

## ВАРИАНТЫ АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ «ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ» 110–220 кВ

С.О. АЛЕКСИНСКИЙ, канд. техн. наук

Рассмотрены варианты построения системы релейной защиты и автоматики электрической подстанции на основе цифровой технологии сбора, передачи, обработки данных. Предложено при наличии на подстанции единой информационной шины организовать обработку информации в централизованной вычислительной системе.

*Ключевые слова:* цифровая подстанция, релейная защита, автоматика, информационная шина, централизованная вычислительная система.

## ARCHITECTURAL SOLUTIONS VERSIONS OF RELAY PROTECTION SYSTEM AND AUTOMATIONS OF 110–220 KW «DIGITAL SUBSTATION»

S.O. ALEKSINSKIY, Candidate of Engineering

The article considers the construction variants of the relay-type protection and automations system for electric substation on basis of digital technology of collection, transmission and processing of data. If a single data bus is presented at the substations, the author suggests to organize information handling in the centralized computer system.

*Key words:* digital substation, relay-type protection, automation, data bus, centralized computer system.

**Актуальность разработки концепции «Цифровой подстанции».** Совершенствование информационно-технологических систем подстанции, в том числе релейной защиты, выходит на новый этап развития. В настоящее время ОАО «ФСК ЕЭС» реализует Инновационную программу «Цифровая подстанция» и осуществляет разработку концепции программно-аппаратного комплекса подстанции. Также планирует приступить к созданию опытного полигона и прототипа программно-аппаратного комплекса, испытания которого должны быть завершены к 2014 г. [1]. Работы в указанном направлении активно ведутся в США, Китае, Бразилии, Великобритании [2]. Под термином «цифровая подстанция» понимается подстанция с применением интегрированных цифровых систем измерения, релейной защиты, управления высоковольтным оборудованием, использующих цифровые трансформаторы тока и напряжения.

Структурная организация систем управления электроэнергетическими объектами в значительной мере определяется уровнем развития информационных и микропроцессорных технологий. Весьма распространенным типом энергообъекта является подстанция класса напряжения 110–220 кВ. В состав информационно-технологических систем (ИТС) подстанции наряду с другими входит система релейной защиты и автоматики (РЗА). Первые экспериментальные цифровые системы РЗА подстанции в конце 60-х годов XX в. [3] строились на централизованном принципе. Причина заключалась в том, что использовать на подстанции несколько вычислительных устройств не представлялось возможным. Появление в 70-х годах микропроцессоров изменило ситуацию, создав предпосылки для построения распределенных систем РЗА. На начальном этапе внедрения микропроцессорных средств в технику релейной защиты одним из их достоинств называлась универсальность, т. е. способность решать различные задачи. Декларировалось, что одно вычислительное устройство может заменить несколько панелей РЗА. Специфика системы РЗА заключается в необходимости обеспечения ее высокой надежности. Технические средства системы РЗА включают в себя не только панели и шкафы устройств защиты, но и измерительные трансформаторы, кабельное хозяйство, средства связи (высокочастотные, оптоволоконные), источники оперативного тока. Для обеспечения требуемого высокого уровня надежности

системы применяется дублирование ее функций в различных устройствах. В соответствии с Нормами технологического проектирования (НТП) [4], различают функции основной и резервной защит. Система РЗА выполняет функции не только ближнего, но и дальнего резервирования, действуя при отказах защит или выключателей смежных элементов. Таким образом, при реализации функций системы РЗА предусматривается основное действие с двойным резервированием (троирование). При недостаточной чувствительности защит смежных элементов, выполняющих функции дальнего резервирования, НТП предусматривают усиление функции ближнего резервирования на защищаемом объекте путем установки третьего комплекта защит (он необходим в случае штатного вывода из работы одного комплекта и аварийного отказа другого). Для обеспечения эксплуатационной надежности функцию управления выключателем в большинстве случаев приходится, в соответствии с требованиями ОАО «ФСК ЕЭС», выносить в отдельное устройство. Несмотря на то что средствами микропроцессорной техники в одном устройстве можно выполнить перечисленные функции трех устройств защиты и четвертого устройства – управления, на одном защищаемом присоединении приходится устанавливать до четырех отдельных устройств. В итоге количество микропроцессорных устройств защиты на подстанции 110–220 кВ нередко превышает сотню. Таким образом, при переходе с электромеханической элементной базы на микропроцессорную, сокращения числа панелей (шкафов) практически не наблюдается и реализация функций РЗА требует значительного объема программно-аппаратных средств. Необходимость технико-экономической оптимизации информационно-технологических систем делает актуальной разработку концепции «цифровой подстанции».

