

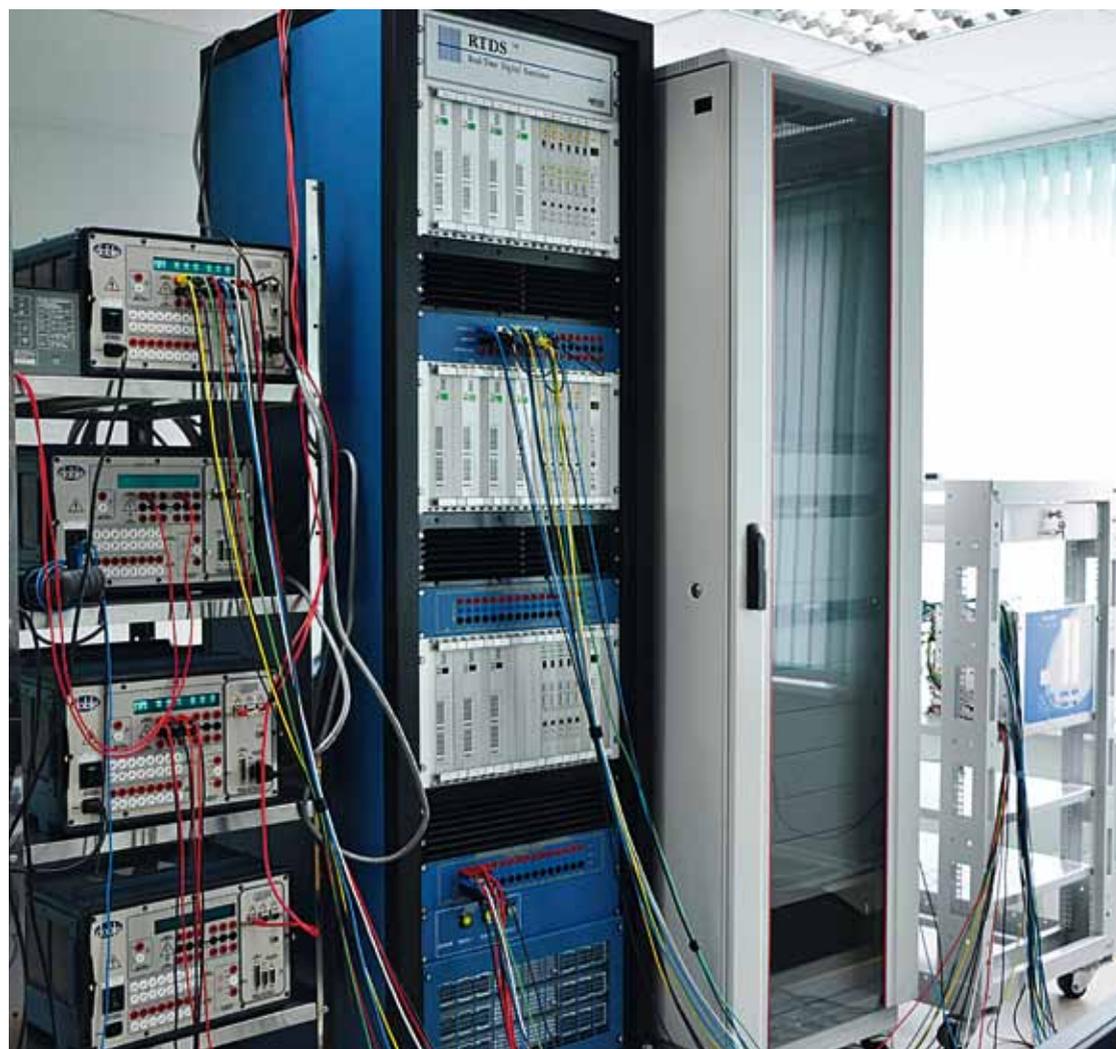
# ЦИФРОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ

АВТОРЫ:

МОРЖИН Ю. И.,  
Д. Т. Н.  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ПОПОВ С. Г.,  
К. Т. Н.  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

## КОНЦЕПЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ ВНЕДРЕНИЯ. СОЗДАНИЕ ОПЫТНОГО ПОЛИГОНА «ЦИФРОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ ЕНЭС»



Лабораторная часть  
опытного полигона  
«Цифровая подстанция»

**С**овременные аппаратные и программные средства управления электрическими подстанциями стали достаточно мощными и надежными, существенно увеличилось их быстродействие. Появились высоковольтные цифровые трансформаторы тока и напряжения; разрабатывается первичное и вторичное электросетевое оборудование со встроенными коммуникационными портами; производятся микропроцессорные контроллеры, оснащенные инструментальными средствами разработки, на базе которых возможно создание надежного программно-аппаратного комплекса подстанции. Все это создает предпосылки для создания подстанции принципиально нового поколения – цифровой подстанции (ЦПС), в которой организация всех потоков информации при решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме.

Единая энергетическая система России – сложный, непрерывно действующий механизм, стабильность работы которого является залогом надежного и качественно-энергоснабжения всех потребителей. Основной задачей ЕЭС является бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией. Электрические подстанции (ПС), входящие в эту систему, являются важным элементом структуры, обеспечивающим устойчивое безаварийное функционирование ЕЭС. Современная ПС – это многофункциональное технологическое предприятие, оснащенное большим набором разнофункционального оборудования. Для контроля и управления всем этим оборудованием требуется высококвалифицированный персонал, который, как хорошо известно, всегда в дефиците. Это одна из основных причин, почему проблема автоматизации технологических процессов ПС уже

давно является одной из основных в современной электроэнергетике. Со времени начала первых разработок различных автоматизированных систем управления технологическими процессами ПС (АСУ ТП) произошло существенное развитие аппаратных и программных средств систем управления и оборудования, применяемых на электрических подстанциях. Появились высоковольтные цифровые трансформаторы тока и напряжения; разрабатывается первичное и вторичное электросетевое оборудование со встроенными коммуникационными портами; производятся микропроцессорные контроллеры, оснащенные инструментальными средствами разработки, на базе которых возможно создание надежного программно-аппаратного комплекса ПС; принят международный стандарт МЭК 61850, регламентирующий представление данных о ПС как объекте автоматизации, а также протоколы цифрового обмена данными между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами ПС, включая устройства контроля и управления, релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), телемеханики, счетчики электроэнергии и т. д. Все это создает предпосылки для построения подстанции нового поколения – цифровой подстанции (ЦПС), в которой организация всех потоков информации при решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме. О работах, проводимых в этом направлении в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», пойдет речь в данной статье.

Как известно, для защиты первичного оборудования при возникновении аварийных режимов работы (например, в результате повреждений линии электропередачи или нарушений в работе генераторов электрической станции) на ПС задействована специальная аппаратура: релейная защита и противоав-

### ИНФОРМАЦИЯ

#### ЦИФРОВЫЕ СИГНАЛЫ

Переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления ПС позволит получить целый ряд преимуществ, в том числе:

- существенно сократить затраты на кабельные вторичные цепи и каналы их прокладки, приблизив источники цифровых сигналов к первичному оборудованию;
- повысить электромагнитную совместимость современного вторичного оборудования – микропроцессорных устройств и вторичных цепей благодаря переходу на оптические связи;
- упростить и, в конечном итоге, удешевить конструкцию микропроцессорных интеллектуальных электронных устройств за счет исключения трактов ввода аналоговых сигналов;
- унифицировать интерфейсы интеллектуальных электронных устройств, существенно упростить взаимозаменяемость этих устройств (в том числе замену устройств одного производителя на устройства другого производителя) и др.

