

Положительный опыт внедрения систем на базе технологий МЭК 61850-9-2

Мартихин А.Ю.,

начальник производственной службы РЗА филиала ПАО «МОЭСК» — «Московские высоковольтные сети»

Вылегжанин А.В.,

начальник производственной службы АСТУ и ТМ филиала ПАО «МОЭСК» — «Московские высоковольтные сети»

Семи́н В.В., начальник управления АСДУ и систем связи филиала ПАО «МОЭСК» — «Новая Москва»

Беккер С.Э., начальник управления РЗА филиала ПАО «МОЭСК» — «Новая Москва»

Большинство решений при проектировании цифровых подстанций с применением шины процесса МЭК 61850-9-2 сводится к двум прямо-противоположным архитектурам: децентрализованной и централизованной.

Многие вендеры (как отечественные, так и зарубежные) развивают направление ЦПС, придерживаясь децентрализованной архитектуры. Это не удивительно и легко объяснимо. Если компания исторически производит, к примеру, терминалы РЗА классического типа, то самый простой и быстрый путь — это сделать такой же терминал, но с возможностью приема цифровых данных через порт/порты Ethernet. При этом объем функций, выполняемых на устройстве, остается прежним по отношению к «классике». Объем выполняемых функций на таком устройстве ограничен вычислительным ресурсом процессора, унаследованного от традиционного устройства.

Централизация функций, напротив, подразумевает объединение функций автоматизации на единой аппаратной платформе (сервере), и чем больше функций и сложнее выполняемые алгоритмы, тем более производительным должен быть сервер. Основным предметом разработки для компаний, пропагандирующих централизованную архитектуру, является разработка непосредственно программного обеспечения, коим являются исполняемые

алгоритмы, драйверы протоколов информационного обмена, организация баз данных и т.д. Данное ПО предполагается запускать на серийных серверах общего назначения, например, производимых Hewlett-Packard, DELL, Cisco и др. При этом серверные платформы не всегда подходят для эксплуатации на подстанциях распределительных электрических сетей.

Промежуточное положение между двумя вышеописанными архитектурами занимает кластерная архитектура. Цифровой кластер — это сегмент ЦПС, для которого характерно объединение определенного набора функций в виде программно реализованных цифровых устройств (IED), запускаемых на общей аппаратной платформе с необходимой степенью резервирования. В цифровой кластер могут быть объединены как несколько присоединений, например, секция шин для выполнения функций РЗА и АСУ ТП, так и подстанция целиком, для выполнения определенной функции, например, РАС, ПКЭ, АСКУЭ и т.д. При этом различные кластеры могут использовать в качестве источника данных одни и те же устройства ПАС (преобразователь аналоговых сигналов), ПДС (преобразователь дискретных сигналов) или цифровые ТТ, ТН и коммутационные аппараты.

Именно кластерной архитектуры мы решили придерживаться при внедрении элементов ЦПС на реальных объектах, так

как данная архитектура, с нашей точки зрения, является наиболее оптимальной в технико-коммерческом отношении. Целью внедрения цифровых систем защиты и управления подстанцией являлся поиск и тестирование технического решения, основанного на технологии ЦПС, позволяющего, помимо технологических преимуществ, получить снижение CAPEX и OPEX относительно традиционных систем.

Для пилотного внедрения кластерной архитектуры ЦПС было применено оборудование компании ООО «ПиЭлСи Технолodge», так как данная организация смогла предложить полный перечень устройств и ПО собственной разработки для реализации ЦПС. Данная компания производит устройства ПАС (AMU) и ПДС (DMU), сетевые коммутаторы, устройства синхронизации времени, универсальные вычислительные модули различной производительности (контроллеры, серверы, IED), а также алгоритмы РЗА, АСУ ТП, ККЭ, РАС, Учета электроэнергии и др.

