



**Авторы:**

**д.т.н. Мокеев А.В.,**

Северный (Арктический)  
Федеральный университет,

**Бовькин В.Н.,**

**Хромцов Е.И.,**

ООО «Инженерный центр

«Энергосервис»,

г. Архангельск, Россия.

**Pf.D. Mokeev A.V.,**

Northern (Arctic) Federal  
University,

**Bovykin V.N.,**

**Khromtsov E.I.,**

ООО Engineering Center

«Energoservice»,

Arkhangelsk, Russia.

# ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ И ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ 6-35 КВ

## ASPECTS OF DIGITAL SUBSTATION AND PHASOR MEASUREMENTS REALIZATION IN MEDIUM VOLTAGE SWITCHGEAR

Аннотация: вопросы реализации технологий цифровой подстанции и векторных измерений в распределительных устройствах 6-35 кВ вызывают в последнее время повышенный интерес, как у разработчиков интеллектуальных электронных устройств различного функционального назначения, так и у специалистов энергосистем. Рассматриваются преимущества применения быстродействующей низкоуровневой шины процесса, позволяющей объединить в рамках промышленной сети с топологией общая шина различные источники аналоговой и дискретной информации.

Ключевые слова: цифровая подстанция, цифровая ячейка, датчики тока и напряжения, шина процесса, интеллектуальные электронные устройства, устройства синхронизированных векторных измерений.

**Annotation:** this article discusses realization of digital substation and phasor measurements in medium voltage switchgear. It illuminates advantages of fast low-level process bus, unified for analog and digital signal sources, and realizing switch-free bus network topology.

**Keywords:** digital substation, intelligent electronic devices, process bus, phasor measurement unit, switchgear, current sensor, voltage sensor.

### Введение

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. В совокупности с большой долей ручного труда и со сложностью тестирования ячейки во время ее сборки это приводит к снижению надежности и увеличению затрат при производстве, проведении пуско-наладочных работ и эксплуатации высоковольтных ячеек.

Исключение дублирования ввода аналоговых и дискретных сигналов может быть достигнуто с помощью шины процесса в соответствии с МЭК 61850. Несмотря на положительный опыт внедрения шины процесса для открытых распределительных устройств 110 кВ и выше, для создания КРУ нового поколения, называемого цифровой ячейкой, слепое копирование решений для ОРУ нецелесообразно, прежде всего, по экономическим причинам.

Основная особенность ЗРУ 6-35 кВ связана с тем, что основные компоненты цифровой подстанции находятся внутри высоковольтных ячеек,

что позволяет упростить решения по резервированию промышленных сетей, по обеспечению ЭМС, по вводу-выводу аналоговой и дискретной информации.

В высоковольтной ячейке имеется большое количество источников аналоговой и дискретной информации. Если следовать современным трендам в области автоматизации, связанным с полным исключением аналоговых и дискретных цепей с целью повышения надежности и увеличения функциональности интеллектуальных устройств за счет использования встраиваемых в исполнительные устройства и датчики микроконтроллеров, то использование для создания шины процесса только сетей Ethernet не будет являться наилучшим решением.

### Тенденции развития КРУ 6-35 кВ

Выделим основные направления совершенствования КРУ 6-35 кВ, связанные как с использованием встраиваемых в силовое оборудование электронных устройств, так и с общими тенденциями развития промышленных систем автоматизации.

Одним из важнейших направлений совершенствования КРУ является замена традицион-



ных электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, разработанных первоначально для электромеханических устройств РЗА и щитовых измерительных приборов, на первичные измерительные преобразователи тока и напряжения, в том числе трансформаторы тока малой мощности со встроенным шунтами и с низкоуровневыми выходными и напряжениями (Low Power Current Transformer, LPCT), датчики тока на основе катушки Роговского, емкостные или резистивные датчики напряжения. Перечисленные измерительные преобразователи по сравнению с обычными измерительными трансформаторами тока и напряжения обладают существенными преимуществами по метрологическим характеристикам и особенно по массогабаритным показателям [1,2]. Выходные напряжения указанных первичных преобразователей подбираются исходя из параметров аналоговых микросхем, что позволяет значительно снизить габаритные размеры и вес как самих датчиков, так и устройств релейной защиты и автоматики.

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.

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.

