

УДК 620.9 + 621.311.24

**ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ В РАМКАХ
КОНЦЕПЦИИ «ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ 2030»**

Андрианова Людмила Прокопьевна

д-р техн. наук, профессор

Павлова Зухра Хасановна

д-р техн. наук, профессор

Хакимьянов Марат Ильгизович

д-р техн. наук, профессор

Хазиева Регина Тагировна

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО Уфимский государственный

нефтяной технический университет

Аннотация: В статье приведены современные термины и определения цифровой подстанции (ЦПС), локальной вычислительной сети (ЛВС), программно-технического комплекса (ПТК) и протоколов передачи данных **GOOSE, MMS, PRP**; структура ПТК ЦПС; характеристики уровней процесса, присоединения, подстанции; способы передачи данных аналоговой и дискретной информации; рассмотрены варианты топологии ЛВС шин процесса, подстанции; рекомендации по применению протоколов передачи данных для распределительных устройств РУ 6,10, 20, 35, 110 и 220 кВ; рекомендации по виртуализации оборудования уровня присоединения с использованием технология виртуальных локальных сетей (VLAN).

Материалы, представленные в настоящей статье, рекомендуются к использованию в рамках дополнительного образования при подготовке (переподготовке) специалистов, занимающихся проектированием объектов электроэнергетики.

Ключевые слова: Цифровая подстанция; программно-технический комплекс; локальная вычислительная сеть; уровни процесса, присоединения, подстанции; шины процесса и подстанции; способы и протоколы передачи данных; топологии локальной вычислительной сети шин процесса и подстанции; виртуализация оборудования уровня присоединения.

**BASICS OF BUILDING DIGITAL SUBSTATIONS WITHIN THE
FRAMEWORK OF THE «DIGITAL TRANSFORMATION 2030 CONCEPT»**

**Andrianova Lyudmila Prokofievna
Pavlova Zuhra Khasanovna
Khakimjanov Marat Ilgizovich
Khazieva Regina Tagirovna**

Abstract: The article presents modern terms and definitions of digital substation (DSP), local area network (LAN), software and hardware complex (PTC) and data transfer protocols GOOSE, MMS, PRP; structure of PTK TsPS; characteristics of the levels of the process, connection, substation; methods of data transmission of analog and discrete information; the options for the topology of the LAN of the process bus, substation are considered; recommendations on the use of data transfer protocols for switchgears RU 6, 10, 20, 35, 110 and 220 kV; recommendations for virtualization of interconnect level equipment using virtual local area networks (VLAN) technology.

The materials presented in this article are recommended for use in the framework of additional education in the training (retraining) of specialists involved in the design of electric power facilities

Key words: Digital substation; software and hardware complex; local computing network; process, connection, substation levels; process bus and substation; methods and protocols of data transmission; local area network topology of process and substation buses; virtualization of bay equipment.

В соответствии с утвержденной ПАО «Россети» концепцией «Цифровая трансформация 2030» (21 декабря 2018 г.) в настоящее время в ПАО «ФСК ЕЭС» Российской Федерации осуществляется переход на риск-ориентированное управление в электроэнергетике на основе внедрения цифровых технологий и анализа больших данных [1].

При этом одной из основных задач электросетевого комплекса является развитие автоматизации процессов передачи и распределения электрической энергии, современных систем контроля технического состояния, диагностики и мониторинга технологического оборудования, систем защиты и автоматики, противоаварийной автоматики, систем связи, инженерных систем,

коммерческого и технического учета электроэнергии, создание и развитие цифровых подстанций и электрических сетей [2].

В распоряжении ПАО «Россети» «Об утверждении технических требований к компонентам цифровой сети» (от 19.06.2018 № 106р) дано следующее определение «Цифровая подстанция – трансформаторная или иная подстанция, распределительный пункт, ключевым фактором управления которым являются данные в цифровом виде».