Полигоном МОЭСК для внедрения элементов ЦПС с кластерной архитектурой стала ПС 110 кВ «Бирюлево» (рисунок 1). Данная подстанция имеет ОРУ 110 кВ, выполненное по схеме 2 секции шин с обходной, 2 трансформатора 110/10/6 кВ по 100 МВА, ЗРУ 10 кВ 4 секции шин и ЗРУ 6 кВ 2 секции шин. На подстанции были внедрены следующие цифровые системы в виде цифровых кластеров:

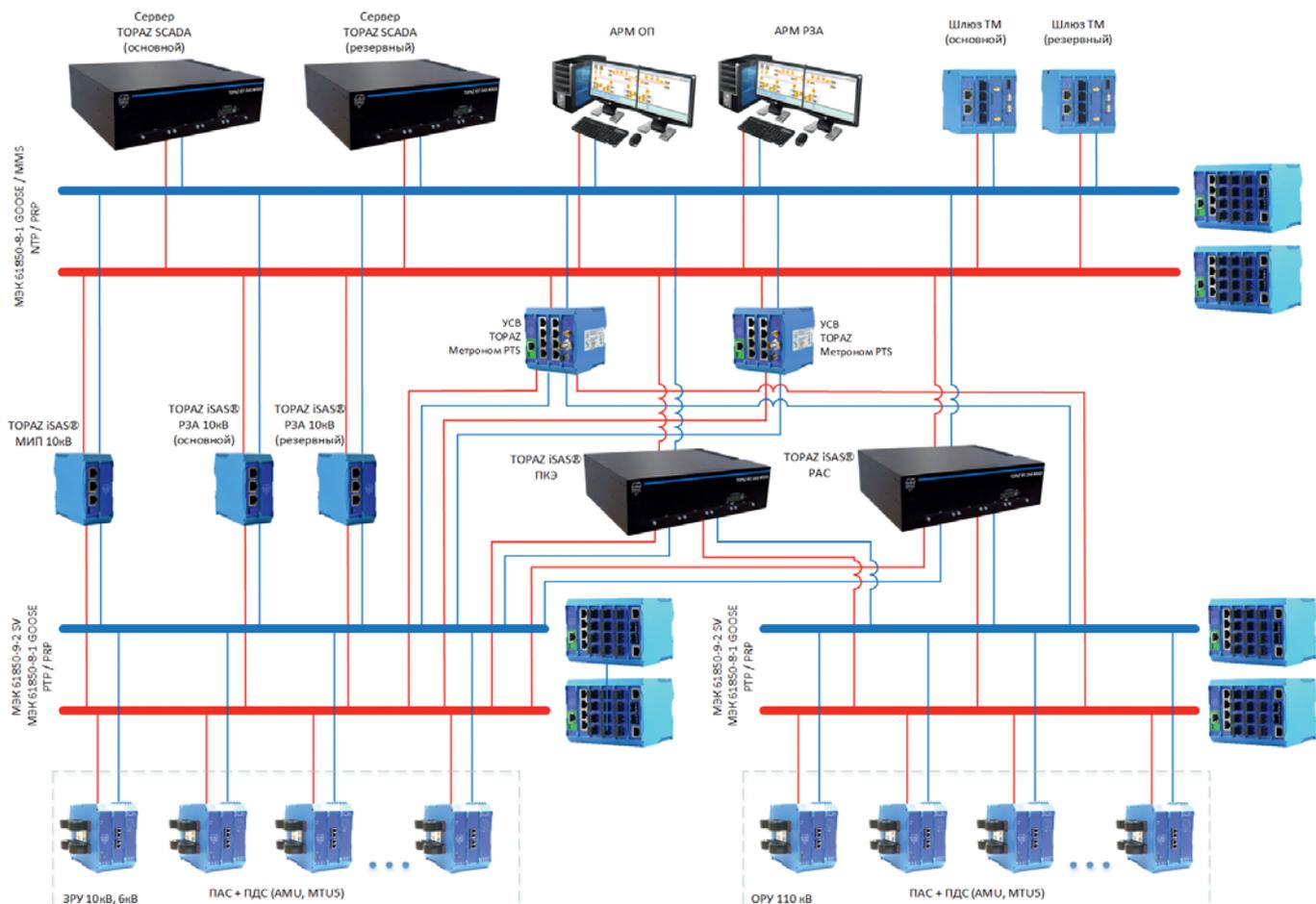


Рис. 1. Структурная схема ЦПС 110 кВ «Бирюлево»

цифровой регистратор аварийных событий (в объеме всей подстанции), цифровая система контроля качества электроэнергии (в объеме секций шин 110, 10, 6 кВ), цифровая секция 10 кВ (функции РЗА и АСУ ТП).