**Варианты выполнения систем управления.** Рассмотренная ситуация характерна для построения *распределенной системы РЗА*, в которой функции РЗА выполняются оконечными устройствами системы – терминалами. Несмотря на то что в терминалах многократно тиражируются одни и те же аппаратные и программные средства, они не являются абсолютно автономными устройствами, а образуют систему. Их сложные логические алгоритмы строятся с использованием сигналов различных устройств. Реализация таких возможностей приводит к усложнению информационных связей

между устройствами. Эти связи, как правило, выполняются через индивидуальные интерфейсные элементы (выходные сигнальные контакты терминалов, дискретные оптически развязанные входы).

В последние годы наметилась тенденция к усилению информационных связей между терминалами путем объединения их в локальную информационную сеть. В такой сети предусматривается обмен сигналами со скоростями, соответствующими темпу протекания аварийных электромагнитных процессов в электроэнергетической системе. В локальной сети, объединяющей терминалы РЗА, предусматривается применение протокола МЭК 61850 (GOOSE). Однако применение информационной сетевой технологии в ответственных выходных цепях вызывает у специалистов опасения по условиям надежности и устойчивости функционирования. Цепи выходных реле, действующих на электромагниты отключения выключателей, цепи УРОВ, защиты шин, предлагается выполнять традиционными проводными кабельными связями.

Альтернативный принцип построения системы РЗА – это построение *централизованной системы*. В первую очередь целесообразно рассмотреть централизованную систему *измерений* РЗА. Индивидуальные каналы ввода аналоговых сигналов в большом количестве терминалов могут быть заменены более оптимальной по аппаратным затратам централизованной системой цифрового измерения и распределения данных о параметрах режима.

При построении централизованной системы измерения РЗА предлагаются два решения: первое – применение цифровых трансформаторов тока; второе – применение полевых измерительных терминалов РЗА (по терминологии GE – Vrick модулей [5]). При построении централизованной системы в ее архитектуре появляется последовательно включенный в канал ввода аналоговых сигналов общий элемент – распределитель цифровых сигналов, отказ которого критичен для всей системы РЗА защищаемого объекта. Повышение его надежности путем троирования может существенно снизить эффективность перехода на

централизованный ввод сигналов в систему РЗА. В каждом терминале пришлось бы предусматривать по три входных цифровых канала (фирма GE при реализации шины процесса Hard Fiber предусматривает в Карте процесса релейного модуля D60s до 8 оптических портов радиальных связей с Vrick модулями [5]). Количество оптических кабелей на релейном щите в рассматриваемом архитектурном решении оказывается весьма значительным.

*Комбинированная система РЗА.* Несколько снизить требования к надежности распределителя цифровых сигналов можно путем комбинации централизованного и распределенного принципов построения системы РЗА. На рис. 1 приведена структурная схема РЗА ПС на основе централизованной системы цифровых измерений РЗА и полевых терминалов усиленного резервирования. Функция усиленного резервирования может быть реализована в простых, климатически стойких, компактных, энергетически экономичных полевых терминалах, располагаемых непосредственно в ячейках ОРУ-110–220 кВ. Усиленное резервирование должно охватывать не только функции резервной защиты, но и цепи оперативного тока, обеспечивающие аварийное отключение. Например, вблизи привода выключателя целесообразно установить автономный емкостный накопитель для электромагнита отключения, подпитываемый через промежуточный трансформатор и выпрямитель от отдельной обмотки однофазного емкостного трансформатора линии. Отключение выключателя от емкостного накопителя будет производить только полевой терминал усиленного резервирования. При выявлении отказа основных систем РЗА, связей по оптоволоконным каналам, обеспечивающим централизованную систему цифровых измерений РЗА, системы оперативного тока возможно автоматическое ускорение ступеней защит терминалов усиленного резервирования. Ускорение может вводиться по факту пропадания блокирующего сигнала от подсистемы самоконтроля системы РЗА. Исправление неселективных отключений возможно при помощи АПВ, входящего в состав полевого терминала.

