МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

АВТОРЫ:

А.В. МОКЕЕВ,
Д.Т.Н.,
ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР «ЭНЕРГОСЕРВИС»,
СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Д.Н. УЛЬЯНОВ,
ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР «ЭНЕРГОСЕРВИС»

В.Н. БОВЫКИН,
ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР «ЭНЕРГОСЕРВИС»

Е.И. ХРОМЦОВ,
ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР «ЭНЕРГОСЕРВИС»,
СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Цифровая подстанции в соответствии со стандартом МЭК 61850 — это подстанция, на которой доступ к информации, ее передача и обработка производятся в цифровом виде.

Ключевые слова: интеллектуальные электронные устройства; цифровая подстанция; синхронизированные векторные измерения; преобразователи аналоговых сигналов.

Устройства ESM с модулем индикации

* Публикуется в порядке обсуждения

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к использованию многофункциональных устройств связан прежде всего со стремлением снизить затраты на создание и эксплуатацию цифровых подстанций и цифровых сетей. При этом в большинстве практических случаев достаточно использовать два многофункциональных интеллектуальных электронных устройства (ИЭУ) для одного присоединения: устройство релейной защиты и автоматики (РЗА) и измерительное устройство.

Наряду с ИЭУ на цифровой подстанции применяется ряд других микропроцессорных устройств, прежде всего, преобразователи аналоговых сигналов (ПАС) и интеллектуальная коммутационная аппаратура, в том числе интеллектуальные выключатели со встроенными ПАС и преобразователями дискретных сигналов (ПДС).

В настоящее время имеют место два полярных подхода к реализации ПАС. Первый из них связан с максимальным упрощением ПАС, реализацией в нем только функции преобразования аналогового сигнала в цифровой код и максимальным упрощением коммуникаций [1].

Второй подход связан с расширением функциональных возможностей ПАС и поддержкой совмещенной коммуникационной шины процесса и шины подстанции. Одной из наиболее важных функций, которая может быть возложена на ПАС, является функция резервной защиты. Это позволит реализовать двух- или трехуровневую систему РЗА подстанции с целью повышения ее эффективности и надежности.

ТРЕХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ПОДСТАНЦИИ

Структурная схема трехуровневой системы РЗА представлена на рис. 1 и состоит из следующих компонентов:

- ПАС, или интеллектуальный выключатель (ИВ) со встроенными ПАС и ПДС, — резервная РЗА;
- локальное устройство РЗА;
- централизованное устройство РЗА.

ТРЕХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА РЗА ПОДСТАНЦИИ

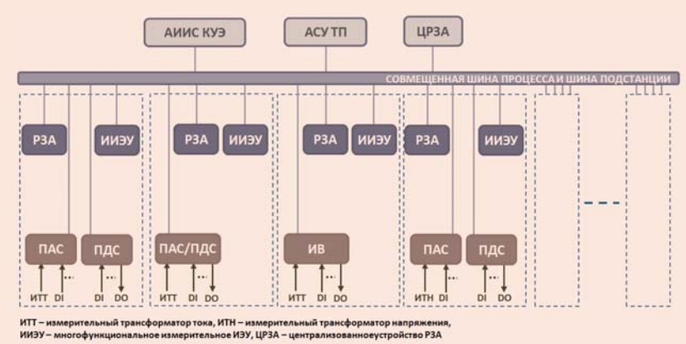

Рис. 1

Для упрощения схемы трехуровневой системы РЗА на подстанции показан только один ПАС для присоединения. В распределительных устройствах высокого напряжения должны использоваться несколько ПАС для каждого присоединения: для основной защиты, резервной защиты и измерений.

Благодаря наличию совмещенной шины подстанции и шины процесса доступ к данным ПАС и ПДС доступен не только ИЭУ, но и компонентам верхнего уровня (АСУ ТП, централизованного устройства РЗА и т. д.). За счет этого становится возможным резервирование компонентами верхнего уровня функций ИЭУ (устройств РЗА и измерительных ИЭУ) в случае отказа последних. Встроенные в ПАС или в ИВ резервные защиты обеспечат отключение повреждений даже в случае отказа компонентов системы РЗА второго и третьего уровней.

На примере РЗА рассмотрим два возможных варианта двухуровневых систем защиты: ПАС (или ИВ) и локальное устройство РЗА, ПАС и централизованная РЗА. В первом варианте имеем аппаратное разделение основной и резервной защит даже для распределительных устройств среднего напряжения. Во втором варианте ЦРЗА должна выполнять функции локальных устройств РЗА.

