процесса согласно МЭК 61850, для реализации которой используется встроенный в устройство РЗА шлюз FlexRay/IEC 61850.

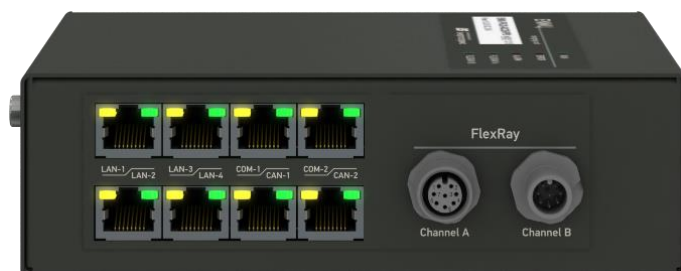


Рис. 8. Интеллектуальное устройство ENBC

Для создания цифровой ячейки согласно рис.7 специалистами ООО "Инженерный центр "Энергосервис" разработаны встроенные в КДТН устройства сопряжения с

низкоуровневой шиной процесса на базе FlexRay, специальная модификация многофункционального измерительного устройства ESM, устройство сопряжения с бесконтактными датчиками положения, устройство релейной защиты и контроллер присоединения ENBC (рис.8).

Одним из важнейших направлений совершенствования КРУ является замена традиционных электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, разработанных первоначально для электромеханических устройств РЗА и щитовых измерительных приборов, на современные первичные измерительные преобразователи тока и напряжения, в том числе трансформаторы тока малой мощности со встроенным шунтами и с низкоуровневыми выходным и напряжениями (Low Power Current Transformer, LPCT), датчики тока на основе катушки Роговского, емкостные или резистивные датчики напряжения. Перечисленные первичные измерительные преобразователи по сравнению с обычными измерительными трансформаторами тока и напряжения обладают существенными преимуществами по метрологическим характеристикам и по массогабаритным показателям. Выходные напряжения указанных первичных преобразователей подбираются исходя из параметров аналоговых микросхем, что позволяет значительно снизить габаритные размеры и вес как самих датчиков, так и ИЭУ.

Большинство указанных измерительных преобразователей содержат аналоговые электронные компоненты и с этим связано другое их название – электронные трансформаторы тока и напряжения. Следующий этап в развитии указанных преобразователей для КРУ 6-35 кВ связан с заменой аналоговых модулей, используемых для формирования выходных сигналов, на цифровые. Это позволит улучшить метрологические характеристики датчиков тока и напряжения, упростить процессы калибровки и реализовать мониторинг состояния датчиков.

Для комбинированных датчиков тока и напряжения (КДТН) ТЕСV.P1-10 фирмы “Оптиметрик” разработано встроенное аналоговое устройство сопряжения (рис.9). Электронный модуль размещен в основании датчика ТЕСV.P1-10 в очень ограниченном пространстве 60x80x22 мм. Цифровой комбинированный датчик тока и напряжения ТЕСV.P1-10 по сравнению с аналогичным датчиком с низкоуровневыми аналоговыми выходами обладает улучшенными метрологическими характеристиками, повышенной помехоустойчивостью, возможностью мониторинга состояния КДТН и цифровых каналов связи.

При этом устройство сопряжения формирует цифровые потоки выборочных значений (sampled values) тока от маломощного трансформатора тока (для измерений), от датчика тока

на основе катушки Роговского (для устройств релейной защиты) и от емкостного датчика напряжения.

В опытном образце встроенного в КДТН устройства сопряжения реализован порт FlexRay, обеспечивающий два резервируемых канала передачи данных. Содержимое передаваемых выборочных значений токов и напряжений от цифрового КДТН по сети FlexRay аналогично выборочным данным шины процесса цифровой подстанции. Поэтому данные легко могут быть конвертированы в протокол МЭК 61850-9-2. Дополнительно в цифровом КДТН обеспечивается измерение и передача синхронизированных векторных измерений токов и напряжений, а также эквивалентных синхрофазоров с учетом влияния высших гармоник.