ИНФОРМАЦИЯ

ЦЕЛИ СОЗДАНИЯ ЦПС

Непосредственными целями создания ЦПС являются:

- совершенствование мониторинга и управления электросетевым оборудованием ПС;
- повышение надежности работы и эффективности эксплуатации оборудования техники «вторичных цепей» подстанции путем развития и унификации основных информационно-технологических и управляющих систем (ИТС) ПС, в том числе: автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), релейной защиты и автоматики (РЗА), автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого и технического учета электроэнергии (АИИС КУЭ), связи и др.;
- переход к небслуживаемым подстанциям, т. е. к подстанциям без постоянного дежурства на них оперативного персонала, управляемым из удаленных центров управления (с помощью команд телеуправления).

рийная автоматика. Эти устройства должны быть подключены к особым измерительным устройствам – измерительным трансформаторам тока и напряжения. Причем для обеспечения надежной защиты этого оборудования – даже на небольших подстанциях – необходимо проложить значительное количество электрических кабелей, связывающих измерительные устройства с аппаратурой РЗА. Длина этих кабелей (их называют цепями вторичной коммутации), например, для подстанции 110 кВ исчисляется десятками километров, и чем выше номинальное напряжение подстанции, тем больше используется кабельной продукции.

При таких больших длинах электрических цепей, связывающих аппаратуру РЗА с измерительной аппаратурой, приходится применять ряд специальных мер для обеспечения точности измерений и защиты цепей от влияния электромагнитных помех. При этом появляется новая проблема: чем лучше защищена подстанция от аварийных ситуаций, тем выше ее стоимость и тем сложнее и дороже обслуживание (поиск неисправности при большом количестве вторичных цепей занимает большее время, тем самым электроснабжение потребителей нарушается на длительный период). Возникает вопрос: как разрешить эту проблему? Ответ более или менее очевиден: сокращение количества цепей вторичной коммутации и создание устройств, обеспечивающих более дешевыми способами сбор данных и передачу их системе РЗА. Однако для решения этой задачи необходимо изменить основные принципы измерения электрических величин и способов передачи информации. Необходимо также применять новые принципы организации связей измерительных устройств с аппаратурой РЗА. Все это привело к созданию технологии «Цифровая подстанция», которая

начала поэтапно внедряется в практику работы зарубежных и отечественных электрических сетей в последние 5–6 лет. **В чем ее суть? В настоящее время в электроэнергетике существует большое разнообразие точек зрения и подходов к тому, что понимать под термином «цифровая подстанция». Для успешной и эффективной автоматизации всех процессов передачи, преобразования и распределения электроэнергии в масштабах ЕЭС необходима общая концепция программного аппаратного комплекса цифровой подстанции.** На большинстве существующих электрических подстанций измерение электрических параметров осуществляется в соответствии с основными электромагнитными принципами: каждое измерительное устройство соединено с аппаратурой РЗА, а носителем информации является либо ток, либо напряжение. Это позволяет без особых потерь точности и надежности обслужить сравнительно небольшой комплекс аппаратуры РЗА. Переходом на другой принцип измерения (например, на основе оптических трансформаторов тока и напряжения) и иной метод передачи информации аппаратуре РЗА решаются указанные выше проблемы. Что касается последнего, то это метод, использующий так называемую шину процесса.

Что такое шина процесса? Сейчас, в XXI веке, трудно удивить кого-либо персональным компьютером, встроенным в вычислительную сеть. Стало обычной практикой построение домашней или офисной локальной вычислительной сети (ЛВС) из нескольких ПК. Такой же подход можно перенести и на подстанцию. Источниками информации для аппаратуры РЗА являются оптические трансформаторы тока (ТТ) и трансформаторы напряжения (ТН), которые обладают специальным электронным блоком преобразования. Последний позволяет

СТРУКТУРА СВЯЗЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ, ТЕРМИНАЛОВ РЗА И ПЕРВИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИИ

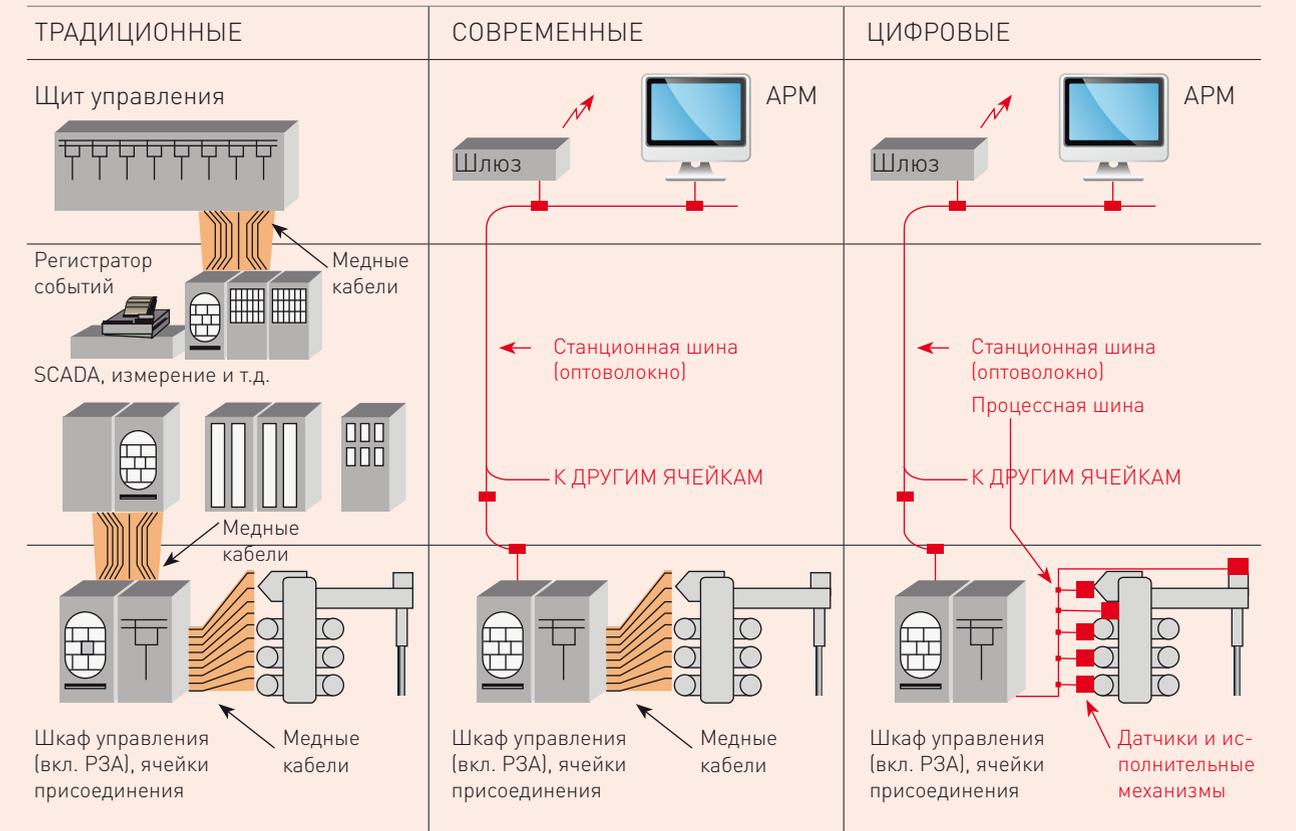


Рис. 1

встраивать ТТ и ТН в локальную вычислительную сеть как обычный ПК. В эту же сеть включаются устройства РЗА, также имеющие специальные устройства для связи с ЛВС. Все это называется шиной процесса.