За счет информационного обмена между устройствами РЗА, прежде всего обмена GOOSE-сообщениями и синхровекторами тока и напряжения, появляется возможность повысить основные показатели качества функционирования устройств РЗА (быстродействие, чувствительность) и упростить реализацию защит с абсолютной селективностью шин, трансформаторов, линий и т. д., а также реализацию централизованного устройства РЗА. Это обеспечит отключение поврежденного присо-

единения без выдержки времени. При серьезных сбоях в коммуникационной сети, приводящих к полномасштабным нарушениям в информационном обмене между защитами и невозможности функционирования централизованного устройства РЗА, должен осуществляться переход локальных устройств РЗА в автономный режим.

Использование синхровекторов вместо SV-потоков позволит уменьшить нагрузку на сеть коммуникаций на подстанции и существенно снизить требования к вычислительной мощности микропроцессоров как локальных, так и централизованных устройств РЗА. В результате станет возможным широкое применение быстродействующих защит с абсолютной селективностью для присоединений распределительных устройств среднего напряжения.

Дополнительное увеличение показателей качества функционирования локальных и централизованных устройств РЗА может быть достигнуто за счет применения цифровых первичных преобразователей (датчиков) тока и напряжения. Преимущества их применения связаны со снижением тока небаланса, отсутствием остаточной намагниченности и насыщения магнитопровода при больших кратностях тока.

Другие эффективные способы повышения технического совершенства устройств РЗА связаны с использованием вместо обычных логических операций темпоральной логики [2] и дополнительных признаков распознавания повреждения. Например, для быстродействующей защиты шин такими признаками может быть сравнение направлений мощностей на элементах, присоединенных к защищаемой шине [3]. Причем в контексте применения синхровекторов вместо направления мощности достаточно использовать углы синхровекторов тока присоединений.

Можно выделить следующие признаки аварии на шинах понижающей подстанции или распределительном пункте на основе информации о синхровекторах тока и напряжения:

- резкое увеличение тока питающего трансформатора (линии), при этом углы синхровекторов токов соответствуют направлению мощности к шинам;
- резкое снижение уровня токов остальных присоединений (при отсутствии подпитки) или резкое изменении углов токов, соответствующих направлению мощности к шинам (при наличии подпитки);
- резкое снижение напряжения на шинах.

Рассмотренные выше защиты шин с абсолютной селективностью будут востребованы в распределительных устройствах для собственных нужд электростанций, подстанций и распределительных пунктах крупных промышленных предприятий, центрах питания крупных городов.

При использовании технологии СВИ и централизованного устройства РЗА появляется возможность оценки параметров эквивалентной энергосистемы и параметров нагрузки. Это дополнительно позволит улучшить основные показатели качества функционирования как локальных, так и централизованного устройств РЗА.

Централизованное устройство РЗА наряду с выполнением функции защиты шин и ряда устройств режимной и противоаварийной автоматики выполняет также функции координации и резервирования работы других устройств защиты подстанции. Например, в случае отказа защиты одного присоединения централизованная РЗА выполняет функции данной защиты, при этом источником информации являются ПАС и ПДС конкретного присоединения (трехуровневая система защиты), или информация вычисляется на основе синхровекторов других присоединений по аналогии с предложенным решением для SV-потоков [4].

При использовании синхронизированных векторных измерений для нужд релейной защиты и автоматики к источникам СВИ по сравнению с системами мониторинга переходных режимов необходимо выполнить следующие требования:

- сокращение времени измерения синхровекторов тока и напряжения при одновременном снижении требований по точности обработки сигналов;
- обеспечение правильной работы устройств РЗА в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов;
- существенное повышение темпа передачи синхровекторов.

Для реализации первых двух требований необходима разработка специальных алгоритмов обработки сигналов для измерения синхровекторов тока и напряжения, так как алгоритмы УСВИ не обеспечивают требуемого быстродействия. Основные показатели качества обработки сигналов в большинстве устройств с поддержкой СВИ определяются цифровыми фильтрами. Сокращение времени измерения синхровекторов может быть достигнуто за счет применения специальных фильтров [5, 6].