Важным аспектом при проектировании шины процесса являлся выбор устройств ПАС. Очень важным для оптимизации структуры шины процесса является применение устройств различных модификаций по характеристикам измерительных каналов. Для комплектации ячеек с ТТ были применены устройства ПАС с тремя токовыми входами для подключения к измерительным сердечникам ТТ, тремя токовыми входами для подключения к защитным сердечникам ТТ и одним входом для измерения тока нулевой последовательности. Для установки в ячейки ТН были применены устройства с восемью входами измерения напряжения. Как видите, привычная многим конфигурация измерительного устройства ПАС, а именно 4 тока

+ 4 напряжения, оказалась не востребованной в оптимизированной архитектуре ЦПС.

В качестве устройств ПАС, для сопряжения существующих измерительных ТТ и ТН с шиной МЭК 61850-9-2, были применены устройства ТОПАЗ АМУ (рисунок 2) в модификации, обладающей тремя входами тока для подключения к измерительным сердечникам ТТ и четырьмя входами тока для подключения к защитным сердечникам ТТ. Для ячейки ТН — ТОПАЗ АМУ



Рис. 2. Внешний вид комплекта полевых устройств ТОПАЗ АМУ (ПАС + ПДС)

с восемью входами измерения напряжения. Каналы измерения переменного тока ТОПАЗ АМУ, предназначенные для подключения к измерительным сердечникам ТТ, рассчитаны на работу в диапазоне тока 0,01–10 А с относительной погрешностью 0,1%, каналы измерения переменного тока, предназначенные для подключения к защитным сердечникам ТТ, рассчитаны на работу в диапазоне тока 0,05–200 А с относительной погрешностью 0,5%, каналы измерения переменного и постоянного напряжения рассчитаны на работу в диапазоне 5–330 В с относительной погрешностью 0,1%. Устройства ТОПАЗ АМУ поддерживают работу в режиме выдачи потока мгновенных значений с частотами 20, 24, 80, 96, 256, 288 выборок за 20 мс. При этом для функций РЗА, ПАС, МИП использовалась частота 20 выборок за 20 мс, а для функции ПКЭ 256 выборок за 20 мс.

В качестве ПДС были применены устройства ТОПАЗ МТУ 5 (2 шт. на ячейку), имеющие 3 дис-



Рис. 3. Структурная схема цифрового кластера на базе TOPAZ iSAS®

кратных выхода для управления выключателем и 8 дискретных входов каждая, а также поддерживающие информационный обмен в соответствии с МЭК 61850-8-1 GOOSE (подписчик, публикатор). Каждое полевое устройство поддерживает протокол параллельного резервирования PRP. Таким образом на уровне присоединения мы имеем 3 устройства с поддержкой PRP (ПАС + 2 ПДС), которые через встроенный в TOPAZ AMU коммутатор объединены в сети А и В, а оптические порты TOPAZ AMU подключены к коммутаторам А и В шины процесса двумя оптическими патчкордами. То есть из каждой ячейки выходят только 2 оптических патчкорда. Таким образом мы физически объединили сеть SV и сеть GOOSE между IED и полевыми устройствами, это еще один шаг к оптимизации структуры сети шины процесса.

На ПС 110 кВ «Бирюлево» было установлено 28 комплектов устройств полевого уровня ПАС и ПДС.