Блоки управления вакуумными выключателями являются электронными устройствами и содержат один или несколько микропроцессоров. При этом в блоках управления с помощью микропроцессоров производится диагностика работы выключателя и самого блока управления (выявление около 10 неисправностей и отказов). Но взаимодействие микропроцессоров блоков управления с микропроцессорами устройств РЗА производится “по старинке” – посредством контактов промежуточных реле. При этом диагностическая информация полностью отображается только на светодиодах блока управления, а устройство защиты может использовать информацию только с контакта “авария”. Переход на цифровое взаимодействие блоков управления с устройствами РЗА и другими элементами управления в КРУ представляется вполне естественным, так как при этом обеспечивается повышение надежности, увеличение функциональности, удешевление и уменьшение габаритов как блоков управления, так и устройств РЗА. При наличии в КРУ актуатора (привода) выкатного элемента и актуатора заземляющего разъединителя также целесообразно осуществить переход на цифровое взаимодействие посредством встраиваемых контроллеров.

Целесообразность применения в КРУ бесконтактных датчиков положения вместо конечных выключателей обусловлена следующими преимуществами: отсутствие “дребезга” контактов, отсутствие необходимости пробоя оксидной пленки, сокращение количества контрольных проводов, уменьшение потребления оперативного тока, повышение надежности и возможность диагностики подсистемы ввода-вывода дискретной информации [3].

В связи с большим количеством

датчиков и исполнительных устройств с цифровым интерфейсом создание цифровой ячейки только с использованием сети Ethernet не будет являться рациональным решением. Следует отметить, что в системах автоматизации различных областей промышленности, аэрокосмической отрасли и автомобилестроении чаще всего применяется сочетание сразу нескольких промышленных сетей: LIN, AS-Interface, CAN, CAN-FD, FlexRay, Ethernet, EtherCAT и ряд других [4]. Применение сети Ethernet чаще всего сочетается с использованием нескольких низкоуровневых шин процесса с целью снижения стоимости системы автоматизации объекта. Применение той или иной низкоуровневой шины зависит от инерционности контролируемого процесса.

Наиболее привлекательным для реализации низкоуровневой шины процесса в пределах высоковольтной ячейки 6-35 кВ является использование промышленной сети FlexRay (максимальная скорость 10 Мбит/с) [5]. FlexRay является надежной и устойчивой к сбоям детерминированной сетью жесткого реального времени, в которой применены эффективные механизмы синхронизации времени и резервирования сети. Поддерживаемая топология сети: общая шина, звезда, комбинированная. Альтернативным решением является применение промышленной сети CAN-FD (максимальная скорость до 5 Мбит/с).

Следует отметить, что при автоматизации подстанций в последнее время большое внимание уделяется диагностике различных подсистем с целью повышения надежности и снижения эксплуатационных затрат. Сказанное относится и к сетям передачи данных. В промышленных сетях FlexRay и CAN эти задачи эффективно решены. Так, ряд приемопередатчиков указанных сетей обеспечивают формирование признака ошибки при сбоях и авариях (обрыв, короткое замыкание между линиями связи между собой и питанием) и управления перекоммутациями для защиты микросхемы и обеспечение передачи даже при повреждении в одной из двух линий связи [6]. Для обеспечения надежности функционирования промышленной сети приме-



няются специальные кабели и разъемы, а ряд микроконтроллеров с поддержкой FlexRay имеют наивысший уровень надежности согласно жестким требованиям стандарта IEC 61508 SIL-3.

В настоящее время FlexRay активно применяется в промышленной автоматизации, авионике и автомобилестроении. Имеются примеры применения и в энергетике для автоматизации газотурбинных установок. В последние годы интерес к FlexRay проявляют и разработчики цифровых подстанций [7].

Гибкость FlexRay связана с поддержкой различных топологий сети, в том числе поддержке топологии общая шина. Достоинством топологии общая шина является возможность простого подключения к ней не только первичных измерительных преобразователей тока и напряжения, но и других датчиков и исполнительных устройств. 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 [8,9].

**Низкоуровневая шина процесса**

Специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработаны опытные образцы интеллектуальных электронных устройств с поддержкой шины процесса на базе сети FlexRay.