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПАС

Одна из важнейших предпосылок расширения функциональных возможностей ПАС связана с тем, что применяемые в них микроконтроллеры или сигнальные процессоры со встроенным Ethernet обладают достаточными вычислительными мощностями для реализации дополнительных функций, в том числе диагностики первичных измерительных преобразователей тока и напряжения, измерения синхровекторов тока и напряжения, измерения параметров режима электрической сети, регистратора аварийных событий, резервной защиты и т.д. Таким образом, ПАС выполняет функции сразу нескольких интеллектуальных устройств и должен подключаться не только к шине процесса, но и к шине подстанции или к совмещенной шине. Синхронизированные векторные измерения при этом могут использоваться как дополнение или альтернатива SV-потокам [7].

ПАС могут быть встроены в современные первичные измерительные преобразователи (датчики) тока и напряжения или могут быть внешними устройствами (Stand-Alone Merging Unit, SAMU) и подключаться к традиционным электромагнитным трансформаторам тока и напряжения.

До последнего времени были в основном востребованы ПАС с поддержкой спецификации IEC 61850-9-2LE, предусматривающей передачу SV-потоков с четырьмя оцифрованными значениями токов и четырьмя уровнями напряжения с частотой 80 и 256 выборок за период. В настоящее время требуется использовать раздельные ПАС по току и напряжению [8], так как измерительные трансформаторы тока и напряжения расположены на значительном удалении друг от друга. Кроме того, необходимо учитывать, что измерительные трансформаторы тока и напряжения имеют несколько обмоток для основной и резервной защиты, учета и измерений.

Рассмотрим историю развития преобразователей аналоговых сигналов ENMU [7]. Преобразователи сигналов ENMU первого поколения, разработанные в 2011 г., имели модульную конструкцию и предоставляли возможность реализации как совмещенного ПАС, так и раздельных ПАС, подключаемых к нескольким обмоткам измерительного трансформатора тока или напряжения (рис. 2).

Второе поколение ENMU было ориентировано на запросы рынка, связанные с поддержкой спецификации IEC 61850-9-2LE (рис. 3), и имеет следующие отличительные особенности:

ПЕРВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ ENMU

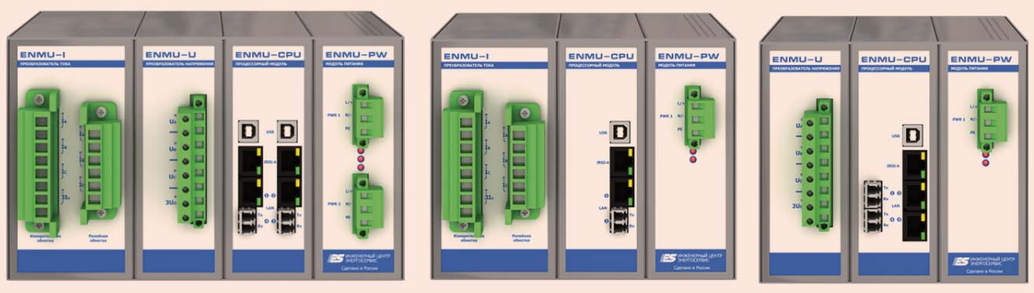

Рис. 2

ENMU ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Рис. 3

- комбинированный преобразователь сигналов (ПАС тока, ПАС напряжения, ПДС);
- подключение к измерительной и релейной обмоткам измерительного трансформатора тока;
- первый ПАС в Госреестре средств измерений № 73811-19;
- встроенный регистратор аварийных процессов;
- выполнение функций многофункционального измерительного преобразователя;
- встроенный УСВИ со встроенным концентратором векторных данных, при этом синхровекторы тока формируются как от измерительной, так и от релейной обмотки;
- одновременная передача до четырех потоков данных, в том числе SV-потоков (IEC 61850-9-2LE), синхровекторов (IEEE C37.118.2), телемеханической информации (IEC 60870-5-104 или IEC 61850-8-1).

ENMU содержит две пары оптических портов Ethernet 100Base-FX для подключения к шине процесса и к шине подстанции. Реализована поддержка протоколов синхронизации времени PTP и резервирование PRP. Расширение количества дискретных и аналоговых входов обеспечивается с помощью внешних модулей ЭНМВ-1.

Преобразователи сигналов ENMU второго поколения успешно функционируют в рамках первых пилотных проектов по цифровым подстанциям ПАО «Россети» и других собственников. ENMU прошла успешные испытания в лаборатории одной из ведущих зарубежных компаний. С использованием ENMU разработан опытный образец интеллектуального выключателя на базе выключателя ВБ-35.