Каждый из цифровых кластеров образован программно-аппаратным комплексом TOPAZ iSAS® (Intelligent Substation Automation Systems). ПАК TOPAZ iSAS® представляет собой универсальный вычислительный модуль, предназначенный для эксплуатации в условиях подстанции и выполняющий функции автоматизации и защиты посредством специализированного программного обеспечения (рисунок 3). То есть функции РЗА, МИП, Учета, ККЭ, РАС и др. реализованы в TOPAZ iSAS® в виде программных приложений в соответствии с информационной моделью МЭК 61850, а серверная платформа для них выбирается

исходя из качественного и количественного состава функций.

При разработке структуры ЦПС стоял вопрос об организации системы синхронизации устройств ПАС в шине процесса. Решения было два: синхронизация по шине 1PPS или по шине процесса по протоколу РТР. В первом случае требуется построение отдельной шины для прохождения импульса, при этом желательно применение оптической шины 1PPS. Этот факт накладывает дополнительные издержки на организацию самой шины. При синхронизации устройств ПАС по протоколу РТР организация дополнительной шины не требуется, так как пакеты РТР передаются по шине процесса, однако коммутаторы, которые образуют шину процесса, в этом случае должны поддерживать протокол РТРv2 на аппаратном уровне, а устройства с такими функциями более дорогие. Для построения цифровой шины процесса были использованы управляемые сетевые коммутаторы TOPAZ SW5xx (рисунок 4), которые оказались существенно дешевле зарубежных аналогов и обеспечивают поддержку VLAN, а также режимы работы РТРv2 Boundary Clock и Transparent Clock (Граничные и Прозрачные часы), что сделало решение с синхронизацией ПАС

по РТР выгоднее в сравнении с шиной 1PPS.

Шина процесса на ПС 110 кВ «Бирюлево» разделена на 2 сегмента, в каждом из которых объединены полевые устройства, подключенные к оборудованию ОРУ 110 кВ и ЗРУ 10/6 кВ соответственно. Каждый сегмент образован двумя коммутаторами TOPAZ SW5xx, так как представляет из себя резервированную по протоколу PRP (протокол параллельного резервирования) ЛВС. Таким образом шина процесса состоит из 4-х коммутаторов TOPAZ SW5xx с оптическими портами Ethernet 100BASE-FX для подключения полевых устройств ПАС и ПДС, оптическими портами Ethernet 1000BASE-FX для подключения к серверам TOPAZ iSAS® и медными портами Ethernet 100BASE-TX для подключения к устройствам синхронизации времени TOPAZ Метроном PTS.

Синхронизации устройств ПАС в шине процесса необходима, в первую очередь, для исключения угловой погрешности между сигналами, получаемыми IED от разных ПАС. Согласно спецификации МЭК 61850-9-2LE устройства ПАС должны быть синхронизированы с точностью не хуже 4 мкс, что составляет 4,32 угловые минуты при пересчете в угловую погрешность. В свою очередь, МЭК 61869-13 (Stand alone Merging Unit) предписывает угловую погрешность для устройств ПАС классом точности 0,1 (а именно таким характеристикам соответствуют применяемые нами в качестве ПАС устройства TOPAZ AMU) не более 5 угловых минут. Таким образом, расхождение таймеров устройств ПАС не должно превышать 4 мкс.



Рис. 4. Сетевой коммутатор TOPAZ SW5xx

Синхронизация времени на устройствах, подключенных к шине процесса, ПАС TOPAZ AMU осуществляется от Устройства синхронизации времени TOPAZ Метроном PTS (рисунок 5) по протоколу IEEE 1588v2 (PTP), а на устройствах, подключенных к шине подстанции — по протоколу NTP. Согласно описанию типа средства измерения на TOPAZ Метроном PTS, предел смещения шкалы времени, формируемой по протоколу PTPv2, не превышает 250 нс.

На ПС 110 кВ «Бирюлево» для всех цифровых подсистем установлено 2 сервера времени (основной и резервный).

При реализации цифрового регистратора аварийных событий объем аналоговых сигналов составил 96, включая токи всех ячеек ОРУ 110 кВ, напряжения ТН-1 и ТН-2 110 кВ, токи вводных ячеек 10 кВ, напряжения ТН-1,2,3,4 10 кВ, токи вводных ячеек 6 кВ, напряжения ТН-1 и ТН-2 6 кВ, токи и напряжения ТСН, напряжение ЦПТ 1,2,3,4 СШ, напряжение аккумуляторных батарей.