Для реализации целей и задач концепции «Цифровая трансформация 2030» в Российской Федерации разработаны и введены в действие ряд основополагающих стандартов ПАО «ФСК ЕЭС»:

1. СТО 56947007-.29.240.10.256-2018 «Технические требования к аппаратно-программным средствам и электротехническому оборудованию ЦПС» [3];

2. СТО 34.01-21-004-2019 «Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110-220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ» [4];

3. СТО 34.01-21-005-2019 «Цифровая электрическая сеть. Требования к проектированию цифровых распределительных электрических сетей 0,4-220 кВ» [5];

4. СТО 29.240.10.299-2020 «Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию цифровых подстанций [6].

Таким образом, в нашей стране имеются основные нормативно-технические документы, устанавливающие требования к технологическому проектированию цифровых подстанций и цифровых электрических сетей, которые распространяются на объекты нового строительства, а также на объекты, подлежащие техническому перевооружению и реконструкции.

Основные термины и определения для цифровой подстанции (ЦПС), цифрового питающего центра, цифровой электрической сети, программно-технического комплекса (ПТК), протоколов передачи данных (**GOOSE, MMS**) и параллельного резервирования сети (**PRP**), локальной вычислительной сети (ЛВС) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Терминология цифровых подстанций

Термины и определения
Цифровая подстанция (ЦПС) – автоматизированная подстанция, оснащенная взаимодействующими в режиме единого времени цифровыми информационными и управляющими системами и функционирующая без присутствия постоянного дежурного персонала [п.3.27, СТО 34.01-21-004-2019].
Цифровая подстанция (ЦПС по терминологии НТП ПС 2017) – подстанция с высоким уровнем автоматизации, в которой практически все процессы информационного обмена между элементами ПС, а также управление работой ПС осуществляются в цифровом виде на основе стандартов серии МЭК 61850 [п.3 СТО 56947007-29.240.10.248-2017].
Цифровой питающий центр – цифровая подстанция 110-220 кВ и (или) узловая цифровая подстанция с высшим напряжением 35 кВ, от РУ СН и НН которой электрическая энергия распределяется по электрической сети [п.3.28, СТО 34.01-21-004-2019]
Цифровая электрическая сеть – организационно-техническое объединение электросетевых объектов, оснащенных цифровыми системами измерения параметров режима сети, мониторинга состояния оборудования и линий электропередачи, защиты и противоаварийной автоматики, сетевого и объектового управления, информационный обмен между которыми осуществляется по единым протоколам с обеспечением синхронизации по времени [п.3.29, СТО 34.01-21-004-2019]
GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) – протокол (сервис), описанный в IEC 61850-8-1, для передачи данных по технологии «издатель-подписчики», предназначенный для передачи широковещательных сообщений (дискретных сигналов) о событиях на подстанции [п.3 СТО 56947007-29.240.10.248-2017]
MMS (Manufacturing Message Specification) – протокол, описанный в IEC 61850-8-1, для передачи данных по технологии «клиентсервер», используемый для обмена данными, результатами измерений, диагностическими сообщениями, передачи команд управления и других целей [п.3 СТО 56947007-29.240.10.248-2017]
PRP (Parallel Redundancy Protocol) – протокол параллельного резервирования предполагает создание двух независимых сетей [п.3, СТО 56947007-25.040.40.226-2016]
Локальная вычислительная сеть (ЛВС) – единая, интегрированная, иерархическая распределенная человеко-машинная система, оснащенная средствами управления, измерения, сбора, обработки, отображения, регистрации, хранения и передачи информации [п.5.1, СТО 56947007-25.040.40.226-2016]
Программно-технический комплекс (ПТК) – единая, интегрированная, иерархическая распределенная человеко-машинная система, оснащенная средствами управления, измерения, сбора, обработки, отображения, регистрации, хранения и передачи информации [п.5.1, СТО 56947007-25.040.40.226-2016] Программно-технический комплекс (ПТК) – совокупность средств вычислительной техники, программно-вычислительного обеспечения и средств создания и заполнения машинной информационной базы при вводе системы в действие, достаточных для выполнения одной или более задач АСУ ТП [п.3, СТО 56947007-25.040.40.236-2016]