Для комбинированных датчиков тока и напряжения (КДТН) TECV.P1-10 фирмы «Оптимерик» (Ярославль) разработано встроенное аналоговое устройство сопряжения. Электронный модуль размещен в основании датчика TECV.P1-10 в очень ограниченном пространстве 60x80x22 мм. Цифровой комбинированный датчик тока и напряжения TECV.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.

В опытном образце встроенного в КДТН устройства сопряжения

реализован порт FlexRay, обеспечивающий два резервируемых канала передачи данных. Содержимое передаваемых выборочных значений (sampled values) 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. Указанные измерения можно рассматривать как альтернативу sampled values [10,11]. При использовании векторных измерений резко снижаются требования к вычислительным ресурсам микропроцессоров локальных и централизованных ИЭУ различного функционального назначения.

На рис.1 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 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 в сеть FlexRay могут быть интегрированы и другие датчики для контроля аналоговых и дискретных процессов, в том числе дополнительные датчики тока и напряжения.

Используемые в цифровой ячейке ИЭУ различного функционального назначения содержат только цифровые

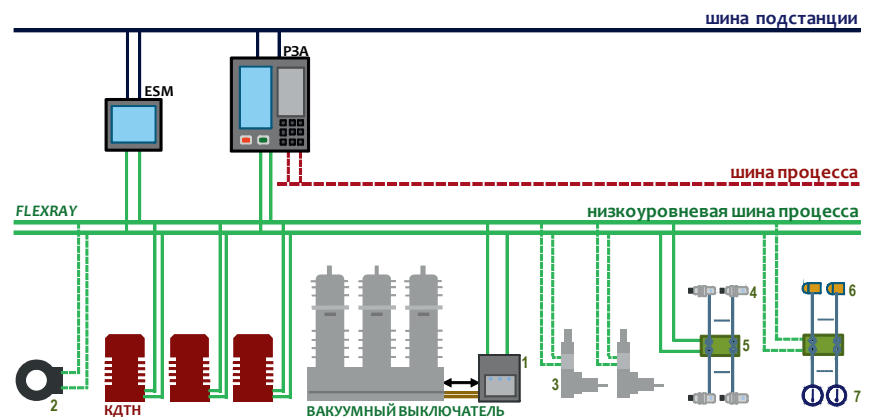


Рис. 1. Цифровая ячейка

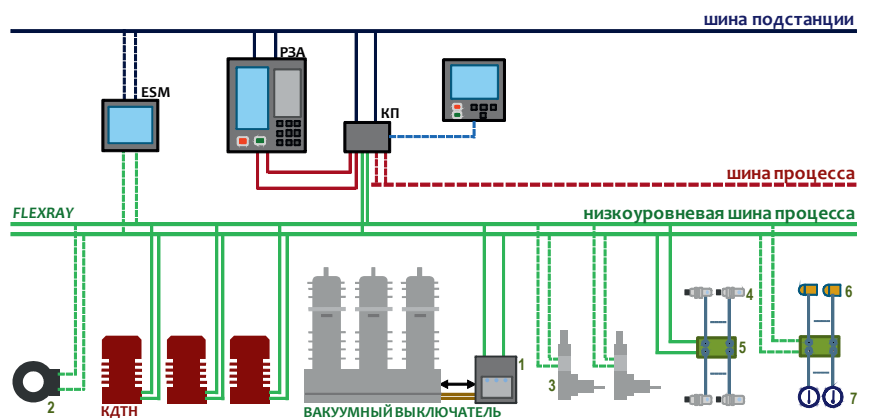


Рис. 2. Второй вариант цифровой ячейки



**Мокеев**

**Алексей Владимирович**

Окончил в 1981 г. Ленинградский политехнический институт (ныне НИУС СПбГУ), инженер-электрик, специализация «Релейная защита и автоматизация энергосистем».

Защитил кандидатскую диссертацию в ЛПИ в 1986 г., докторскую диссертацию в СПбГУ в 2011 г.

Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис», профессор кафедры ЭПП Северного (Арктического) федерального университета.



**Бовыкин**

**Владимир Николаевич**

Окончил в 2000 г. Архангельский государственный технический университет, инженер-электрик, специализация «Электро-снабжение промышленных предприятий», выпускник Президентской программы.

Заместитель директора Департамента энергетических технологий, начальник управления производства и сбыта микропроцессорных устройств.