В качестве серверной платформы для функций автономного регистратора ПС 110 кВ «Бирюлево» использован промышленный сервер TOPAZ IEC DAS MX820, который со специализированным программным обеспечением TOPAZ RAS образует ПАК TOPAZ iSAS® PAC. Принцип работы данного решения следующий: сервер TOPAZ iSAS® PAC получает через коммутатор потоки МЭК 61850-9-2 SV от устройств ПАС. Полученные выборки токов и напряжений пишутся в осциллограмму при выполнении условий старта записи. Дискретные сигналы поступают от устройств ПАС в виде GOOSE-сообщений. Также на основе обработки потока SV сервер TOPAZ iSAS® PAC выполняет расчет необходимых параметров и сравнение результатов вычисления с заданными уставками, таким образом обеспечиваются условия автоматического пуска.

ПАК TOPAZ iSAS® PAC обеспечивает запись аналоговых и дискретных сигналов в формате COMTRADE 2013, а также хранение файлов осциллограмм, пере-



Рис. 5. Устройство синхронизации времени TOPAZ Метроном PTS внешний вид

дачу файлов осциллограмм в АСУ ТП и диспетчерский пункт, автоматическую отправку событий и файлов осциллограмм посредством FAT-технологии (специализированная e-mail рассылка на заданный список адресов), автоматическую запись файлов осциллограмм на внешний usb-накопитель.

Также ПАК TOPAZ iSAS® PAC обеспечивает автоматический пуск регистратора по изменению состояния дискретного входа (срабатывание/возврат) либо по факту выхода за предел измеренного или расчетного аналогового параметра:

- действующее значение тока фаз А, В, С (измеренное);
- действующее значение тока нулевой последовательности (измеренное);
- действующее значение тока прямой, обратной и нулевой последовательности (расчетное);
- действующее значение напряжения фаз А, В, С (измеренное);
- действующее значение напряжения нулевой последовательности (измеренное);
- действующее значение напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности (расчетное).

На каждое присоединение реализован отдельный программный компонент автоматического пуска. Однако при пуске регистратора в единую осциллограмму пишутся все аналоговые и дискретные сигналы, заведенные в шкаф регистратора.

ПАК TOPAZ iSAS® ККЭ представляет собой совокупность

сервера TOPAZ IEC DAS MX820 и программных компонентов TOPAZ ККЭ. Контроль параметров и показателей качества электроэнергии осуществляется по напряжениям секций шин 110 кВ, 10 кВ и 6 кВ и токам их вводных ячеек (8 точек контроля). ПАК TOPAZ iSAS® ККЭ позволяет рассчитывать и регистрировать в памяти полный перечень параметров качества электроэнергии в соответствии с СТО 56947007-29.200.80.180-2014 (ФСК). Процесс измерения параметров и показателей качества электроэнергии соответствует классу А ГОСТ 30804.4.30-2013 и классу I по ГОСТ 30804.4.7-2013. Кроме всего прочего TOPAZ ККЭ позволяет автоматически формировать недельные и суточные отчеты по соответствию показателей качества электроэнергии установленным нормам.

Для удобства эксплуатации в шкаф ККЭ (рисунок 6) уста-



Рис. 6. Фото шкафа цифровой системы контроля качества электроэнергии TOPAZ iSAS® ККЭ на ПС 110 кВ «Бирюлево»

новлена панель отображения, на которую можно вывести текущие и архивные параметры и показатели качества электроэнергии, а также сформировать отчет и записать его на съемный носитель. Также возможно осуществить доступ к TOPAZ ККЭ с рабочего места метролога через Web-интерфейс.

Структура цифровой секции шин 10 кВ такова: 1 сервер (IED) TOPAZ iSAS® МИП и 2 сервера (основной и резервный) TOPAZ iSAS® РЗА, в качестве аппаратной платформы для которых выступают контроллеры модели TOPAZ IEC DAS MX681 (рисунок 7).