При проектировании строительства ЦПС рассмотрению подлежат три основные архитектуры, разработанные на основе стандарта МЭК 61850 [4, 6]:

1. Архитектура I – архитектура ЦПС, в которой обмен всей информацией между интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) осуществляется дискретными и аналоговыми электрическими сигналами, передаваемыми по контрольному кабелю; информационный обмен между подстанционным уровнем (SCADA) и ИЭУ осуществляется по протоколу MMS согласно МЭК 61850-8-1. Протоколы GOOSE и Sampled Values не используются. В формате представления таблиц сигналов, передаваемых в АСУ ТП, используются наименования сигналов по стандарту МЭК 61850;

2. Архитектура II – архитектура ЦПС, в которой взаимодействие между ИЭУ выполняется при помощи объектно-ориентированных сообщений по протоколу GOOSE согласно стандарту МЭК 61850-8-1; информационный обмен между подстанционным уровнем (SCADA) и ИЭУ осуществляется по цифровому протоколу MMS согласно МЭК 61850-8-1; измерения тока и напряжения передаются в виде электрических аналоговых сигналов с использованием контрольных кабелей. Применение протокола Sampled Values в данной архитектуре не предусматривается;

3. Архитектура III - это архитектура ЦПС, в которой взаимодействие между ИЭУ выполняется при помощи объектно-ориентированных сообщений по протоколу GOOSE согласно стандарту МЭК 61850-8-1; информация от измерительных устройств тока и напряжения передается в цифровом виде с использованием протокола передачи мгновенных значений по протоколу Sampled Values согласно стандарту МЭК 61850-9-2; информационный обмен между подстанционным уровнем (SCADA) и ИЭУ осуществляется по протоколу MMS согласно МЭК 61850-8-1.

При проектировании объектов в соответствии с архитектурой III в дополнение к особенностям второй архитектуры также добавляются требования в части передачи данных с использованием протокола Sampled Values.

Особенности реализации архитектур I, II и III в части применяемых технических средств и протоколов стандарта МЭК 61850 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Особенности реализации архитектур I, II и III [4]

Технические средства	Архитектура		
	I	II	III
Использование протокола MMS	+	+	+
Использование протокола GOOSE	-	+	+

Использование протокола Sampled Values	–	–	+
Применение оборудования с поддержкой МЭК 61850 на подстанционном уровне	+	+	+
Применение оборудования с поддержкой МЭК 61850 на уровне присоединения	+	+	+
Применение оборудования с поддержкой МЭК 61850 на полевом уровне	–	+	+
Использование шкафа преобразователей дискретных сигналов (ШПДС)	–	+	+
Использование шкафа преобразователей аналоговых сигналов (ШПАС)	–	–	+
Использование цифровых трансформаторов тока (ЦТТ) и цифровых трансформаторов напряжения (ЦТН), работающих по протоколу Sampled Values	–	–	+

Критерии применения различных архитектур при построении цифровых подстанций [4, 5, 6]:

1. Архитектура I применяется при некомплексной реконструкции подстанции, оборудованной микропроцессорными устройствами РЗА, использующими протокол МЭК 61850 для передачи данных в АСУ ТП;

2. Архитектура II применяется при строительстве и комплексной реконструкции подстанции, а также реконструкции подстанции, где используются микропроцессорные устройства РЗА, не оснащенные протоколом МЭК 61850;

3. Архитектура III применяется на выбранных инновационных подстанциях только для отработки новых технологий, подтверждения или выявления новых технико-экономических эффектов.

Ядром ЦПС является программно-технический комплекс (ПТК), который разделен на структурные уровни: процесса, присоединения и подстанции, объединяемые между собой посредством сегментов локальной вычислительной сети (ЛВС) Ethernet (**рис.1**).

Сегменты ЛВС образуют шину процесса, объединяющую уровни процесса и присоединения, и шину подстанции, объединяющую уровни присоединения и подстанции.

Состав, назначение и способы передачи данных уровней процесса, присоединения и подстанции приведены соответственно в таблицах 3-5.