Разрабатываемое в настоящее время третье поколение ENMU включает модификации ПАС тока, ПАС напряжения, ПДС, а также совмещенные ПАС и ПДС. Принципиальное отличие нового ENMU состоит в том, что он ориентирован на использование совмещенной шины процесса и шины подстанции при использовании двух портов Ethernet 1000Base-FX с поддержкой протоколов резервирования PRP и HSR, а также протокола синхронизации времени PTP.

Использование внешних ПАС (SAMU) — в определенной степени вынужденная мера, связанная с наличием в электрических сетях большого количества установленных электромагнитных измерительных трансформаторов тока и напряжения. При строительстве новых подстанций или при глубокой модернизации существующих подстанций начинают применять современные цифровые датчики тока и напряжения.

ЦИФРОВЫЕ ДАТЧИКИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Электромагнитные измерительные трансформаторы тока и напряжения разрабатывались для применения совместно с электромеханическими реле и измерительными приборами и использовались не только в качестве первичных измерительных преобразователей, но и для обеспечения их работы. При этом массогабаритные показатели и сечение вторичных обмоток измерительных трансформаторов определялись потребляемой мощностью электромеханических реле и приборов.

Для ИЭУ с аналоговыми входами требуются первичные преобразователи (датчики) тока и напряжения только в качестве источников информации. При подключении ИЭУ к традиционным измерительным трансформаторам необходимо использовать гальваническую развязку и масштабирование до уровней низкоуровневых сигналов (чаще всего менее 12 В). Поэтому самый простой способ совершенствования измерительных трансформаторов связан со снижением уровня вторичных токов и напряжений для упрощения сопряжения с ИЭУ. Другой подход связан с использованием датчиков на основе иных физических принципов.

Для напряжения 110 кВ и выше в настоящее время чаще всего применяются оптические первичные измерительные преобразователи тока (например, датчики фирм ABB, General Electric, Artech и Профотек) или датчики тока на основе катушки Роговского с цифровым интерфейсом и поддержкой МЭК 61859-9-2.

Для среднего класса напряжения чаще всего применяют датчики тока на основе маломощных электромагнитных трансформаторов тока со встроенным шунтом (Low Power Current Transformer, LPCT) или на основе катушки Роговского и резистивные, емкостные и резистивно-емкостные датчики напряжения. Такие маломощные датчики используются уже более 20 лет для классов напряжения 6–35 кВ (ABB, Schneider Electric, Trench, Ritz Instruments, Altea B.V) совместно с устройствами РЗА ведущих зарубежных производителей. Указанные датчики по сравнению с обычными измерительными трансформаторами тока и напряжения имеют лучшие метрологические характеристики и значительно меньше по массогабаритным показателям. В России подобные датчики широко применяются в составе реклоузеров и в КРУ «Эталон» компании «Таврида Электрик». Разработки датчиков тока и напряжения в настоящее время ведутся рядом отечественных компаний, в том числе фирмами ООО «Оптиметрик», ООО НПО «ЦИТ», ООО «НПП Марс-энерго» и др.

ЦИФРОВОЙ ДАТЧИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ TECV.P1-10 СО ВСТРОЕННЫМ ПАС

Рис. 4

Следует различать активные (электронные) и пассивные датчики тока и напряжения. Электронные в свою очередь могут быть подразделены на аналоговые и цифровые датчики тока и напряжения. В настоящее время интерес представляют пассивные и цифровые датчики тока и напряжения.

В качестве примера применения пассивных датчиков тока и напряжения следует привести решения компании ABB для среднего напряжения [9]. Пассивные датчики тока на основе катушки Роговского и резистивные делители напряжения используются в КРУ нового поколения UniGear Digital совместно с интеллектуальными устройствами РЗА. При этом ряд устройств защиты выполняют функции ПАС напряжения. При организации сети коммуникаций для среднего уровня напряжения используется совмещенная шина процесса и шина подстанции. Следует отметить, что по общей коммуникационной шине 100 Мбит/с передается ограниченное число SV-потоков оцифрованных значений напряжения. Для упрощения и уменьшения стоимости промышленной сети устройства РЗА содержат два порта Ethernet и встроенный коммутатор для поддержки кольцевой топологии и обеспечивают поддержку протоколов резервирования RSTP и HSR.