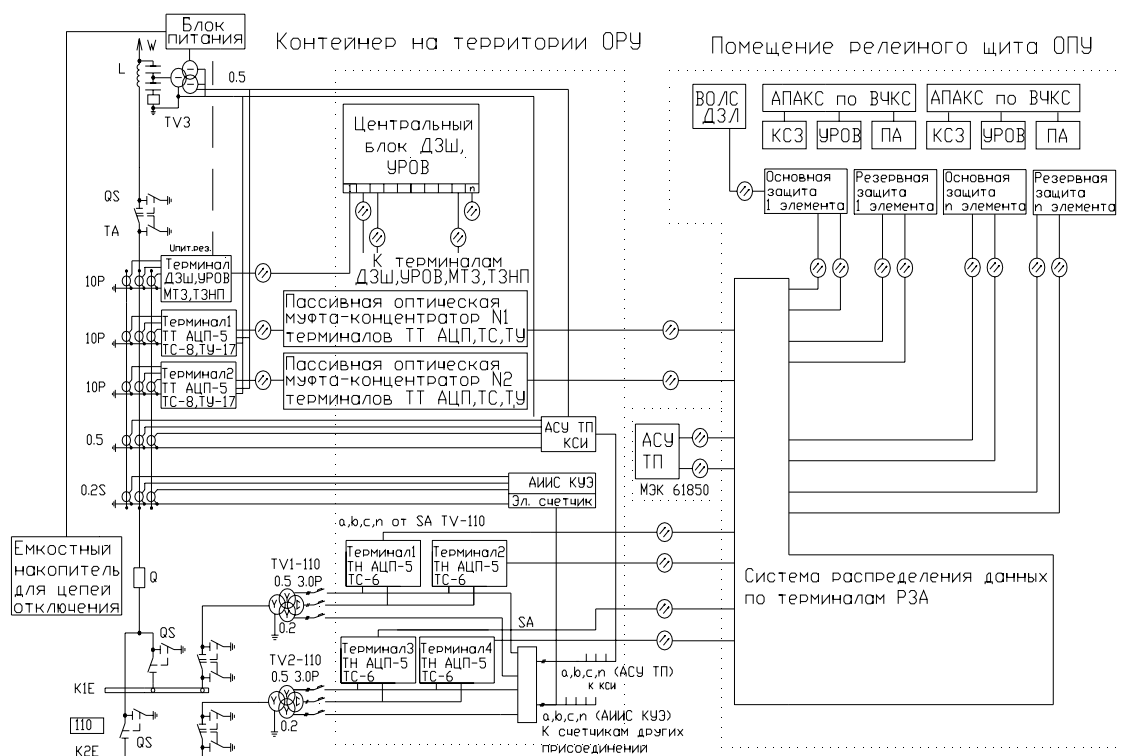


Рис. 1. Структурная схема РЗА ПС на основе централизованной системы цифровых измерений РЗА и полевых терминалов усиленного резервирования с резервированием оперативного тока. Вариант РЗА с традиционными терминалами

Полевые терминалы РЗА (ДЗШ, УРОВ, МТЗ, ТЗНП), измерительные терминалы РЗ (ТТ) № 1 и № 2 размещаются в ячейке в ячееке ОРУ (климатические условия: от -50 до +40°С). Полевые терминалы в сочетании с блоком питания емкостного накопителя и емкостным накопителем для цепи электромагнитов отключения выключателя образуют автономную резервную систему защиты, установленную в ячейке ОРУ вблизи выключателя.

В целях повышения надежности и устойчивости функционирования системы РЗА функции усиленного резервирования могут быть выполнены не микропроцессорным терминалом, а автономным устройством релейной защиты на альтернативной электромеханической элементной базе.