Алгоритмы защиты и управления являются виртуальными IED для каждого из 10 присоединений. При этом каждый IED реализован набором логических узлов, соответствующих информационной модели МЭК 61850.

Объем функций, выполняемых сервером TOPAZ iSAS® РЗА для каждого присоединения цифровой секции шин 10 кВ на ПС 110 кВ «Бирюлево», составил:

- АУВ (SOPM+SCBR+XCBR в соответствии с МЭК 61850-7-4);
- МТЗ с ускорением при включении (АПТОС);
- токовая отсечка (АПТОС);
- дуговая защита с контролем по току (АПТОС + PTRC);
- ЛЗШ (PTRC);
- контроль обрыва фазы (ВРТОС);
- логика отключения (PTRC);
- осциллографирование.

Сервер TOPAZ iSAS МИП для каждого присоединения цифровой секции шин реализует функции:

- МИП (многофункциональный измерительный преобразователь) (MMXU, MSQI);
- учет ЭЭ (MMTR).

Для внедрения кластера «цифровая секция шин 10 кВ» была выбрана 3-я секция ЗРУ 10 кВ. В секции находятся 10 линейных ячеек, вводная ячейка, ячейка секционного выключателя и ячейка ТН. Все ячейки секции оборудованы

панелями РЗА на электромеханических реле, кроме двух линейных ячеек, оборудованных терминалами РЗА TOP 200. Плотность монтажа в ячейках с электромеханикой очень высока, поэтому тут крайне благоприятно сыграли компактные габариты устройств ПАС TOPAZ AMU. Среди аналогичной продукции других отечественных и зарубежных производителей это самый компактный ПАС, который нам довелось видеть.

Цифровые защиты в течение всего срока опытной эксплуатации будут работать на сигнал, то есть выходные контакты устройства ПДС замыкаются не на соленоид отключения выключателя, а на дискретный вход того же ПДС с сопровождением записи аварийного процесса регистратором.

Для удобства эксплуатации в шкафу TOPAZ iSAS 10 кВ установлена панель визуализации TOPAZ HMI 15". Данная панель служит для вывода человеко-машинного интерфейса системы защиты и управления, через который можно осуществлять оперативное управление коммутационными аппаратами, вводить и выводить в работу защиты, менять уставки защит, просматривать журналы событий и тревог, просматривать осциллограммы аварийных событий и др.

В качестве полигона для цифрового РП был выбран РП-29 филиала Новая Москва. РП-29 представляет собой двухсекционное электрооборудование с двумя системами шин 10 кВ. Каждая секция шин РУ 10 кВ состоит из 10 присоединений, включая секционные присоединения и линии, отходящие к трансформаторам. Для взаимного резервирования вводов секций РУ 10 кВ в РП-29 реализован автоматический ввод резерва (АВР).

РП-29 укомплектована КРУ на базе камер сборных одностороннего обслуживания КСО-298.

Все алгоритмы защиты и управления реализованы в ПАС TOPAZ iSAS® (основной и резервный) на аппаратной платформе TOPAZ IEC DAS MX683. Также в РП установлен контроллер телемеханики для обмена данными между цифровой системой защиты и управления и диспетчерским пунктом по каналу LTE.

Все 20 ячеек 1 и 2 секций шин оборудованы комплектами TOPAZ ADMU (AMU + MTU5), соединенными оптическими патчкордами с сетевыми коммутаторами шины процесса (рисунок 8).