входы-выходы, что положительно скажется на их стоимости и массогабаритных показателях. Хотя приведенная на рис.1 структура цифровой ячейки не накладывает серьезных ограничений на количество используемых ИЭУ, функции по измерению, релейной защите, автоматике, управлению ячейкой, оперативным блокировкам в зависимости от решаемых задач могут быть решены одним, двумя или тремя ИЭУ: многофункциональным устройством РЗА, многофункциональным измерительным ИЭУ, контроллером присоединения.

Пунктиром на рис.1 выделено подключение устройств, применение которых не является обязательным. Сказанное относится и к шине процесса согласно МЭК 61850, для реализации которой используется шлюз FlexRay/IEC 61850. Шлюз может быть встроен в устройство РЗА или выполнен в виде отдельного устройства.

Таким образом, наряду с низкоуровневой шиной процесса на базе FlexRay, используемой только внутри ячейки, имеется возможность реализации полноценной шины процесса согласно стандартов МЭК 61850. При этом возможны следующие варианты: реализация шины процесса с передачей только выборочных значений токов и напряжений согласно МЭК 61850-9-2LE, реализация объединенной шины процесса с передачей выборочных значений и GOOSE сообщений, реализация совмещенной шины процесса и подстанции при применении кольцевой сети Ethernet и ИЭУ с поддержкой протокола резервирования HSR или RSTP. Последний вариант с целью снижения стоимости реализации цифровых подстанций используется в решениях компании ABB [1]. С целью снижения нагрузки на локальную сеть вместо выборочных значений токов и напряжений могут передаваться синхронизированные векторные измерения [9,10].

В наиболее распространенных необслуживаемых подстанциях с распределительными устройствами 6-35 кВ реализация ССПИ, локальных и централизованных устройств защиты и автоматики может осуществляться на базе сети FlexRay, функционирующей в пределах ЗРУ и заменяющей совмещенную шину процесса и подстанции на базе сети Ethernet.

Для создания цифровой ячейки согласно рис.1 специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработаны встроенные в КДТН устройства сопряжения с шиной процесса на базе FlexRay, специальная модификация многофункционального измерительного устройства ESM с 2 каналами FlexRay [9,10], устройство сопряжения с бесконтактными датчиками положения.

Многофункциональные устройства ESM выполняют функции текущих и интегральных телеизмерений, синхронизированных векторных измерений, учета электрической энергии, измерения показателей качества электрической энергии. Одновременно разрабатываются 4 модификации ESM: с аналоговыми входами от измерительных трансформаторов тока и напряжения, с аналоговыми низкоуровневыми входами от датчиков тока и напряжения, с цифровыми входами согласно МЭК 61850-9-2LE, с поддержкой шины FlexRay.

Для быстрой интеграции в цифровую ячейку устройств сторонних производителей, прежде всего устройств РЗА и блоков управления вакуумных выключателей, специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разрабатываются OEM-платы с поддержкой сети FlexRay. Другой вариант – использование контроллера присоединения (КП), который одновременно выполняет функции шлюза FlexRay/IEC 61850 (рис.3). Измерительное ИЭУ, например, ESM, в данном варианте используется только при организации коммерческого учета электроэнергии.

Для ответственных применений совместное использование УРЗА и КП обеспечивает дополнительные возможности по резервированию. Например, могут быть реализованы две кольцевые сети Ethernet, если указанные устройства содержат встроенный сетевой коммутатор и в них реализована поддержка протоколов резервирования RSTP или HSR.

Для простых применений в ячейке может быть установлен только контроллер присоединения при реализации в КП минимального функционала релейной защиты и автоматики присоединения. Такой контроллер присоединения может быть встроен в блок управления вакуумным выключателем аналогично тому, как электронные расцепители устанавливаются в автоматические выключатели. Для иных применений, например, при использовании локальных или централизованных устройств РЗА, такой КП будет являться последним «рубежом» защиты присоединения.

Возможны упрощение представленных вариантов цифровой ячейки, например, использование сети FlexRay без резервирования или использованием отдельных сегментов сети для устройств РЗА и измерительных устройств.

**Комбинированные варианты низкоуровневой шины процесса**

Данные варианты предполагают различные решения по подсистемам аналогового и дискретного ввода-вывода.



**Хромцов**

**Евгений Иосифович**

Окончил в 2014 г. Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, инженер-электрик, специализация "Электро-снабжение".