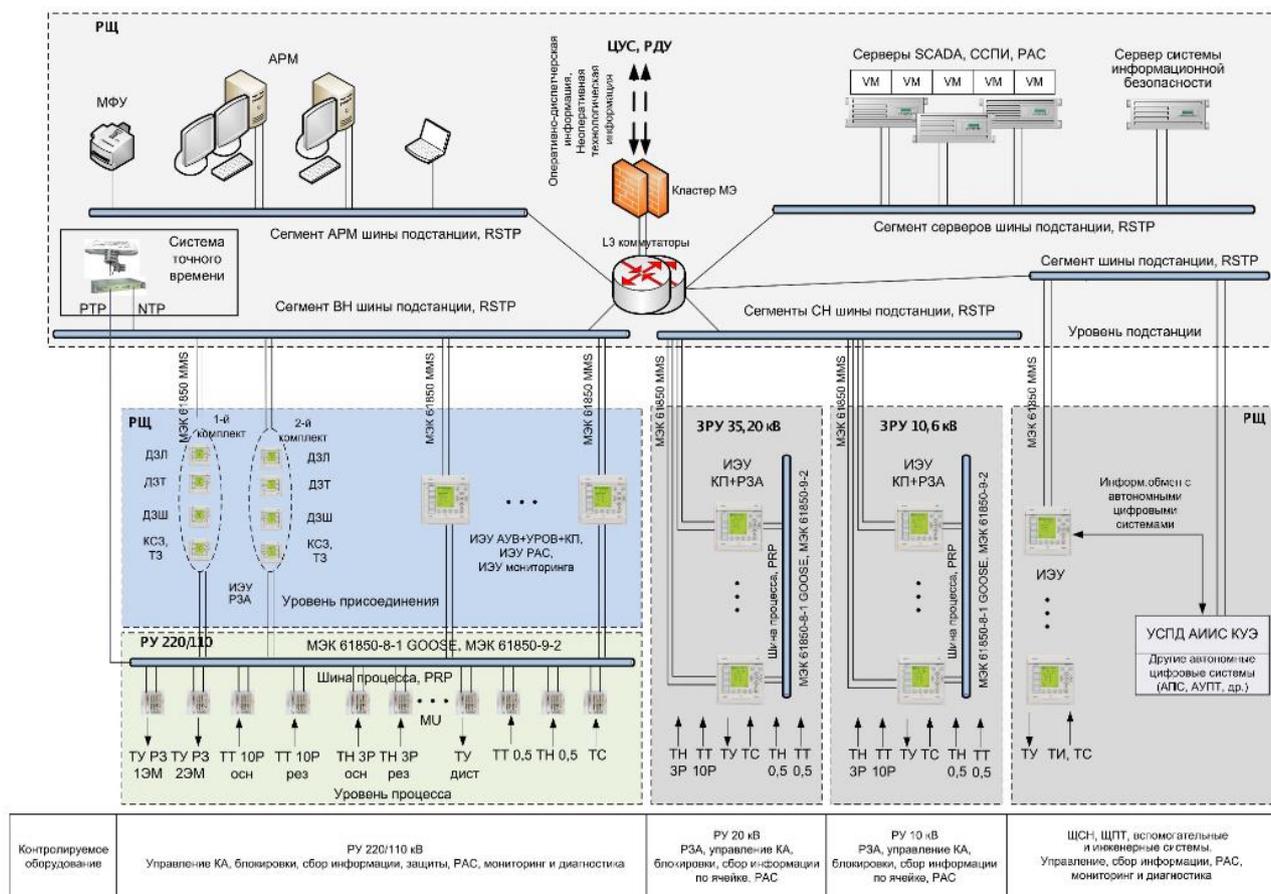


Рис. 1. Структурная схема ПТК цифровой подстанции [4, с. 22]

Таблица 3

Состав, назначение и способ передачи данных уровня процесса ПТК цифровой подстанции

Состав уровня процесса:

1. Устройства сопряжения с объектом (УСО) используют для оцифровки сигналов При отсутствии у основного оборудования встроенного цифрового интерфейса:

- ПАС (AMU) – преобразователи аналоговых сигналов;
- ПДС (DMU) – преобразователи дискретных сигналов.