**Комбинация функций терминалов усиленного резервирования и ДЗШ.** Одним из наиболее ответственных элементов системы РЗА энергообъекта является защита шин высокого напряжения. При установке на каждом присоединении полевого терминала может оказаться целесообразным их использование в качестве терминалов ДЗШ. Такой подход оправдан при сохранении общей традиционной многотерминальной распределенной системы РЗА. В целях сокращения длин оптоволоконных кабелей между терминалами и центральным блоком ДЗШ блок территориально следует разместить в центре ОРУ в климатически защищенном контейнере.

**Структура каналов ввода данных.** В контейнере на ОРУ следует также разместить дублированные концентраторы информационных терминалов трансформаторов тока присоединений и, возможно, информационные терминалы трансформаторов напряжения (второй вариант их размещения – в непосредственной близости от ТН). Размещение концентраторов в контейнере на территории ОРУ обусловлено необходимостью сокращения числа кабельных связей (в данном случае оптоволоконных) между ОРУ и зданием оперативного пункта управления (ОПУ), в котором размещается релейный щит. Со стороны ОРУ на релейный щит приходят два дублирующих

друг друга оптоволоконных кабеля, по которым посредством временного разделения канала передаются потоки данных от полевых информационных терминалов ТТ РЗА.

Передача данных от дублированных полевых измерительных терминалов ТН РЗА каждого из шинных трансформаторов напряжения может вестись как через общий концентратор информационных терминалов, так и по четырем отдельным оптоволоконным кабелям. В последнем случае объединение информационных потоков от ТТ и ТН будет производиться в системе распределения цифровых данных по терминалам РЗА, расположенной на ОПУ.

В настоящее время преобладает концепция распределенной многотерминальной архитектуры с выделением на каждом присоединении группы терминалов основной и резервных защит управления. При комбинации такой архитектуры с элементами централизованной архитектуры сбора данных необходимо предусмотреть систему распределения цифровых данных для адресной передачи их потоков от ТТ и ТН в устройства РЗА. Как отмечалось, система громоздка, и к ней предъявляются повышенные требования по надежности. Такая комбинированная система может рассматриваться только как временная, промежуточная между распределенной и централизованной системами.

**Централизованная система РЗА энергообъекта.**

**Структура централизованной РЗА.** Недостаток, связанный с громоздкостью выходных оптоволоконных кабельных связей рассмотренной комбинированной системы, может быть устранен при выполнении централизованной системы РЗА, но, разумеется, это не причина, а только повод для ее рассмотрения. Структурная схема централизованной РЗА подстанции приведена на рис. 2.

Система РЗА по надежности должна удовлетворять требованию независимого троирования: основная защита, резервная защита, вторая резервная защита (далее резервирование со стороны смежных объектов или усиленное ближнее резервирование).