На РП-29 ПАС TOPAZ iSAS РП-29 реализует следующие функции:

- АУВ (SOPM + SCBR + XCBR в соответствии с МЭК 61850-7-4);

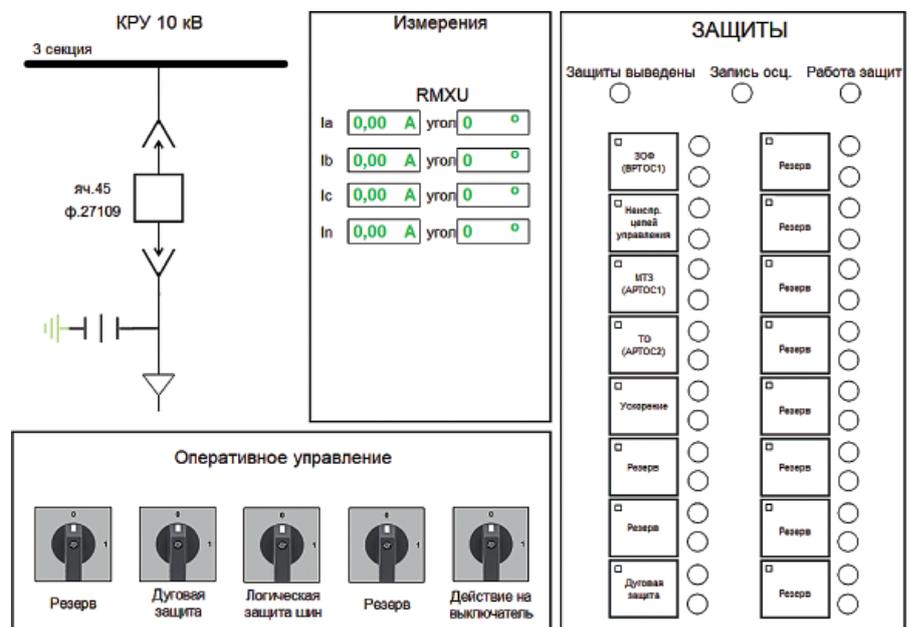


Рис. 7. Интерфейс «виртуального» терминала РЗА

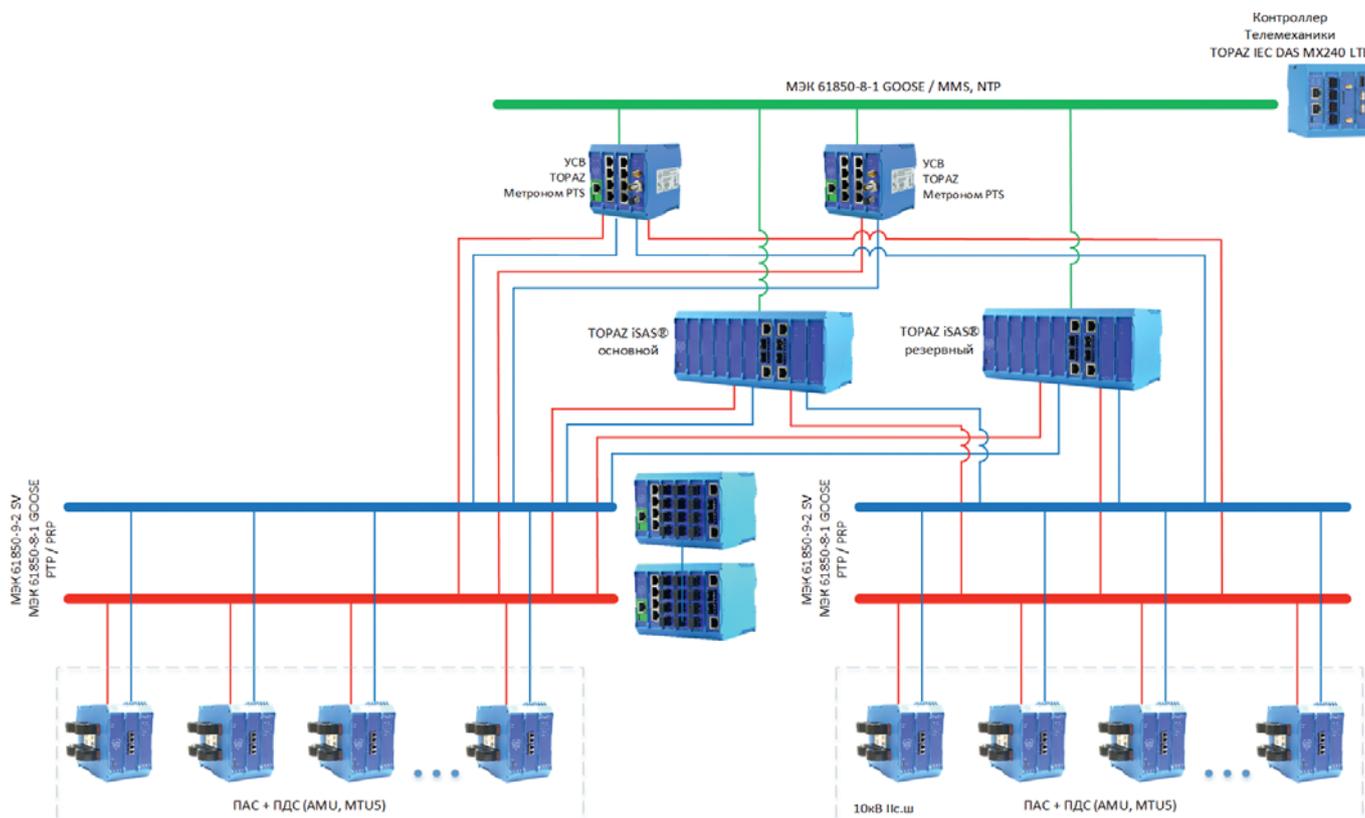


Рис. 8. Структурная схема цифрового РП

- МТЗ с ускорением при включении (АПТОС);
- токовая отсечка (АПТОС);
- дуговая защита с контролем по току (АПТОС+PTRC);
- ЛЗШ (PTRC);
- АВР (AATS);
- контроль обрыва фазы (ВРТОС);
- логика отключения (PTRC);
- осциллографирование;
- МИП (MMXU, MSQI);
- учет ЭЭ (MMTR);
- ПКЭ (MMXU, MSQI, MNAI).

Одним из наиболее важных преимуществ технологии ЦПС является возможность расширения качественного и количественного состава функций системы защиты и управления не увеличением объема оборудования, а расширением программного обеспечения без существенного изменения состава оборудования.

Наш опыт внедрения показал, что при правильном выборе архитектуры и подборе оборудования технология ЦПС может быть эффективной и в распределительных сетях 6–35 кВ. Все вышеописанные цифровые системы оказались не дороже

своих «традиционных» аналогов, а при выполнении в рамках ЦПС нескольких функций (РЗА, АСУ ТП, ККЭ, РАС и т.д.) технология позволяет добиться существенного экономического эффекта. То есть внедряя, к примеру, цифровую систему АСУ ТП и регистрации аварийных событий, при грамотном подходе к оснащению первичного оборудования устройствами ПАС и