Рис. 9. Встроенное в комбинированный датчик тока и напряжения устройство сопряжения

Подсистема дискретного ввода-вывода с использованием конечных выключателей, контактов коммутационных аппаратов и промежуточных реле является в настоящее время одной из наиболее консервативных подсистем в высоковольтных ячейках 6-35 кВ. В связи с этим многими отечественными и зарубежными производителями предпринимаются попытки использования более совершенных решений, в том числе связанных с переходом на цифровое взаимодействие интеллектуальных электронных устройств с блоками управления вакуумными выключателями, применением датчиков положения с цифровым выходом. Это позволит повысить надежность подсистемы дискретного ввода-вывода и реализовать мониторинг состояния силового оборудования и сети передачи данных с целью снижения эксплуатационных затрат.

Подстанции, оснащенные цифровыми ячейками, будут обладать более высоким уровнем надежности, обладать возможностью тестирования ячеек сразу после их сборки, будут обеспечивать возможность мониторинга и диагностики как отдельных компонентов ячеек, так и ячейки, и подстанции в целом.

Литература

1. Положение ОАО “Россети” о Единой технической политике в электросетевом комплексе // ОАО “Россети”. – 2013. – 196 с.
2. Baigent D., Adamiak M., Mackiewicz R. IEC 61850 Communication Networks and Systems In Substations: An Overview for Users // Protection&Control Journal, 2009. – pp. 61-68.
3. Мокеев А.В. Новое поколение интеллектуальных электронных устройств для цифровой подстанции // ИСУП. – 2013. – № 3. – С. 19-22.
4. Мокеев А.В. Интеллектуальные электронные устройства для цифровой подстанции // Сб. 7 Всерос. науч.-техн. конф. “Энергия белых ночей”. – 2014. – С. 99-108.
5. Бовыкин В.Н. Пример использования МЭК 61850 при создании ССПИ подстанций / А.В. Мокеев, В.Н. Бовыкин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2015. – № 7. – С. 49-55.
6. Digital Filters and Signal Processing / A.V. Mokeev and etc., Ed. F.P.G. Márquez and N. Zaman. Rijeka/ – InTech, 2013. – 307 p.
7. Мокеев А.В. Совершенствование метрологических характеристик интеллектуальных устройств / В.Н. Бовыкин, А.В. Мокеев // Автоматизация в энергетике. – 2014. – № 3. – С. 4–10.
8. Шапиро Е.З. О метрологическом обеспечении измерений реактивной электрической мощности и энергии // Сб. науч.-техн. конф. “Метрология электрических измерений в электроэнергетике”. – ВНИИЭ, 2001.
9. 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.
10. Мокеев А.В. Совершенствование измерительных интеллектуальных электронных устройств / А.В. Мокеев, В.Н. Бовыкин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2015. – № 11. – С. 29-34.
11. Мокеев А.В. Расширение функциональных возможностей УСВИ [Электронный ресурс] / А.В. Мокеев, В.Н. Бовыкин, А.В. Миклашевич, Д.Н. Ульянов // Сб. межд. научно-техн. конф. “Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем”. – Сочи, 2015.
12. Мокеев А.В. Особенности реализации технологий цифровой подстанции и векторных измерений в распределительных устройствах 6-35 кВ / В.Н. Бовыкин, А.В. Мокеев, Е.И. Хромцов // Релейная защита и автоматизация. – 2015. – № 4. – С. 44-49.

Сведения об авторе

Мокеев Алексей Владимирович, зам. генерального директора, д.т.н.
ООО “Инженерный центр “Энергосервис”,
профессор кафедры “Электроснабжение промышленных предприятий”
Северного (Арктического) федерального университета
Адрес: 163046, Архангельск, ул. Котласская 26
тел.: (8182) 64-60-00, 65-75-65
e-mail: a.mokeev@ens.ru
www.enip2.ru