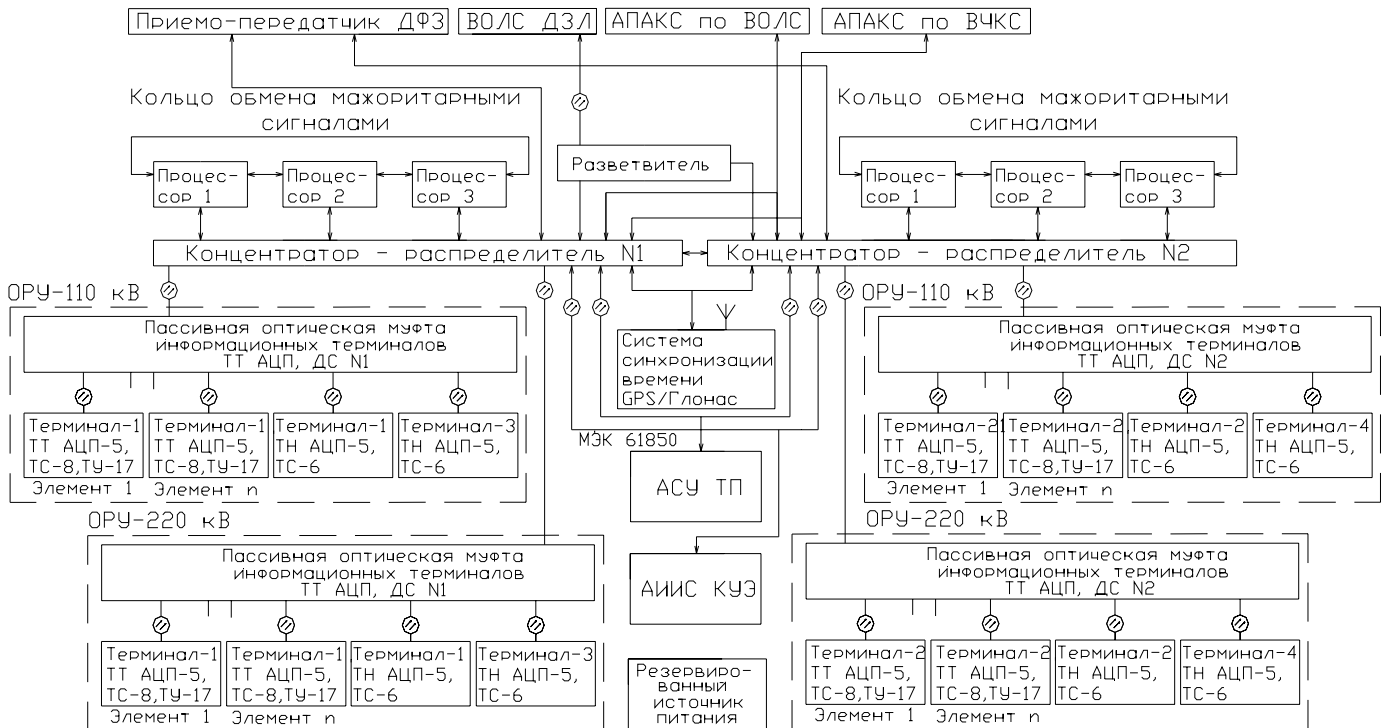


Рис. 2. Структурная схема РЗА ПС. Вариант с дублированной мажоритарной централизованной системой РЗА ПС (с возможностью дополнения независимой резервной РЗА на полевых терминалах)

Структура централизованной системы РЗА содержит:

- распределенные дублированные на каждом соединении информационные терминалы РЗА;
- промежуточные концентраторы информационных терминалов, устанавливаемые в контейнере на территории ОРУ;

- две дублирующие друг друга централизованные подсистемы РЗА, каждая из которых содержит концентратор-распределитель потоков измерительных данных и процессорную подсистему.

Каждая из централизованных подсистем связана с подсистемами:

- синхронного времени (GPS/Глонас);
- АСУ ТП;
- АИИС КУЭ;
- устройств передачи аварийных сигналов и команд (УПАКС) по высокочастотному каналу связи (ВЧКС);
- устройств передачи аварийных сигналов и команд (УПАКС) по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС);
- передачи сигналов дифференциальной защиты линии (ДЗЛ) по ВОЛС (с разветвлением оптоволоконной связи в два концентратора-распределителя);
- резервированной системы гарантированного электропитания от аккумуляторных батарей и системы собственных нужд 0,4 кВ с источниками бесперебойного питания.

*Измерительные подсистемы РЗА и АСУ ТП.* Совмещение измерительных подсистем РЗА и АСУ ТП путем подключения керна класса 0.5 к измерительному терминалу РЗА возможно только при условии жесткой сетевой синхронизации дискретизации измерений и преодоления сложности с аттестацией функций ваттметра и варметра как средств измерения мощностей. В настоящее время такая синхронизация осуществляется в локальных измерительных преобразователях, имеющих два встроенных синхронно запускаемых АЦП для измерения тока и напряжения в фазе. Кроме того, для обеспечения требуемого класса точности измерений часто используют АЦП с разрядностью большей, чем для РЗА, но с недостаточным для РЗА быстродействием. Поэтому на начальном этапе разработки измерительные каналы АСУ ТП не следует интегрировать в централизованную систему РЗА. Взаимная координация замеров систем РЗА и АСУ ТП целесообразна на верхнем уровне управления в АСУ ТП. В то же время интеграция функций телесигнализации и телеуправления АСУ ТП в централизованную систему РЗА возможна и целесообразна.