Рассмотрим пример разработки первого российского цифрового комбинированного датчика тока и напряжения (КДТН) среднего напряжения TECV.P1-10, разработанного фирмой «Оптиметрик» [9]. КДТН содержит маломощный электромагнитный трансформатор тока со встроенным шунтом, катушку Роговского и емкостной датчик напряжения (рис. 4). Встроенный ПАС, разработанный специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис», размещается в ограниченном объеме в основании КДТН. TECV.P1-10 успешно прошли этап сертификации, и ведется их подготовка к серийному производству [10].

Преимущества использования КДТН со встроенным ПАС по сравнению с пассивными датчиками связаны с лучшими метрологическими характеристиками, повышенной помехоустойчивостью, возможностью мониторинга состояния КДТН и цифровых коммуникаций. Встроенный ПАС обеспечивает хранение данных о характеристиках датчиков тока и напряжения и калибровочных коэффициентах [10].

В цифровом комбинированном датчике тока и напряжения TECV.P1-10 предусмотрено два типа интерфейсов: Ethernet (до двух портов) и FlexRay (два канала). Использование портов Ethernet позволяет реализовать формирование потока выборочных значений тока и напряжения строго в соответствии с IEC 61850-9-2LE. Альтернативный интерфейс предназначен для интеграции КДТН в низкоуровневую шину процесса.

Цифровой КДТН является не только источником информации для ИЭУ различного функционального назначения, но и способен выполнять функции ряда ИЭУ за счет измерения синхровекторов тока и напряжения, использование которых позволит существенно снизить требования к микроконтроллерам или сигнальным процессорам устройств РЗА 6–35 кВ.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИЭУ

ИЭУ с поддержкой шины процесса потенциально имеют гораздо больше возможностей по замещению функций других устройств. Это позволяет в большинстве случаев ограничиться применением многофункционального устройство РЗА и многофункционального измерительного устройства.

Основная функция многофункционального устройства РЗА связана с реализацией функций по защите и автоматике присоединения. До-

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ESM

Рис. 5

полнительные функции связаны с выполнением функций определения места повреждения, контроллера присоединения. В ряде случаев многофункциональные устройства РЗА российских и зарубежных производителей выполняют функции измерительных преобразователей телемеханики. В качестве примера можно привести последние разработки устройств РЗА для цифровой подстанции компаний ЭКРА и «Релематика». Ряд зарубежных компаний, например, SEL, General Electric, Siemens, дополнительно реализуют в устройствах РЗА функции устройств синхронизированных векторных измерений. При этом следует отметить, что реализация функций измерения синхровекторов тока и напряжения прежде всего нацелена на совершенствование самих устройств РЗА и создание распределенных систем защиты, автоматики и управления WAMPAC.

Многофункциональные измерительные ИЭУ в общем случае выполняют функции МИП телемеханики, счетчика электрической энергии, многофункционального щитового прибора, прибора для измерений показателей качества электроэнергии (BINOM3, ЩМК120, ESM).

В качестве примера многофункционального ИЭУ рассмотрим устройство ESM, которое выполняет функции телеизмерений, счетчика коммерческого учета электроэнергии, прибора измерения показателей качества электроэнергии и устройства синхронизированных векторных измерений.

Отличительной особенностью ESM является наличие четырех модификаций в зависимости от источников информации о контролируемых токах и напряжениях: электромагнитные измерительные трансформаторы тока и напряжения, датчики тока и напряжения с аналоговыми низкоуровневыми сигналами, шина процесса и низкоуровневая шина процесса. На рис. 5 представлены три основные модификации устройства ESM.

Индикация показаний ESM осуществляется с помощью модулей индикации с цветным сенсорным дисплеем ЭНМИ-5 (см. рис. на с. 8) или ЭНМИ-7 с OLED-дисплеем. Возможна как раздельная установка ESM и ЭНМИ-5, так и их совмещение в единый конструктив с установкой на место щитового прибора.

Для интеграции в автоматизированные системы технологического управления устройства ESM содержат встроенный сетевой коммутатор и до четырех портов Ethernet для подключения к шине подстанции (МЭК 61850-8-1). ESM может быть дополнен функциями сбора дискретных сигналов и выдачи команд управления через внешние модули ЭНМВ.

Многофункциональные устройства ESM внедрены в рамках первых пилотных проектов по цифровым подстанциям в ПАО «Россети» и на ряде объектов других собственников.