Программист отдела разработки микропроцессорных устройств ООО "Инженерный центр "Энергосервис".

Один из возможных вариантов представлен на рис.3. Здесь сеть FlexRay или более простые альтернативные сети CAN или CAN-FD используется преимущественно для подсистемы дискретного ввода-вывода, а передача оцифрованных значений токов и напряжений от КДТН производится с использованием Ethernet согласно МЭК 61850-9-2.

Специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» в 2014 году разработано компактное устройство сопряжения ENMU с 4 портами Ethernet (МЭК 61850-9-2) для комбинированных датчиков тока и напряжения CVS-I (Голландия) [9]. Устройство сопряжения ENMU имеет очень малые габариты и может быть встроено в один из трех КДТН (рис.3). Для упрощения интеграции представленного варианта цифровой ячейки с устройствами РЗА с поддержкой МЭК 61850 специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработано дискретное устройство сопряжения с шиной процесса ENMU-D [9].

Еще более простое решение для цифровой ячейки связано с реализацией в устройстве РЗА ИЭУ функций аналогового устройства сопряжения с шиной процесса (рис.4). Подобное решение предусмотрено в высоковольтных ячейках UniGear Digital фирмы ABB [1]. Отличия представленного варианта цифровой ячейки от UniGear Digital связаны с подсистемой дискретного ввода-вывода и цифровым взаимодействием с блоком управления вакуумным выключателем. Другое преимущество связано с организацией коммерческого учета электроэнергии.

В UniGear Digital используются датчики тока на основе катушки Роговского, и в силу особенностей данного датчика имеются определенные сложности в реализации учета электроэнергии

и измерении показателей качества электроэнергии. При необходимости организации коммерческого учета электроэнергии и/или измерения ПКЭ в ячейке UniGear Digital дополнительно предусматривается установка традиционных электромагнитных трансформаторов тока и напряжения.

В предлагаемом варианте данные проблемы решены – комбинированный датчик тока и напряжения TECV.P1-10 содержит сразу 2 токовых датчика: LPCT и датчик на базе катушки Роговского. К выходам токовых датчиков LPCT подключается специальная модификация многофункционального измерительного устройства ESM с аналоговыми низкоуровневыми входами, а к низкоуровневым выходам катушки Роговского подключается устройство РЗА.

Разработанные специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» встроенные или внешние аналоговые устройства сопряжения с шиной процесса, различные модификации измерительных ИЭУ, дискретных устройств сопряжения с шиной процесса и контроллеров присоединения, могут найти применение при создании различных вариантов цифровых ячеек, в том числе представленных на рис.1– рис.4.

**Выводы**

Применение датчиков тока и напряжения с цифровыми выходами и переход на цифровое взаимодействие с вакуумными выключателями ИЭУ различного функционального назначения позволяют говорить о КПУ нового поколения - цифровых ячейках.

Распределительные устройства 6-35 кВ на базе цифровых ячеек позволят обеспечить более высокий уровень надежности, тестирования