Информационные терминалы РЗА предназначены для выполнения следующих функций:

- сбора данных об аналоговых параметрах процесса (токах ТТ, напряжениях ТН) и их передачи в цифровой форме. Терминал ТТ должен вводить 5 аналоговых сигналов: токи фаз А, В, С, ток нулевой последовательности, напряжение фазы от емкостного линейного ТН; терминал ТН должен вводить 5 аналоговых сигналов: напряжения фаз А, В, С, напряжение нулевой последовательности  $3U_0$ , напряжение одной из фаз разомкнутого треугольника  $U_{и-к}$  для контроля исправности цепей напряжения;

- сбора дискретных сигналов. Терминал ТТ должен вводить 9 (11) сигналов: линейный, два шинных, (обходной) разъединители с заземляющими ножами, выключатель – НЗ, НР блок-контакты; терминал ТН – 6 сигналов: блок – контакты 3-х автоматов вторичных цепей, разъединитель с двумя заземляющими ножами;

- передачи и формирования управляющих команд в терминал ТТ – 17 (21); для выключателя (команды для электромагнитов отключения и включения ЭО-1, ЭО-2, ЭВ) и 7 (9) коммутационных аппаратов, разъединителей и заземляющих ножей, – команды включить и отключить.

*Организация передачи данных.* Физически связь между полевыми измерительными терминалами и системой распределения данных по терминалам РЗА должна осуществляться по терминальным оптоволоконным кабелям (например, 4-х волоконным). Терминальные кабели в контейнере на территории ОРУ при помощи пассивной оптической переходной муфты объединяются в магистральный кабель, который может иметь емкость до 128 волокон.

Возможно применение нескольких магистральных кабелей с меньшим числом волокон.

Для обеспечения универсальности системы передачи данных от измерительных терминалов РЗА или цифровых трансформаторов тока и/или напряжения в систему обработки данных необходима стандартизация интерфейсов и протоколов. Существует международный стандарт IEC 61850 9.1, ориентированный на симплексную передачу данных от трансформаторов тока и напряжения. В России планируется разработка стандарта ГОСТ Р МЭК 61850, который, по всей видимости, отразит положения IEC 61850 9.1. Формат передачи данных достаточно громоздок: при необходимости передать из терминала 16 информационных байт за один отсчет в стандартном фрейме придется передавать 123 байта (984 бита). При 96 выборках за период промышленной частоты скорость передачи должна быть не менее 10 Mbps, а при 1024 выборках – 100 Mbps.

При использовании симплексной передачи возникает проблема синхронизации данных от отдельных измерительных терминалов РЗА. Один из наиболее простых вариантов ее решения – непрерывная асинхронная потоковая передача данных от терминала по упрощенному протоколу (признак начала передачи фрейма, адрес терминала, 16 байт данных, признак окончания фрейма). Идентификация каналов измерения – по порядку следования. Адрес терминала целесообразно ввести для исправления монтажных или кроссировочных ошибок. При знаки начала текущего фрейма и окончания предыдущего могут быть совмещены.

Представляется целесообразным при разработке стандарта передачи цифровых данных от измерительных трансформаторов тока и напряжения в централизованную систему РЗА предусмотреть потоковые протоколы как асинхронного типа, подобный рассмотренному, так и синхронного, например SPI. При использовании протокола SPI применяется дуплексный обмен по принципу ведомый-ведущий с передачей синхронизирующих импульсов. Подробное рассмотрение вопросов организации информационных связей выходит за пределы настоящего материала.

*Процессорная подсистема.* Необходима разработка архитектуры высоконадежной процессорной подсистемы, обеспечивающей производительность, достаточную для выполнения функций РЗА в темпе протекания аварийных электромагнитных процессов.

В первом приближении следует рассмотреть и сравнить мультипроцессорные системы с общей шиной и с нечетно-кратным (например, троированным) резервированием, дополненным функцией мажорирования.

В нечетно-кратно резервированной мультипроцессорной системе функция мажорирования может выполняться как в отдельном аппаратном узле (что нежелательно, так как требования к его надежности чрезвычайно высоки), так и распределенно, в каждом из процессоров, вырабатывающих блокирующие сигналы и для себя, и для соседних процессоров. Последний вариант представляется предпочтительным, так как в сочетании с индивидуальным запоминающим устройством обеспечивает максимальную независимость работы каждого из процессоров. Высокие требования к производительности про-

цессора и объему запоминающего устройства при современном уровне развития технологии вполне выполнимы.