ПДС и построению шины процесса, дальнейшее развитие системы сводится к добавлению алгоритмов обработки цифровых данных, представленных в шине процесса. Из этого следует, что при стоимости цифровых АСУ ТП и РАС, соизмеримой с стоимостью «классики», при правильном проектировании оборудования уровня шины процесса систему РЗА мы получаем по стоимости ПО (алгоритмов РЗА).

Во многом такой экономический эффект связан с тем, что каждый внедренный цифровой кластер построен на оборудовании одного вендера.

Процесс наладки цифровых систем не выявил серьезных

проблем с интеграцией оборудования в единую систему.

В процессе внедрения мы опасались за качество синхронизации устройств ПАС по протоколу РТР. Однако никаких проблем с синхронизацией выявлено не было.

Для контроля данного параметра во время наладки цифровых систем мы оценивали статистику РТР клиента устройства ПАС, при этом параметр Master to Client offset не превышал 1,5 мкс. А в журнале тревог не было зафиксировано фактов потери синхронизации времени устройствами ПАС и ПДС.

На момент написания статьи не было аварийных или ложных срабатываний цифровой РЗА, не было зарегистрировано потери пакетов SV и прочих сбоев в работе. Сейчас все системы работают в штатном режиме и мы продолжаем наблюдение.

Данная статья посвящена нашему опыту внедрения цифровых систем защиты и управления с применением МЭК 61850-9-2 и на сегодня можно зафиксировать, что внедрение прошло успешно.