Указанные устройства могут быть отдельными или объединенными в одном комбинированном устройстве.

2. УСО для оцифровки не требуется, если цифровой интерфейс изначально встроен в основное оборудование (например, сбор аналоговых сигналов выполняется напрямую с оптических трансформаторов тока и напряжения).

Оба варианта соответствуют СТО 34.01-21-004-2019 [4, см. п.5.2.1].

Назначение уровня процесса:

- организация сопряжения основного оборудования с ПТК ЦПС;
- сбор дискретной информации с «сухих» контактов основного оборудования (например, с

блок-контактов коммутационных аппаратов) и её оцифровка
- сбор аналоговой информации (например, с измерительных трансформаторов тока и напряжения) и её оцифровка (при применении оптических измерительных трансформаторов сигнал изначально оцифрован);
- передача собранной информации на вышестоящие уровни;
- получение команд управления от вышестоящих уровней в цифровом виде с воздействием на основное оборудование (например, включить/отключить коммутационный аппарат).

Способ передачи данных уровня процесса:

1. От основного оборудования до преобразователей аналоговых и дискретных сигналов (ПАС и ПДС) информация передается по контрольному кабелю с медными жилами. ПАС и ПДС стремятся установить максимально близко к основному оборудованию.
2. От ПАС и ПДС по волокну-оптическим кабельным линиям информация поступает в коммутаторы шины процесса.
3. **Аналоговая информация** в цифровом виде передается в виде потока данных SV-поток. SV-поток состоит из кадров Ethernet в соответствии со спецификацией МЭК 61850-9-2LE. В соответствии со спецификацией МЭК 61850-9-2LE с учетом МЭК 61869:
 - поток данных для целей релейной защиты и автоматики и измерений включает в себя 1 набор данных (4 тока, 4 напряжения), за период осуществляется передача 80 кадров Ethernet;
 - поток данных для целей коммерческого учета и контроля качества электроэнергии включает в себя 8 наборов данных (в каждом по 4 тока, 4 напряжения), за период осуществляется передача 32 кадров Ethernet.
4. **Дискретная информация** в цифровом виде передается с использованием протокола МЭК 61850-8-1 GOOSE, MMS.

Таблица 4

Состав, назначение и способ передачи данных уровня присоединения ПТК цифровой подстанции

Состав уровня присоединения:

Интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), выполняющие прикладные функции автоматизированных систем технологического управления (АСТУ), включая релейную защиту и автоматику (РЗА), для соответствующего основного оборудования [4, п.5.2.1].

Назначение уровня присоединения:

- прием и обработка данных, получаемых от устройств уровня присоединения;
- выполнение соответствующих алгоритмов прикладных функций с передачей режимной и диагностической информации на уровень шины подстанции;
- обмен информацией с уровнями процесса.

Способ передачи данных уровня присоединения:

1. Мгновенные значения тока и напряжения принимаются ИЭУ по протоколу МЭК 61850-9-2 SV по шине процессов по волокну-оптическим линиям связи.
2. Обмен дискретной информацией с устройствами уровня процесса и другими

устройствами уровня присоединения происходит по протоколу МЭК 61850-8-1 GOOSE по волокну-оптическим линиям связи.

Таблица 5

Состав, назначение и способ передачи данных уровня подстанции ПТК цифровой подстанции

Состав уровня подстанции:

- сервера АСУ ТП / ССПИ;
- сервера и АРМ SCADA системы ЦПС;
- устройства регистрации параметров переходных процессов в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах;
- средства информационной интеграции цифровой ПС и ЦУС в соответствии с МЭК 61850-90-2.

Данный уровень должен быть образован серверами, объединенными в отказоустойчивый кластер, на платформе виртуализации которого работают сервера и АРМ уровня подстанции.