Применение мультимикропроцессорной системы с общей шиной и общим запоминающим устройством нежелательно из-за высоких требований к надежности этих элементов.

**Распределительное устройство класса напряжения 6–10–35 кВ.** Для обеспечения необходимого уровня надежности требуется дублирование функций РЗА: индивидуальное устройство защиты присоединения и устройство РЗА, выполняющее функции дальнего резервирования.

Поскольку и функция измерения параметров аварийного процесса, и функция аварийного управления выключателем сосредоточены в ячейке КРУ, то там же, в терминале, целесообразно сохранить и функции РЗА. Однако некоторые функции, такие как функция дуговой защиты шин, логической защиты шин, селективной защиты присоединений от однофазных замыканий на землю, целесообразно выполнить централизованными. Централизация может быть обеспечена как за счет применения специализированных терминалов, так и за счет организации поперечных (одноуровневых) связей между терминалами через локальную сеть. Сетевая нерезервированная организация выполнения функций РЗА может применяться как дополнительная к терминальной.

### Заключение

В системе РЗА энергообъекта для обеспечения необходимого уровня надежности необходимо аппаратно-независимое трирование (основное действие с двойным резервированием, в том числе с дальним).

Распределенная система микропроцессорной РЗА подстанции 110–220 кВ, по сравнению с электромеханическими и микроэлектронными аналогами, по количеству требуемых панелей (шкафов) не имеет явных преимуществ. В терминалах РЗА имеется существенная аппаратная и функциональная избыточность. Система РЗА усложняется за счет поперечных связей между терминалами. Снижается обзорность системы, повышается вероятность ошибок при проектировании, монтаже, наладке.

Создание комбинированной системы, выполняющей централизованный ввод и распределение сигналов в цифровой форме в сочетании с распределенной системой их обработки в группах индивидуальных шкафов каждого из

присоединений, приводит к неоправданной аппаратной и функциональной избыточности. Комбинированная централизованно-распределенная система РЗА может рассматриваться как промежуточный этап перехода от традиционной распределенной архитектуры к централизованной.

При построении распределенной системы микропроцессорной РЗА функцию третьей подсистемы усиленного резервирования целесообразно возложить на простые полевые терминалы РЗА, выполняющие функции резервных ступеней с автоматическим ускорением от централизованной системы РЗА и исправлением неселективных действий от АПВ. Такие терминалы целесообразно использовать совместно с резервными емкостными накопителями для управления электромагнитами отключения выключателей. При некотором снижении функциональности надежность и устойчивость системы РЗА может быть повышена путем замены терминалов автономными устройствами релейной защиты на альтернативной электромеханической элементной базе.

Следует считать перспективными исследования в области создания централизованной системы РЗА подстанции. Предлагается дублированная структура сбора, передачи и обработки данных на основе мажорированной мультимикропроцессорной системы.

В КРУ 6–10–35 кВ целесообразно сохранить традиционную распределенную архитектуру РЗА с применением одного терминала на присоединение. Отдельные типы защит могут иметь централизованное исполнение.

### Список литературы

1. Сайт ОАО «ФСК ЕЭС» Copyright © 2007 – 2010.
2. [http://www.ruscable.ru/other/dokl\\_ipnes2010/gorelik.pdf](http://www.ruscable.ru/other/dokl_ipnes2010/gorelik.pdf) Горелик Т.Г. Доклад «Цифровая подстанция. Обзор мировых тенденций развития». Конференция «Инновационные проекты в электросетевом комплексе» в рамках выставки IPNES 2010.
3. **Rockefeller G.D.** Fault protection with a digital Computer // IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. – April 1969. – V. 88. – P. 438–464.
4. **Нормы** технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ (НТП ПС). Стандарт организации. Приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 13.04.2009 № 136. – М., 2009.
5. <http://www.GEmultiline.com> GE Шина процесса. Hard Fiber. Process Bus System. Справочное руководство. Код публикации GE: GEK-113542.

Алексинский Сергей Олегович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
ООО «РЗА Сервис»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,  
руководитель сектора РЗА, ведущий инженер  
телефон (4932) 26-99-06,  
e-mail: as@ep-rza.ru