ЦИФРОВОЕ КРУ 6–20 КВ

Ниже рассматривается опыт разработки и внедрения цифровых КРУ 6–20 кВ нового поколения с использованием цифровых датчиков тока и напряжения, интеллектуальных выключателей со встроенной резервной защитой, многофункциональных ИЭУ, цифровых датчиков положения, температуры и т. д. Все перечисленные компоненты внутри КРУ соединяются между собой посредством резервируемой низкоуровневой шины процесса [10]. Структурная схема системы защиты,

автоматики и управления представлена на рис. 6.

Особенностями системы защиты, автоматики и управления распределительного устройства среднего напряжения являются:

- коммуникационная шина, охватывающая ИЭУ всех присоединений, только условно может быть отнесена к совмещенной шине, так как вместо SV-потоков передаются синхровекторы токов и напряжений (передача SV-потоков опционально);
- широкое использование ИЭУ с двумя портами Ethernet и встроенным коммутатором и использование топологии «кольцо» или гибридной топологии с целью снижения стоимости решения.

Низкоуровневая шина процесса внутри высоковольтной ячейки 6–20 кВ может быть реализована при использовании промышленной сети FlexRay (максимальная скорость 10 Мбит/с) или CAN-FD (максимальная скорость до 15 Мбит/с). Данные сети поддерживают топологию общей шины и являются надежными и устойчивыми к сбоям детерминированными сетями жесткого реального времени, в которых применены эффективные механизмы синхронизации времени и резервирования сети. Достоинством топологии общей шины является возможность простого подключения к ней не только различных цифровых датчиков тока и напряжения, но и других датчиков и устройств. Таким образом, получается общая шина 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 [10]. Низкоуровневую шину процесса используют также для цифрового взаимодействия между ИЭУ и интеллектуальными вакуумными выключателями. Встроенное в интеллектуальный выключатель устройство защиты имеет доступ ко всей необходимой информации благодаря подключению к низкоуровневой шине процесса внутри ячейки и может также подключаться к шине подстанции.

Так же как и в более общем варианте архитектуры цифровой подстанции (см. рис. 1), возможна реализация и трехуровневой системы

ТРЕХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА РЗА РУ СН

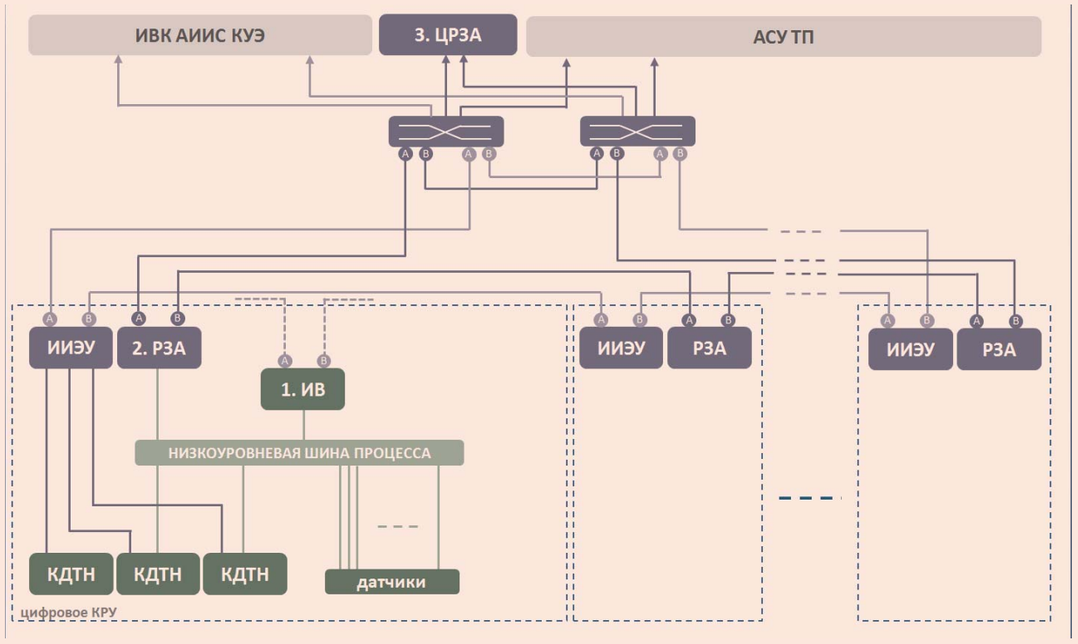

Рис. 6

защиты и автоматики (интеллектуальный выключатель, локальное устройство РЗА, централизованная система РЗА), и двухуровневой системы защиты (возможные варианты: интеллектуальный выключатель и централизованная система РЗА, интеллектуальный выключатель и локальное устройство РЗА).