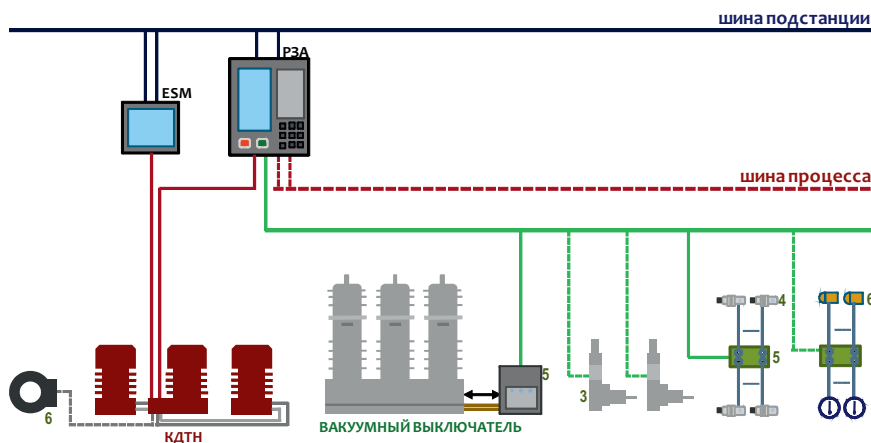


Рис. 3. Комбинированный вариант цифровой ячейки

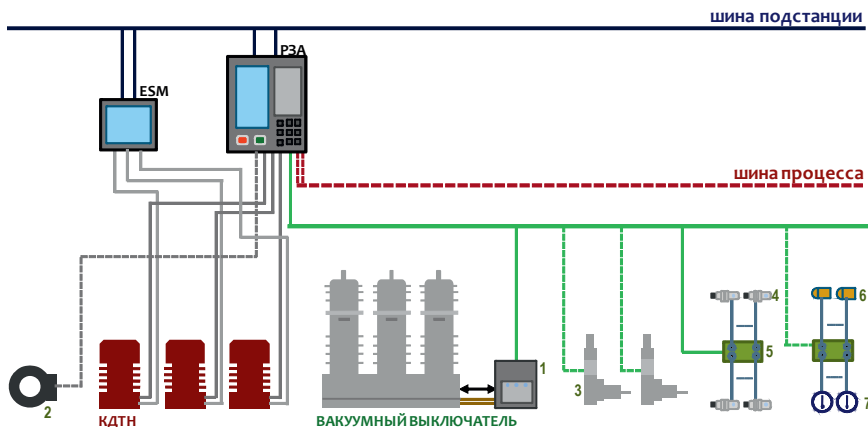


Рис. 4. Упрощенный вариант цифровой ячейки

ячеек сразу после их сборки, мониторинг и диагностику как отдельных компонентов ячеек, так ячейки и распределительного устройства в целом.

Литература

1. M. Stefanka, V. Prokop, G. Salge. Application of IEC 61850-9-2 in MV switchgear with sensors use // 22nd International Conference on Electricity Distribution CIRED2013. – Stockholm. – 2013.

2. Minkner R., Schweitzer E.O. Low Power Voltage and Current Transducers for Protecting and Measuring Medium and High Voltage Systems // 26th Western Protective Relay Conference. – Washington. – 1999.
3. Мокеев А.В., Подболотов И.В., Рафиков А.Б., Ульянов Д.Н. Цифровая ячейка // ИСУП. – 2014. – № 1. – С. 25-29.
4. Федюкин В., Бондарев Л., Клепиков В. Распределенная архитектура перспективных встроенных систем управления // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 6. – С. 60-65.
5. Shaw R., Jackman B. An introduction to FlexRay as an industrial network // IEEE International Symposium

on Industrial Electronics (ISIE 2008). – Cambridge. – 2008. – P. 1814-1854.

6. Современные приемопередатчики сети CAN компании ON Semiconductor // Компоненты и технологии. – 2009. – № 9. – С.44-48.
7. Li Q., Liu R., Liang Y., Niu Z.-G., Xiao K., Wang J.-L. Application of FlexRay in protective relay unit of electric power system // Power System Protection and Control. – V.38.– 2010.
8. Мокеев А.В., Бовыкин В.Н., Миклашевич А.В., Орлов Ф.Ю., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И. Интеллектуальные электронные устройства для цифровых подстанций 110(35)/6 кВ // Сб. межд. научно-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Сочи. – 2015.
9. Мокеев А.В., Бовыкин В.Н. Интеллектуальные устройства для цифровых подстанций // Новое в российской энергетике. – 2015. – № 4. – С. 40-48.
10. Мокеев А.В., Бовыкин В.Н., Миклашевич А.В., Ульянов Д.Н. Устройства синхронизированных векторных измерений с поддержкой стандартов IEEE C37.118 и IEC 61850 // Сб. межд. научно-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Екатеринбург. – 2013.
11. Мокеев А.В., Бовыкин В.Н., Миклашевич А.В., Ульянов Д.Н. Расширение функциональных возможностей УСВИ // Сб. межд. научно-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Сочи. – 2015.

Участник выставки “Электрические сети России - 2015”  
1-4 декабря, стенд А95

# ЭНИП-2

Многофункциональные  
измерительные преобразователи



Соответствие стандарту МЭК 61850

сертифицировано DNV GL (Лаборатория KEMA)  
при участии НТЦ ФСК ЕЭС

- Высокая точность измерений параметров режима электрической сети
- Телесигнализация и телеуправление
- Технический учет электроэнергии и мониторинг качества электроэнергии

Внесены в Государственный реестр СИ, сертифицированы на соответствие ТР ТС и СЕ