Назначение уровня подстанции:

- консолидация информации, получаемой от уровня присоединения;
- обеспечение скоординированного выполнения команд оператора непосредственно на подстанции и/или команд вышестоящего уровня управления с формированием управляющих воздействий с использованием сервисов МЭК 61850-8-1:
 - для управления основным оборудованием;
 - для управления программными ключами в составе АСТУ;
 - для изменения уставок;
- прием и обработка данных от устройств уровня присоединения;
- выполнение алгоритмов прикладных функций с передачей режимной и диагностической информации на уровень шины подстанции;
- обмен информацией с уровнями процесса.

Способ передачи данных уровня подстанции:

1. Серверы уровня подстанции взаимодействуют с устройствами уровня присоединения по ЛВС шины подстанции, используя сервисы клиент-серверного обмена в соответствии с МЭК 61850-8-1, обмен файловой информацией производится с использованием сервисов файлового обмена в соответствии с МЭК 61850-8-1.
2. Для информационного обмена ЦПС с вышестоящими уровнями управления (ЦУС) и бизнес-аналитики для передачи оперативной и неоперативной информации в обоих направлениях сервера ССПИ должны поддерживать сервисы клиент-серверного обмена в соответствии с МЭК 61850-8-1.
3. Для информационного обмена с существующими (унаследованными) SCADA системами, не имеющими возможности клиент-серверного обмена в соответствии с МЭК 61850-8-1, сервера ССПИ должны в том числе поддерживать протокол МЭК 60870-5-104 [4, п.5.2.3].

Варианты топологии локальной вычислительной сети шин процесса и подстанции приведены в таблице 6.

Таблица 6

Варианты топологии ЛВС шины процесса и шины подстанции [4]

Шина процесса	Варианты топологии ЛВС шины процесса: - «Двойная звезда» с использованием протокола МЭК 62439-3 PRP; - «Двойное кольцо» с использованием протокола МЭК 62439-3 PRP/HSR [4, п.5.2.4].
Шина подстанции	Топология ЛВС шины подстанции в пределах каждой из резервируемых сетей PRP должна обеспечивать для коммутаторов резервирование сети Ethernet на 2-ом уровне модели OSI с использованием протоколов RSTP, MRP [4, п.5.2.4].

Принципиальная схема подключения полевых устройств к ЛВС шины процесса приведена на рис. 2. В зонах распределительных устройств (РУ) и ОПУ предусматриваются пассивные оптические коммутационные панели, соединенные многожильным магистральным оптическим кабелем. Оптические коммутационные панели обеспечивают распределение оптического сигнала, подведенного к ним по магистральному кабелю и портам, оборудованными разъемами, к которым подключаются коммутационные шнуры, передающие сигнал на Ethernet-порты активного сетевого оборудования цифровой подстанции [4].