В качестве многофункционального устройства РЗА применяется специально разработанное устройство ENBC. Обмен данными с ЦРЗА, АСУ ТП подстанции, другими ENBC и прочими ИЭУ на подстанции по сети Ethernet производится с помощью протоколов МЭК 61850-8-1 (MMS- и GOOSE-сообщения) и IEEE C37.118.2.

Отличительной особенностью ENBC является возможность организации ввода-вывода не только посредством сухих контактов и промежуточных реле, но и с помощью бесконтактных датчиков положения, температурных датчиков, оптических датчиков для реализации дуговой защиты и других датчиков с цифровым интерфейсом, а также организации цифрового взаимодействия с вакуумным выключателем. В ENBC реализованы функции РЗА и контроллера присоединения.

В качестве многофункционального измерительного ИЭУ используется ESM. На структурной схеме рис. 6 был показан один из двух возможных вариантов подключения устройств ESM: подключение к трем цифровым КДТН с помощью Ethernet по схеме «точка — точка». Для этой цели в ESM предусмотрены три порта Ethernet. Передача данных производится согласно протоколу IEC 61850-9-2LE.

На данный момент разработка перечисленных выше компонентов цифрового КРУ находится на следующем уровне:

- цифровой комбинированный датчик тока и напряжения TECV. P1-10 внесен в реестр средств измерений, ведется подготовка к серийному производству;
- многофункциональное измерительное устройство ESM запущено в серийное производство;
- ведется подготовка к серийному производству многофункционального устройства РЗА;
- централизованное устройство РЗА находится в стадии разработки;
- разработан опытный образец интеллектуального выключателя на базе выключателя VF12.

В настоящее время рядом ведущих производителей разработаны опытные образцы цифровых КРУ. Имеется положительный опыт эксплуатации цифрового КРУ, реализованного с помощью модернизации существующей высоковольтной ячейки 6 кВ на подстанции 110 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование измерений синхровекторов тока и напряжения в ИЭУ различного функционального назначения и ПАС позволит существенно повысить качество систем релейной защиты, автоматики и управления.

Сочетание локальных устройств РЗА и централизованной системы РЗА позволит повысить надежность электроснабжения потребителей за счет снятия коммуникационных ограничений, связанных с широким использованием скоростных коммуникаций на цифровых подстанциях. При этом живучесть системы РЗА сохраняется даже при полном нарушении информационного обмена между защитами и невозможности функционирования централизованной системы за счет перехода локальных устройств РЗА в автономный режим работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Levshin V. Recommendations for using of synchronous communications protocols for analog and digital data transfer as an alternative to IEC 61850-9-2 LE (SV) and IEC 61850-8-1 (GOOSE) protocols in digital substations. Collection of the reports of the SC D2 CIGRE, Moscow, 2017.
2. Emerson E.A. Temporal and modal logic. In J. van Leeuwen, editor. Handbook of Theoretical Computer Science. Elsevier Science Publishers B.V., 1990. Pp. 996–1072.
3. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
4. Булычев А.В., Васильев Д.С., Козлов В.Н., Силанов Д.Н. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация, 2019. № 1. С. 70–76.
5. Mokeev A.V. Filter synthesis for PMU. Proceedings of the IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. SIBCON-2017, Astana, 2017.
6. Bovykin V., Khromtsov E., Miklashevich A., Mokeev A., Popov A., Rodionov A., Ulyanov D. Application of synchrophasor measurement technology for control, protection and automation. Proceedings of the CIGRE B5 Colloquium in Tromsø, 2019.
7. Бовыкин В.Н., Миклашевич А.В., Мокеев 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.
8. СТО 56947007-29.240.10.256-2018. Технические требования к аппаратно-программным средствам и электротехническому оборудованию ЦПС. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС», 2018. 130 с.
9. Stefanka M., Prokop V., Salge G. Application of IEC 61850-9-2 in MV switchgear with sensors use. 22-nd intern. conf. on electricity distribution CIRED2013. Stockholm. 2013.
10. Мокеев А.В., Перелыгин Л.В., Хромцов Е.И. Комбинированные первичные измерительные преобразователи тока и напряжения 6–35 кВ // Новое в российской энергетике. 2017. № 1. С. 39–52.