Но это упрощенное изложение. Для того чтобы эти принципы были реализованы, надо решить еще целый ряд непростых задач: 1) разработать специальный протокол обмена данными устройствами между собой, причем обеспечивающий доставку нужной информации в заданное время (счет идет на милли- и микросекунды), 2) цифровые информационные потоки, попавшие

в аппаратуру РЗА, должны правильно расшифровывать полученные сообщения (поэтому устройства РЗА должны быть очень точно синхронизированы между собой и источником измерения). Решение этих задач (и ряда других) взяла на себя Международная электротехническая комиссия (МЭК, в английской транскрипции IEC), разработав стандарт МЭК 61850 (IEC 61850) Коммуникационные сети и системы подстанций. Именно внедрение этого стандарта в полном объеме и создает основу для создания технологии «Цифровая подстанция». Стандарт МЭК 61850 Коммуникационные сети и системы подстанций состоит

из 19 частей и охватывает вопросы проектирования систем автоматизации на подстанции, конфигурирования устройств, правила организации информационных потоков между цифровыми терминалами и первичным оборудованием, требования к устройствам при проведении испытаний цифровых терминалов на соответствие стандарту.

Разработка и внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанции (АСУ ТП ПС) в отечественной электроэнергетике имеет давнюю историю. Следует подчеркнуть, что в нашей стране накоплен значи-

тельный опыт создания интегрированных АСУ ТП подстанций ЕНЭС. На рис. 1 представлены основные этапы автоматизации подстанций в России. Показана традиционная схема управления со щита и сбора информации средствами телемеханики и регистрации аварийных событий. Необходимо отметить, что в настоящее время микропроцессорные терминалы (МП-терминалы) РЗА и противоаварийная автоматика (ПА) разрабатываются только на основе требований выполнения заданных функций по защите электротехнического оборудования при заданном уровне надежности. Следует подчеркнуть, что в стандартной системе АСУ ТП блок РЗА рассматривался обычно как система, слабо связанная с другими подсистемами АСУ. Причем каждый МП-терминал должен обеспечивать выполнение своих функций как при возникновении аварийных режимов работы оборудования подстанции, так и в результате каких-либо нарушений режимов работы прилегающей электрической сети и/или всей энергосистемы. При таком подходе для каждого МП-терминала необходим свой собственный источник входной информации (от измерительных ТТ и ТН, дискретных сигналов о состоянии коммутационных аппаратов, о срабатывании других МП-терминалов, команд от ПА и т. д.). Другими словами, необходимо связать все МП-устройства между собой цепями вторичной коммутации (где используется дорогой медный или алюминиевый контрольный кабель, в последние годы они стали заменяться волоконно-оптическим кабелем). Кроме этого, каждый МП-терминал должен дополнительно иметь аналого-цифровой преобразователь для обработки аналогового сигнала, поступающего от измерительного оборудования.

На рис. 2 представлена структурная схема, иллюстрирующая связи

МП-терминалов РЗА. Сравниваются современные подстанции с подстанциями, выполненными по технологии «Цифровая подстанция».

Стандарты МЭК 61850 (IEC 61850) регламентируют представление ПС как объект автоматизации и стандартизируют структуру информационных моделей и протоколы обмена данными между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) (включая устройства контроля и управления, РЗА, ПА, телемеханики, связи, учета электроэнергии и т. д.). Принятие ряда этих стандартов позволило приступить к построению подстанций нового поколения – цифровой подстанции (ЦПС). Основная особенность последней состоит в том, что обмен данными между всеми компонентами ПС осуществляется в цифровом формате. Как можно видеть на рис. 1, в случае ЦПС не требуются прямые соединения между ИЭУ и цепями ВК, коммутация между ними осуществляется через информационную шину. Более подробно о них будет сказано ниже.

Обсудим теперь, с чего же следует начинать разработку технологии «Цифровая подстанция»? Базовый инструмент в виде стандартов МЭК уже есть. Но достаточно ли этого для полного создания технологии? На все ли вопросы, которые необходимо решить при создании новой технологии, отвечает стандарт в части требований к первичному оборудованию? А то, что касается создания компонент программно-аппаратного комплекса «Цифровая подстанция»? А в части требований по надежности функционирования подстанции, безопасности персонала и кибербезопасности?

Строго говоря, стандарты описывают, какой должна быть технология ЦПС. Но каким образом она долж-

на быть реализована, стандарты оставляют эти вопросы исполнителям. И именно поэтому для четкого понимания того, каким образом должна быть реализована эта новая технология, и была разработана Концепция создания ЦПС, речь о которой и пойдет ниже.

В течение 2010–2011 гг. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», ОАО «Институт «Энергосетьпроект» и ЗАО «Континуум» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» совместно разработали Концепцию программно-аппаратного комплекса (ПАК) «Цифровая подстанция ЕНЭС». Тогда же были начаты работы в рамках пилотного проекта – создание опытного полигона для отработки и испытаний элементов и подсистем цифровой подстанции. Полигон также должен обеспечить возможность определения оптимальных технических решений по управлению технологическими процессами ЦПС.

## КОНЦЕПЦИЯ ПРОГРАММНО – АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ЦПС. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Разрабатывая основную концепцию программно-аппаратного комплекса (ПАК) ЦПС, мы исходили из того, что в первую очередь нужно определить основные пути развития систем автоматизации современных подстанций ЕНЭС до уровня цифровых, этапы и приоритеты работ по таким направлениям, как: 1) НИР и НИОКР; 2) методология применения стандарта МЭК 61850; 3) разработка научно-технической документации