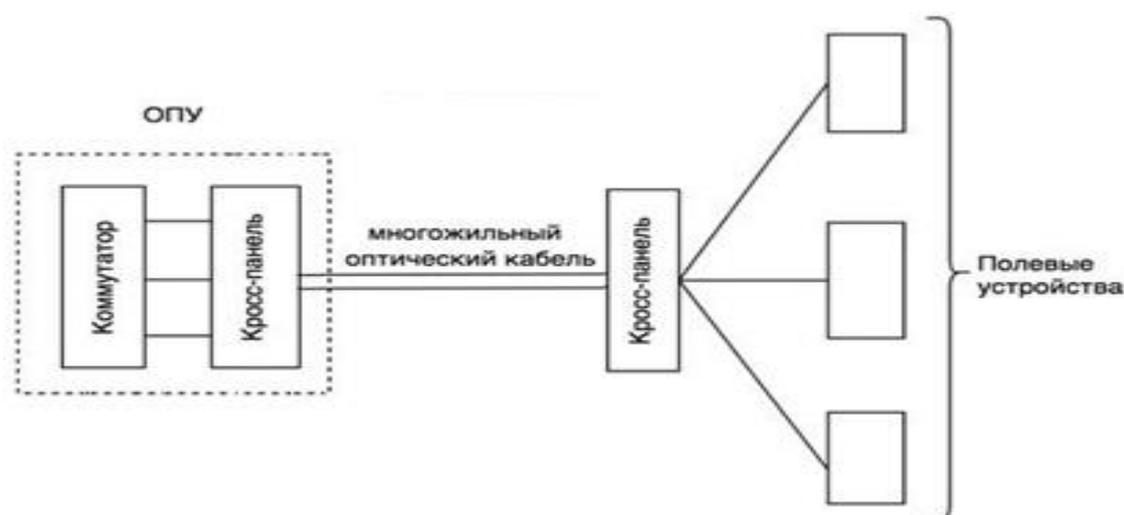


Рис. 2. Схема подключения полевых устройств к ЛВС шины процесса [4, с. 30]

Полевые устройства (датчики и исполнительные механизмы): ПАС (AMU) – преобразователи аналоговых сигналов и ПДС (DMU) – преобразователи дискретных сигналов. Рекомендации по применению протоколов передачи данных для оборудования распределительных устройств (РУ) приведены в таблице 7.

Таблица 7

Применение протоколов передачи данных [4, с. 34]

Класс применения РУ	Протоколы передачи данных
6, 10, 20 кВ	MMS, GOOSE
35 кВ	MMS, GOOSE
110, 220 кВ	MMS, GOOSE, SV

В качестве примера на рис. 3. приведена упрощенная структура подстанции с иллюстрацией уровней процесса, присоединения, подстанции с цифровым интерфейсом для измерений IEC 61850 [7].

Виртуализация оборудования уровня присоединения. Для разделения трафика (РЗА, АСУТП, АИИС КУЭ, видеонаблюдение, связь и др.), совместно использующего среду передачи, а также с целью повышения безопасности, используется технология виртуальных локальных сетей (VLAN).