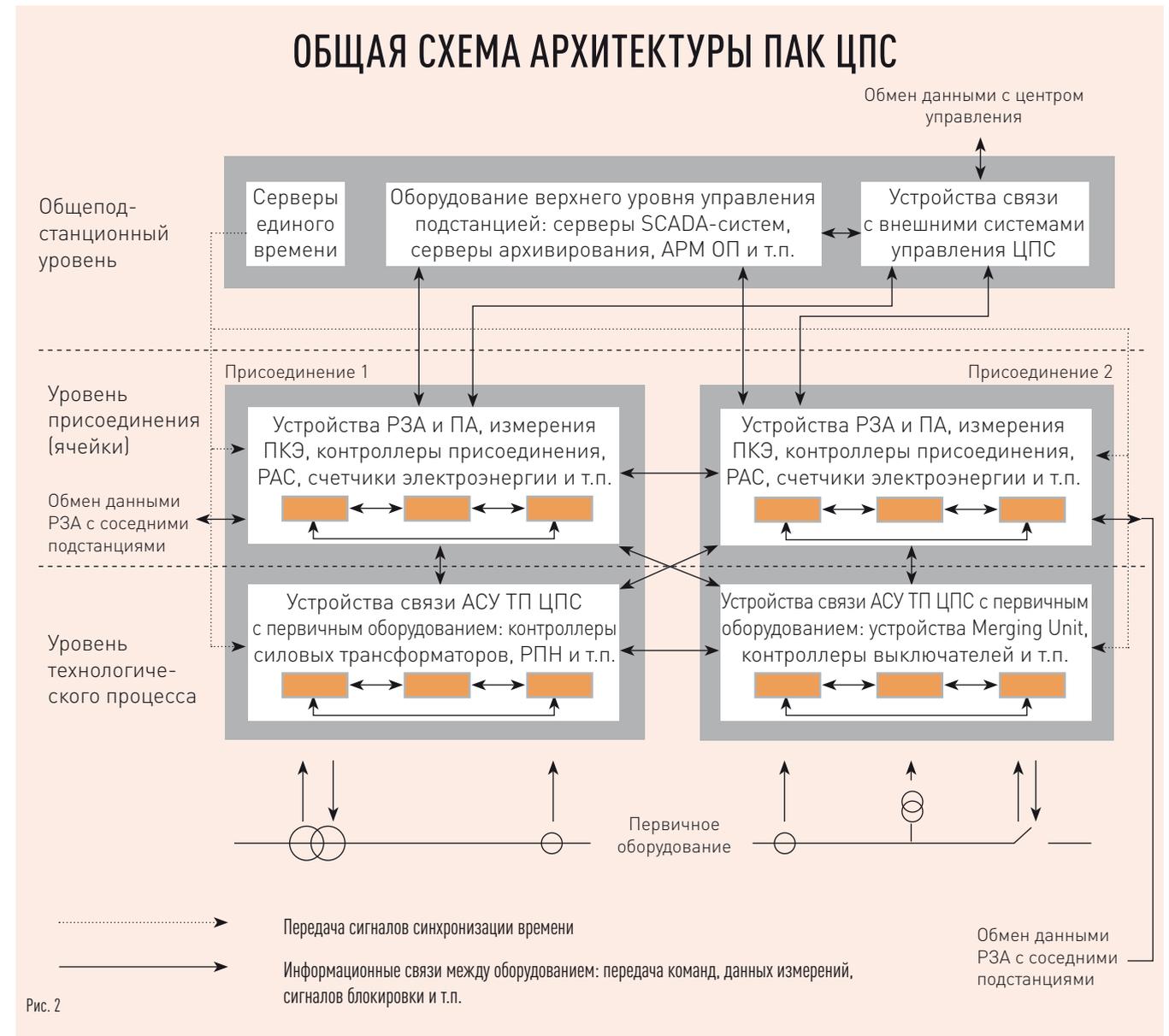


Рис. 2

(НТД); 4) разработка методологии проектирования и создания САПР; 5) сертификация и аттестация; 6) испытания ПАК и его компонент (опытный полигон «Цифровая подстанция»); 7) подготовка и обучение персонала; 8) пилотные проекты (разработка требований к задачам «пилота»). Далее необходимо сформулировать базисные положения технических требований к ПАК ЦПС в целом и его отдельным компонентам. И наконец, сформулировать проблемные вопросы, возникающие в процессе

внедрения технологии «Цифровая подстанция».

Концепция анализирует проблемы, связанные с построением ЦПС как новых объектов энергосистемы, соответствующих современным тенденциям развития российской и мировой электроэнергетики. В Концепции вводятся основные определения и рассматриваются вопросы, связанные с особенностями, техническими требованиями и структурами программно-

аппаратных комплексов таких объектов. Концепция ориентирована на электрические подстанции ЕЭС с высшим напряжением 220–750 кВ переменного тока, при создании или комплексной реконструкции которых предполагается внедрение современных ПАК. Однако многие положения Концепции могут быть использованы и на ПС более низкого напряжения.

Как известно, термин «цифровая подстанция» трактуется различным

ИНФОРМАЦИЯ

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬ- НАЯ ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С АКТИВНО- АДАПТИВНОЙ СЕТЬЮ (ИЭС ААС)

ИЭС ААС представляет собой электроэнергетическую систему нового поколения, основанную на мультиагентном принципе организации и управления ее функционированием и развитием с целью обеспечения эффективного использования всех ресурсов (природных, социально-производственных и человеческих) для надежного, качественного и эффективного энергоснабжения потребителей за счет гибкого взаимодействия всех ее субъектов (всех видов генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной иерархической системы управления. В ИЭС ААС важная роль отводится активно-адаптивной электрической сети как технологической инфраструктуре электроэнергетики, разделяющей интеллектуальную энергосистему принципиально новыми свойствами.

образом в зависимости от текущего уровня развития продвигаемых решений. В нашей Концепции используется следующее определение ЦПС: **цифровая подстанция (ЦПС)** – это подстанция с высоким уровнем автоматизации управления, в которой все процессы информационного обмена между элементами ПС, обмена с внешними системами, а также управления работой ПС осуществляются в цифровом виде в соответствии с протоколами МЭК. Разработка ПАК ЦПС трактуется в Концепции как развитие основных информационно-технологических (ИТ) и управляющих систем (УС) современных подстанций ЭЭС. Такое развитие подстанций является элементом более общей проблемы – создания принципиально нового уровня функционирования ЭЭС России и ее электрических сетей за счет построения интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС).

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЦПС

Основными направлениями для достижения указанных выше целей Концепция считает переход к передаче аналоговых сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления ПС. Это дает целый ряд преимуществ, а именно:

- существенно сократятся затраты на кабельную продукцию цепей вторичной коммутации и каналы их прокладки;
- источники цифровых сигналов приблизятся к первичному оборудованию;
- повысится помехозащищенность вторичных цепей благодаря переходу на оптоволоконную коммуникационную среду;

- унифицируются интерфейсы устройств ИЭУ, существенно упростится взаимозаменяемость этих устройств (в том числе замена устройств одного производителя на устройства другого производителя);
- унифицируются процессы проектирования, внедрения и эксплуатации подстанции и др.

## АРХИТЕКТУРА ПАК ЦПС – ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Архитектура ПАК ЦПС строится на иерархическом принципе, при этом в соответствии с МЭК 61850–5 выделяются три основных уровня:

- 1) уровень технологического процесса;
- 2) уровень присоединения (ячейки);
- 3) общеподстанционный уровень.

Обычно принято указанные уровни называть нижним, средним и верхним соответственно. Структура уровней ПАК ЦПС показана на рис. 2.

## БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦПС

Построение ПАК ЦПС базируется на четырех основных принципах: надежность, безопасность, единство измерений, унификация.

**Надежность.** Этот принцип подразумевает в первую очередь гарантированное время передачи сигналов (команды аварийного отключения, команды управления, сигналы блокировки, данные из-

ИНФОРМАЦИЯ

## МЭК 61850 СТАНДАРТ «КОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ ПОДСТАНЦИЙ»

Стандарт МЭК 61850 «Коммуникационные сети и системы подстанций» состоит из 19 частей и охватывает вопросы проектирования, систем автоматизации на подстанции, конфигурирования устройств, правила организации информационных потоков между цифровыми терминалами и первичным оборудованием, требования к устройствам при проведении испытаний цифровых терминалов на соответствие стандарту.

Стандарты МЭК 61850 (IEC 61850) регламентируют представление ПС как объект автоматизации и стандартизируют структуру информационных моделей и протоколы обмена данными между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) (включая устройства контроля и управления, релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), телемеханики, связи, учета электроэнергии и т. д.).

мерений, сигналы синхронизации времени и т. п.) между источником и получателем в пределах подстанции. Это время должно быть строго регламентировано в соответствии с МЭК 61850–5.

Кроме того, надежность подразумевает также наличие **функционального резервирования**. В рамках ЦПС при построении основных функциональных подсистем, определяющих общую живучесть и надежность ПАК в целом, должно применяться резервирование.

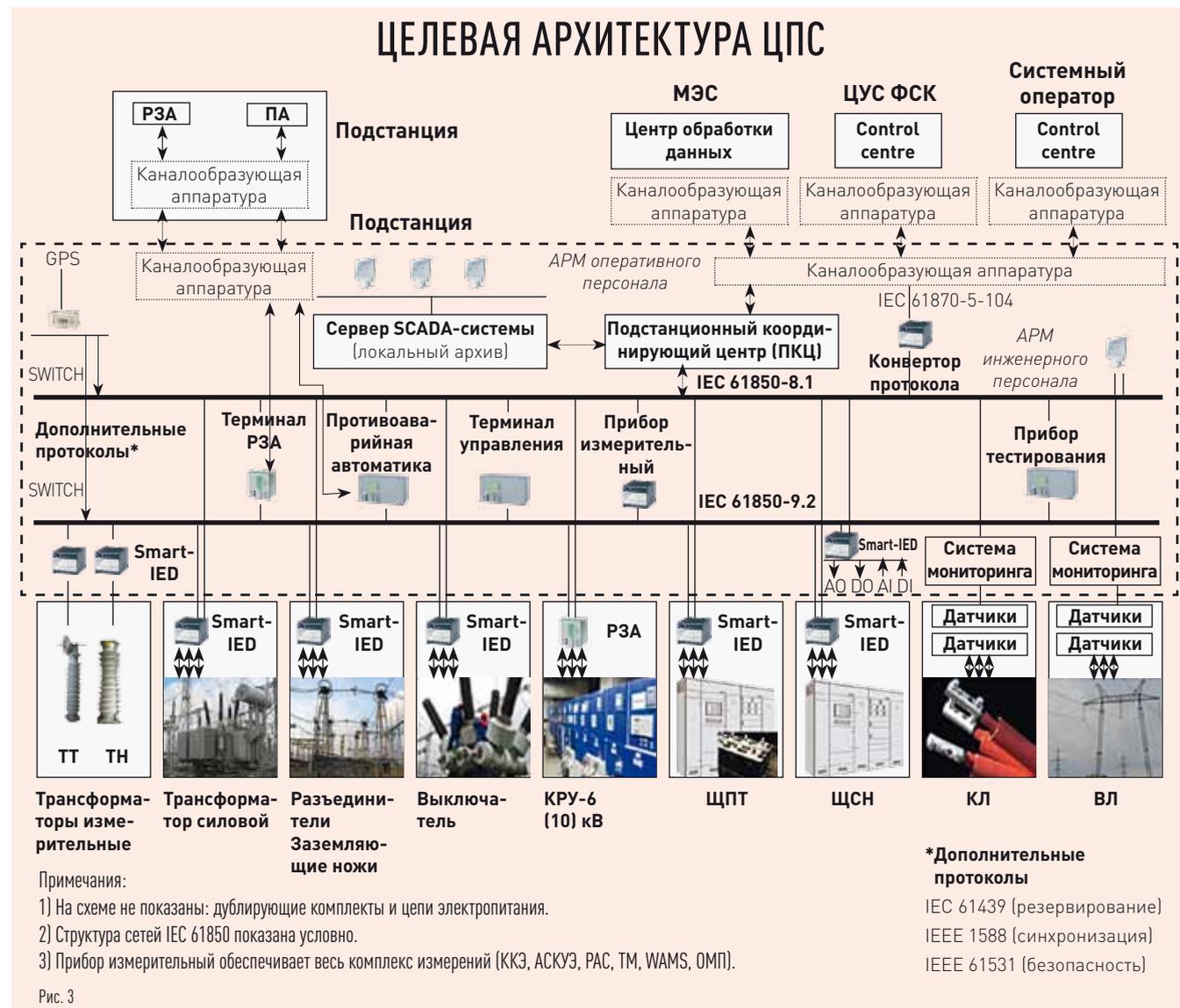
**Самодиагностика коммуникационной среды также является частью надежности.** Любой элемент коммуникационной среды (цифровые коммутаторы, волоконно-оптические кабели) на подстанции должен быть диагностируем. Диагностика информационных коммуникаций обеспечивается как минимум на канальном уровне сети Ethernet (использование сетей Ethernet является необходимой частью реализации другого основного принципа построения ЦПС – унификации аппаратной платформы).

**Безопасность.** Требование безопасности базируется на двух принципах: **электромагнитной безопасности** и информационной безопасности. Принцип электромагнитной безопасности включает в себя требование обеспечения на подстанции электробезопасности персонала и подразумевает электромагнитную совместимость вторичного оборудования. Кроме того, должна соблюдаться **информационная безопасность**. Последнее означает, что в ЦПС должно быть обеспечено безопасное выполнение всех основных технологических операций, в том числе функций защиты, противоаварийной автоматики, автоматического и оперативного управления при наличии возможных угроз безопасности, таких как, например:

- несанкционированный доступ к выполнению технологических операций на подстанции лицам, не имеющим права на выполнение указанных операций;
- ошибки персонала, наступившие вследствие нарушения правил выполнения оперативных переключений;
- различные информационные воздействия, имеющие целью нарушение нормального режима работы подстанции (в том числе вредоносное ПО, кибератаки) и др.

**Принципы обеспечения единства измерений.** В первую очередь это единство точек измерения. Количество датчиков (первичных измерительных преобразователей), применяемых в измерительных комплексах на подстанции (точках измерения), должно быть сведено к минимуму. Естественно, указанный минимум должен выбираться с учетом достижения требуемой надежности системы измерений для всех функциональных подсистем (РЗА, ПА, измерение, управление, учет электроэнергии и др.).

Затем синхронность операций и измерений. Все операции на подстанции (в том числе критические с точки зрения влияния на основные технологические функции подстанции), а также все измерения должны выполняться с привязкой к единому времени подстанции. Ведение единого времени в пределах подстанции должно обеспечиваться в соответствии с требованиями МЭК 61850–5. Выполнение всех технологических операций, события, происходящие на подстанции, должны фиксироваться в специальном журнале событий. Точность фиксации времени – в соответствии с требованиями МЭК 61850–5.



**Унификация.** Этот принцип подразумевает унификацию конфигурирования, унификацию протоколов и унификацию описания функций. В ЦПС должны использоваться унифицированные механизмы конфигурирования оборудования (устройств ИЭУ). Унификация механизмов конфигурирования должна обеспечиваться на базе применения языка SCL (определенного стандартом МЭК 61850-6). Процесс конфигурирования устройств ИЭУ желательно осуществлять с применением компонентов программного обеспечения, обеспечивающих

конфигурирование ПАК подстанции как единого согласованного набора устройств ИЭУ (system configuration tool) и независимых от типов (марок, производителей) устройств ИЭУ, применяемых в ЦПС.

**Унификация протоколов.** Передача быстрых сообщений (команд аварийного отключения, сигналов блокировки высоковольтных коммутационных аппаратов и т. п. – сообщений с допустимым временем доставки) должна осуществляться на базе протокола МЭК 61850-8.1. Передача данных измерений

мгновенных значений тока/напряжения от точек первичного измерения до устройств ИЭД нижнего уровня управления ЦПС должна осуществляться по протоколу МЭК 61850-9.2 или по протоколу МЭК 61850-9.2LE. Синхронизация календарного времени в оборудовании ЦПС следует осуществлять с применением протокола SNTP (RFC 2030). Инструментальная синхронизация в оборудовании ЦПС должна осуществляться по протоколу РТР (IEEE 1588). В обоснованных случаях допускается инструментальная синхронизация в оборудовании ЦПС

### «ДОРОЖНАЯ КАРТА» – ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «ЦИФРОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ»