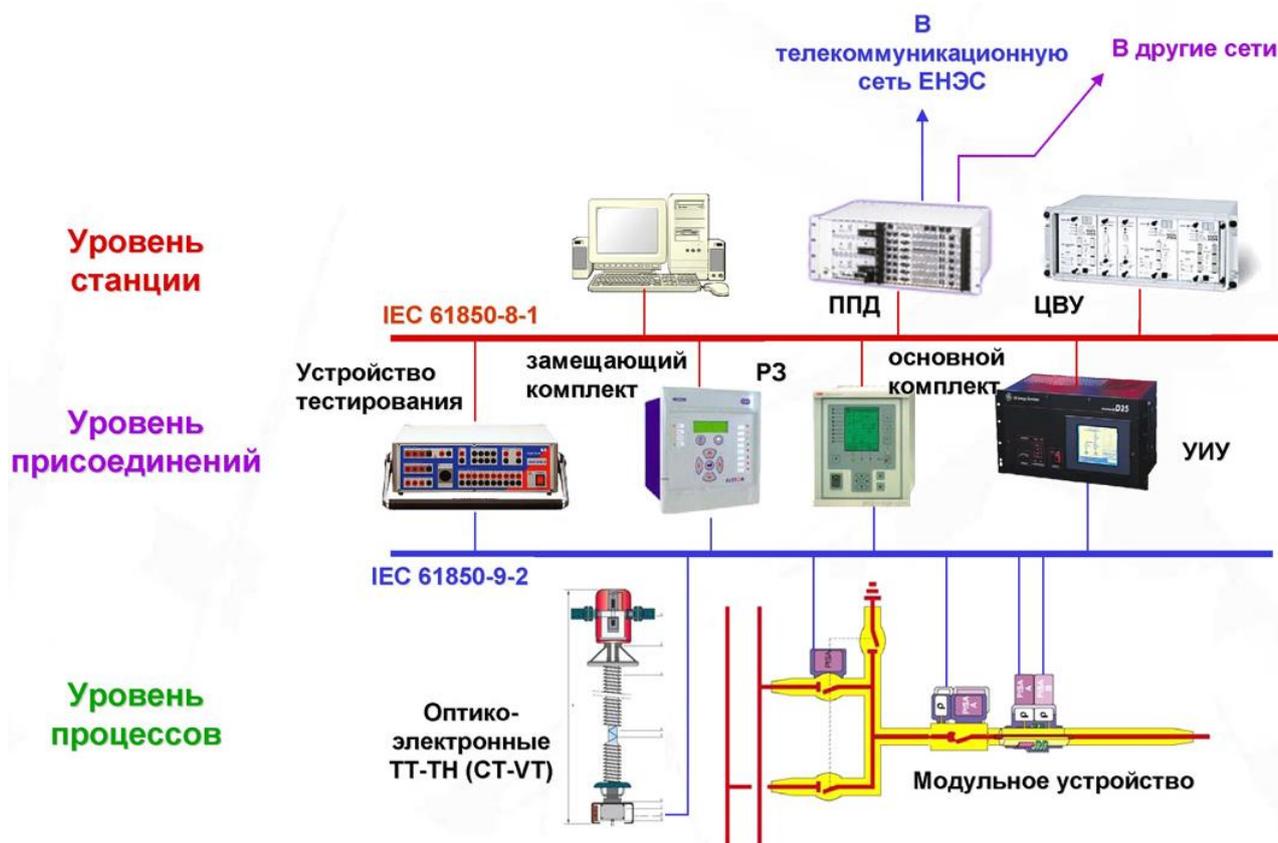


Рис. 3. Цифровой интерфейс для измерений IEC 61850: УИУ - устройство измерения и управления; РЗ - устройство релейной защиты; ЦВУ - центральное вычислительное устройство; ППД – процессор передачи данных [7]

Разделение трафика по VLAN должно выполняться на стадии проектирования объекта с учетом приоритизации и логической сегрегации трафика. При необходимости, связь между VLAN должна осуществляться через соответствующие маршрутизаторы [4, с.38].

Заключение.

Создание цифровой подстанции обеспечит сокращение кабельного хозяйства, сроков проектирования, монтажа, наладки оборудования подстанции, наблюдаемость параметров функционирования ЛЭП, оборудования и устройств подстанции, унификацию механизмов конфигурирования подстанции, формирование единой системы функциональной диагностики, переход к необслуживаемым подстанциям.

Список литературы

1. Концепция «Цифровая трансформация 2030» ПАО «Россети». 2018 // URL:[http://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf.] – Дата обращения 08.10.2020.
2. Положение о технической политике в электросетевом комплексе (новая редакция) / утв. решением Совета директоров ПАО «ФСК ЕЭС» 09.04.2020 // [www.rosseti.ru.] – Дата обращения 08.11.2020.
3. Технические требования к аппаратно-программным средствам и электротехническому оборудованию ЦПС / СТО 56947007-.29.240.10.256-2018; введ. 21.09.2018. - ПАО «ФСК ЕЭС», 2018. – 130 с. // [www.rosseti.ru.] – Дата обращения 14.11.2020.
4. Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110-220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ / стандарт организации СТО 34.01-21-004-2019; введ. 29.03.2019. – ПАО «Россети», 2019. – 114 с. // [www.rosseti.ru.] – Дата обращения 08.11.2020.
5. Цифровая электрическая сеть. Требования к проектированию цифровых распределительных электрических сетей 0,4-220 кВ / СТО 34.01-21-005-2019; введ. 29.03.2019. – ПАО «Россети», 2019. - 96 с. // [www.rosseti.ru.] – Дата обращения 08.11.2020.
6. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию цифровых подстанций / СТО 29.240.10.299-2020; введ. 26.02.2020. – ПАО «ФСК ЕЭС», 2020. - 125 с. // [www.rosseti.ru.] – Дата обращения 13.11.2020.
7. Калинин С.Ю. Технические решения в области АСУТП для цифровых ПС 110/35 кВ. Энергия под ключ / Заглавие с экрана // URL: <https://forca.ru/stati/rzia/resheniya-v-oblasti-asutp-dlya-cifrovyyh-podstanciy.html>. - Дата обращения 14.11.2020.

© Л.П. Андрианова, З.Х. Павлова, М.И. Хакимьянов, Р.Т. Хазиева, 2020