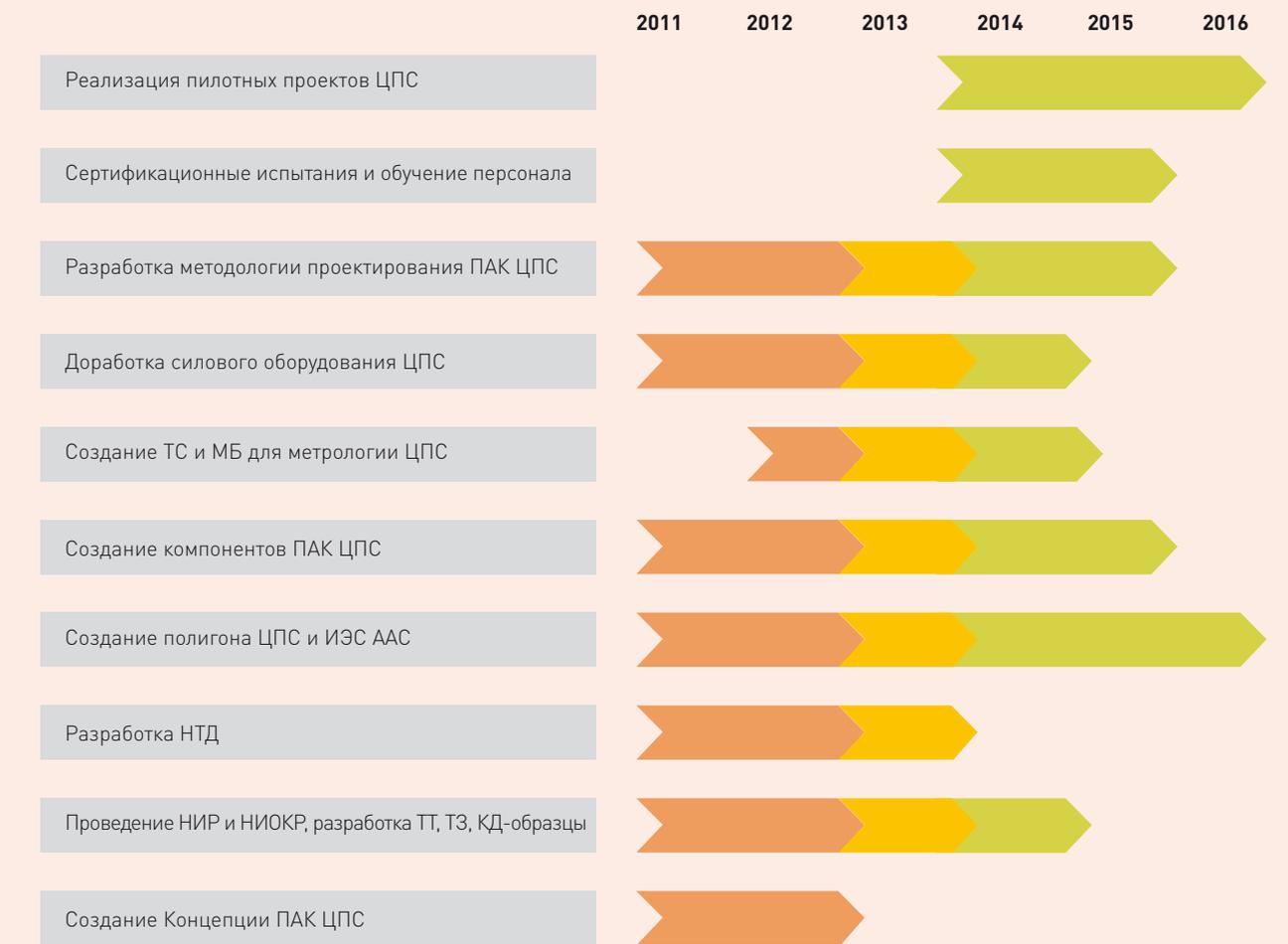


Рис. 4

на основе следующих механизмов передачи сигналов синхронизации: 1) 1PPS в соответствии с МЭК 60044-8; 2) IRIG-B.

**Унификация описания функций.** Каждая из функций ПАК ЦПС (защита, автоматика, управление и т. п.) должна быть описана набором логических узлов, соответствующих стандарту МЭК 61850-7-4.

На рис. 3 показана целевая архитектура ЦПС, которая реализует все вышеперечисленные принципы.

### СТАТУС И УРОВЕНЬ ДЕТАЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЙ КОНЦЕПЦИИ

Поскольку речь идет о новом, еще недостаточно освоенном в мировой электроэнергетике объекте, то разработке конкретных технических требований и решений должен предшествовать ряд специальных НИР и НИОКР, которые детально и всесторонне проанализируют все про-

блемы, возникающие при построении ПАК ЦПС в целом и его отдельных компонентов. Прежде всего это относится к вопросам использования механизмов коммуникаций на основе протоколов МЭК 61850 (таким как использование Ethernet, шины станции и шины процесса на базе протоколов 61850-8.1 и 61850-9.2 и др.), которые обеспечивают информационное взаимодействие между МП-терминалами РЗА и ПА, что требует качественно иного уровня проработанности принимаемых технических решений.

ИНФОРМАЦИЯ

## ЯЗЫК КОНФИГУРИРОВАНИЯ SCL

Основан на языке разметки XML и предназначен для создания конфигурационных файлов устройств. Различают следующие виды SCL-файлов: ICD – файл описания возможностей устройства; SSD – файл описания спецификации подстанции; SCD – файл описания конфигурации подстанции; CID – файл описания конфигурации устройства.

В Концепцию включена программа работ по реализации ЦПС, в которой в качестве обязательных этапов предусматривается проведение специальных исследований, создание полигона и организация различных полигонных испытаний, а также опытное внедрение и опытная эксплуатация элементов ЦПС на ряде пилотных ПС.

## ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «ЦИФРОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ»

Технология – это набор компонент, связанных в единый бизнес-процесс. Концепция любой новой технологии прежде всего должна содержать четкое представление о том, для чего она создается, на чем она базируется и какие цели она достигает. Наш подход подразумевает следующие этапы разработки и внедрения.

**1 этап.** Разработка Концепции. Цели данного этапа: а) определить основные пути развития систем автома-

тизации современных подстанций ЕНЭС до уровня цифровых, этапы и приоритеты работ по направлениям; б) сформулировать основные базисные положения технических требований к ПАК ЦПС в целом и его отдельным компонентам; в) сформулировать проблемные вопросы, возникающие при внедрении технологии «Цифровая подстанция».

**2 этап.** Разработка технических требований к первичному и вторичному оборудованию ЦПС, обеспечивающему взаимодействие посредством цифровых информационных потоков. Разработка требований к метрологическому обеспечению оборудования ЦПС и к коммуникационной среде ЦПС (с учетом взаимодействия с системой единого времени (СОЕВ) ПС). Разработка технических требований к архитектуре ПАК ЦПС (уровень технологического процесса, уровень присоединений, верхний уровень ПС и взаимодействие с верхними уровнями управления сетями – ЦУС, ДЦ СО). Разработка технических требований к информационно-технологическим системам ЦПС и к АСУ ТП ЦПС (SCADA, технологические АРМ подсистем АСУ ТП).

**3 этап.** Создание опытного полигона «Цифровая подстанция» (включающего действующее электрооборудование ЦПС, тестово-моделирующие и испытательные программно-технические комплексы).

**4 этап.** Проведение НИОКР по изготовлению опытных образцов оборудования, НИР по разработке технических решений (ТР) для применения на ЦПС.

**5 этап.** Полигонные испытания оборудования и ТР по разработанным методикам, базирующимся на положениях главы 10 стандарта МЭК 61850.

**6 этап.** Разработка НТД, базирующихся на методологии применения

стандарта МЭК 61850, необходимых для создания и эксплуатации ЦПС.

**7 этап.** Сертификация и аттестация первичного оборудования и ПАК ЦПС.

**8 этап.** Обучение эксплуатационного персонала для работы на ЦПС.

**9 этап.** Формулировка требований к задачам пилотных проектов.

**10 этап.** Разработка пилотных проектов.

**11 этап.** Внедрение пилотных проектов на подстанциях ЕНЭС.

**12 этап.** Анализ и обобщение результатов пилотного внедрения. Коррекция ТР, НТД, методик тестирования и испытаний первичного оборудования и ПАК ЦПС, проектных решений.

**13 этап.** Разработка методологии проектирования ЦПС. Создание САПР, обеспечивающей интеграцию с языком описания конфигурации терминалов (SCL – МЭК 61850-6).

«Дорожная карта» (рис. 4) иллюстрирует перечисленные выше этапы и направления работ по внедрению технологии «Цифровая подстанция».

## СОЗДАНИЕ ОПЫТНОГО ПОЛИГОНА «ЦИФРОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ»

Как известно, ОАО «ФСК ЕЭС» приступило к реализации программы НИОКР на 2010–2014 гг., утвержденной правлением ОАО «ФСК ЕЭС» в 2010 г. Работы по созданию опытного полигона «Цифровая подстанция» в указанной программе находятся среди первоочередных. Выполнение этих работ поручено ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», которое должно



Рис. 5  
ПС 301: колонны ОПТТ и ТН  
и элегазовый  
выключатель ВГТ

сформировать и ввести в эксплуатацию опытный полигон «Цифровая подстанция», создать прототипы цифровых устройств вторичной коммутации, работающих на новых принципах, и провести испытания подстанционного программно-аппаратного комплекса. Работы по созданию опытного полигона начались в сентябре 2010 года.

Структура создаваемого опытного полигона «Цифровая подстанция» включает в себя следующие элементы:

1) ПС № 301 напряжением 110/10 кВ – это действующая электроустановка, имеющая специализированный двухобмоточный трансформатор, состоящий из трехфазной группы по 40 МВА, вторая обмотка переключаемая, позволяющая получать 10, 20, 35, 90 кВ. Подстанция обеспечивает электроэнергией

испытательные стенды «ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», на которых проводятся испытания новейшего электротехнического оборудования для электросетевого комплекса ОАО «ФСК ЕЭС»: устройства компенсации реактивной мощности (СТАТКОМ), сверхпроводящие кабели высокого напряжения, силовая электроника и др.;

2) на ОРУ 110 кВ подстанции предполагается установить две группы оптических измерительных трансформаторов тока и напряжения;

3) в Центре управления цифровой подстанцией (ЦУПС) будут созданы цифровой информационно-измерительный комплекс (ЦИИК), состоящий из 4 интеллектуальных электронных устройств, информационный вычислительный комплекс на базе SCADA «КОТМИ-2010», будут также установлены цифровая за-

щита трансформатора и контроллер управления выключателем 110 кВ;

4) лабораторная часть полигона «Цифровая подстанция» (формируется в настоящее время) должна быть оснащена тестово-моделирующим комплексом, в состав которого войдут комплекс, моделирующий работу энергосистемы в реальном масштабе времени RTDS, испытательный комплекс OMICRON с программными имитаторами цифровых терминалов и имитаторами цифровых информационных потоков данных для прогрузки шин процесса и станционной шины при штормовых и других видах испытаний. Коммуникационные среды ЦУПС ПС № 301 и лабораторную часть полигона планируется в будущем объединить высокоскоростным волоконно-оптическим каналом связи.

Рис. 6  
Оборудование ЦУПС:  
шкафы РЗА и ЦИИКТ



Работы по созданию опытного полигона «Цифровая подстанция» на всех этапах проводятся совместно с ЗАО ИТЦ «Континуум», ООО «ПроЛайн», ООО «Континуум-Сети», ОАО «Институт «Энергосетьпроект», ЗАО «Децима».

Разработка опытного полигона «Цифровая подстанция» осуществлялась поэтапно. **Первый этап** по созданию опытного полигона был завершен 22.12.2010 года. На этом этапе были выполнены следующие работы:

- разработана рабочая документация привязки ОТТН к первичному оборудованию 110 кВ ОРУ ПС № 301;
- выполнен монтаж ОТТН в технических фазах

- на специальных конструкциях первой группы; проложен оптоволоконный кабель от ОРУ в Центре управления цифровой подстанцией;
- установлено устройство синхронизации времени GPS/ГЛОНАСС, организован сервер точного времени, обеспечивающий синхронизацию всех терминалов цифрового информационно-измерительного комплекса (ЦИИКТ);
- в Центре управления цифровой подстанцией смонтированы шкафы ЦИИКТ, включающие следующие терминалы:
  - мультиметр (измеряет пофазные мгновенные

и действующие значения тока, напряжения, активную и реактивную мощность и энергию, качество электроэнергии);

- регистратор цифровых данных измерений тока и напряжений (активная и реактивная мощности, коэффициент мощности);
- оптоэлектронные преобразователи с усилителями тока и напряжения, на выходе которых формируется цифровой поток данных, поступающих на шину процесса;

- терминалы шкафов ЦИИКТ подключены к станционной шине и шине процесса;
- создан информационно-вычислительный комплекс, который предусма-

## ИНФОРМАЦИЯ

### ПРОТОКОЛ GOOSE

Протокол GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) осуществляет передачу данных по технологии «издатель-подписчик» без подтверждения приема данных. Обеспечение гарантии доставки сообщений в данном протоколе осуществляется путем многократного повторения передаваемого сообщения с минимальной выдержкой времени (микросекунды).

Протокол SV, так же как и GOOSE, является протоколом типа «издатель-подписчик». Данные по протоколу SV передаются постоянным потоком так, что устройство-подписчик может обнаружить повреждение канала связи по отсутствию данных.

Скорость передачи данных по информационной сети цифровой подстанции, наряду с надежностью, является важнейшим параметром. Время доставки данных для важных сигналов (например, пуск или срабатывание защиты, команда отключения выключателя и т.п.) будет определять суммарное время ликвидации ненормальных режимов и должно быть минимизировано.

трирует сбор данных от цифровых терминалов, отображение информации оперативному персоналу, выдачу управляющих воздействий на первичное оборудование подстанции. В качестве SCADA-системы для ИВК применен программный комплекс «КОТМИ-2010», обеспечивающий решение задач в реальном масштабе времени.

На **втором этапе** создания опытного полигона «Цифровая подстанция», который завершился в декабре 2011 года, были выполнены следующие работы (рис. 5):

- на ОРУ заменен масляный выключатель 110 кВ МКП-110-600 на элегазовый выключатель ВГТ-110 П-40/2500 УХЛ1;
- заменены кабельные трассы цепей вторичной коммутации (управление выключателем и сигнализацией состояния привода выключателя и элегаза);
- завершен монтаж второй группы ОТТН на ОРУ, выполнено подключение к оптоэлектронным преобразователям в Центре управления цифровой подстанцией.

Кроме того, на ПС № 301 установлено оборудование вторичной коммутации, работающее в стандарте МЭК 61850:

- шкаф цифровой защиты двухобмоточного трансформатора 110/10 кВ и контроллер управления присоединением (выключателем 110 кВ);
- шкаф резервной защиты трансформатора, включа-

ющий защиту «ошиновки» 110 кВ. В качестве источника данных комплексов РЗА использовались цифровые терминалы релейной защиты и автоматики (рис. 6), разработанные международным концерном АББ (RET-670 и REC-670) и американской корпорацией Schweitzer Engineering Laboratories Inc. (SEL-421). Эти терминалы используют в качестве входных сигналов токов и напряжений цифровые информационные потоки, соответствующие стандарту МЭК 61850-9.2 и обменивающиеся между собой высокоприоритетными GOOSE-сообщениями.

Также был развернут испытательный комплекс на базе аппаратуры OMICRON для проверки релейной защиты и противоаварийной автоматики, поддерживающей стандарт МЭК 61850, в части выдачи цифровых потоков на шину процесса (часть 9.2LE) и быстрых дискретных сообщений (GOOSE). На ОРУ 110 кВ смонтированы полевые преобразователи измерительных трансформаторов тока и напряжения (Merging Unit –MU), два комплекта на стороне 110 и 10 кВ, которые были подключены к коммуникациям сети ЦУПС по протоколам МЭК 61850 (8.1 и 9.2LE).

После успешного проведения комплексных испытаний программно-аппаратного комплекса ЦПС была принята в опытную эксплуатацию.

На рис. 7 представлена архитектура ПАК и его связи с первичным оборудованием цифровой подстанции.

Параллельно с работами на опытном полигоне ПС № 301 велись работы

## ОПЫТНЫЙ ПОЛИГОН ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СТРУКТУРА СВЯЗЕЙ ПАК ЦПС С ПЕРВИЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

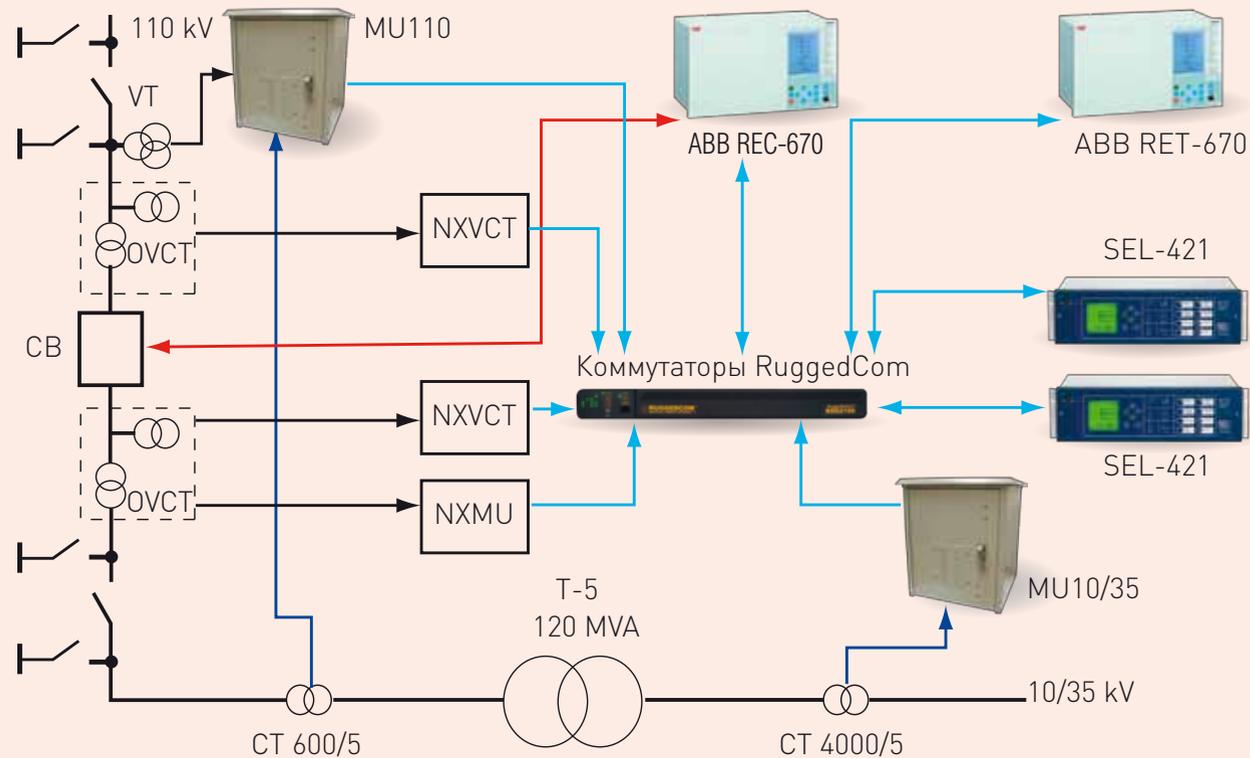


Рис. 7

по разработке технической документации и по применению технологии «Цифровая подстанция» в части аппаратуры вторичной коммутации и силового оборудования. В ОАО «ФСК ЕЭС» переданы следующие документы: а) Технические требования к аппаратным и программным средствам информационно-технологических и управляющих подсистем ЦПС; б) Технические требования к основному электротехническому оборудованию ЦПС.

В первом полугодии 2011 года был завершён очередной этап НИОКР по созданию полигона «Цифровая подстанция». На этом этапе разработаны технические

требования на вновь разрабатываемые компоненты макета программно-аппаратного комплекса (ПАК) и тестово-моделирующего комплекса (ТМК), а также проектная спецификация на покупные изделия. Здесь речь идет о тех элементах оборудования вторичной коммутации, которые обеспечивают выполнение требований стандарта МЭК 61850 в части организации цифровых информационных потоков по шине процесса, также сопряжение с существующим измерительным оборудованием (ТТ и ТН) и исполнительными механизмами коммутационных аппаратов. Для решения данных задач предусмотрена разработка так называемых полевых

контроллеров, которые должны быть установлены на полигоне.

Для создания современного ТМК, позволяющего получать полноценную модель сложной энергосистемы (включая модели подстанций сверхвысокого напряжения), необходимо ориентироваться на мощные мультимедийные комплексы, имеющие внутренние информационные шины не менее 1 Гб, поддерживающие стандарт МЭК 61850 в части «шины процесса» и обеспечивающие потоки быстрых сообщений (GOOSE). Таким комплексом является Real Time Digital Power System Simulation (RTDS), который производится одноименной фирмой в Канаде (г. Винни-

пег) и применяется в десятках стран по всему миру. RTDS сконструирован специально для того, чтобы имитировать режимы работ электрических систем и проводить испытания оборудования вторичной коммутации, предназначенного для управления и защиты. Многочисленные аналоговые и цифровые каналы входных и выходных сигналов с оптической изоляцией и высокой точностью обеспечивают возможность разнообразных соединений испытываемого оборудования с имитатором.

Следует отметить, что опытный полигон «Цифровая подстанция» уже на данной стадии его создания выполняет роль «инновационного локомотива» в электросетевом комплексе. На полигоне уже побывали и ознакомились с техническими решениями по технологии «Цифровая подстанция» представители организаций – разработчиков микропроцессорных средств РЗА и ПА, эксплуатационных организаций, таких как ОАО «МРСК Центра», МЭС Центра – филиала ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «РЖД» и др.

На опытном полигоне «Цифровая подстанция» ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» проведены первые комплексные испытания по согласованной с ОАО «ФСК ЕЭС» программе: испытания оборудования вторичной коммутации, разработанного в соответствии со стандартом МЭК 61850. Цель испытаний – проверка совместимости оборудования различных производителей, предназначенного для ПС «Эльгауголь» электросетевого кластера ОЭС Востока, где запланировано создание АСУ ТП ПС по технологии «Цифровая подстанция».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая Концепция ПАК «Цифровая подстанция» в июне 2012 года была представлена на совместном заседании НТС ОАО «ФСК

ЕЭС» и РАН, где она была одобрена и рекомендована в качестве стандартной. Было отмечено: в России впервые создана действующая цифровая подстанция, реализующая шину процесса и шину станции, что соответствует стандарту МЭК 61850. Основными задачами полигона являются проведение аттестационных работ нового оборудования РЗА и устройств сопряжения с первичным оборудованием (Merging Unit). В настоящее время опытный полигон «Цифровая подстанция» начал играть роль «инновационного локомотива» в отечественном электросетевом комплексе и де-факто стал отраслевой площадкой для проведения испытаний оборудования вторичной коммутации, выполняемой на базе стандарта МЭК 61850. Подчеркнем, что постоянно поступает множество заявок на проведение испытаний на базе полигона от разработчиков современной техники. Ввод в эксплуатацию тестово-моделирующего комплекса реального времени (RTDS) ОП ЦПС ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» создает уникальные условия для проведения наукоемких НИР по интеграции ЦПС в интеллектуальную энергосистему с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС).

В ближайшее время будут возвращены работы по определению оптимальных структур шины (шин) процесса и коммуникационной среды ЦПС, а также компоновки ИЭУ (в пределах релейного щита оперативного пункта управления ПС). Разработка научно-технической документации для обеспечения задач проектирования, пусконаладочных работ и эксплуатации нового оборудования, а также обучение специалистов отрасли новой технологии управления подстанциями должны выполняться в комплексе с другими задачами, являющимися составной частью технологии «Цифровая подстанция» (см. «Дорожную карту», рис. 4).

## ИНФОРМАЦИЯ

### ОПЫТНЫЙ ПОЛИГОН ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Опытный полигон «Цифровая подстанция» состоит из двух крупных компонентов: подстанционной части с центром управления цифровой подстанцией и лабораторной части.

В лаборатории размещены программно-аппаратный комплекс для моделирования в реальном времени, а также оборудование, которое позволяет не просто создавать потоки информации, но и моделировать в реальном времени различные источники сигналов.

Наличие этих двух компонентов позволяет производить полномасштабные исследования оборудования, прежде чем поставить его уже на реальные объекты.

5 октября 2012 года завершился процесс объединения лабораторной и подстанционной частей опытного полигона: была осуществлена связь через коммуникационную среду между центром управления подстанцией (ЦУП) и лабораторным полигоном. В настоящее время ЦУП и лабораторную часть связывает оптоволоконный высокоскоростной канал связи.