

Выбор оптимальных видов оборудования уровня процесса и уровня подстанции цифровой тяговой подстанции

Е. Ю. Пузина✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ lena-rus05@mail.ru

Резюме

В настоящее время в ОАО «Российские железные дороги» актуальной задачей, направленной на уменьшение эксплуатационных расходов, совершенствование системы управления технологическими процессами, выбор оптимальных направлений развития, является цифровизация всех подразделений акционерного общества. В части энергообеспечения к элементам цифровой трансформации относится и организация цифровых тяговых подстанций. Реализация проектов цифровых тяговых подстанций в настоящее время только начинает осуществляться. Единичные тяговые подстанции на Горьковской и Западно-Сибирской железных дорогах оснащены оборудованием на уровне процесса, в основном речь идет об устройствах мониторинга состояния силового оборудования, оперативных цепей, высоковольтных выключателей, ограничителей перенапряжения, ячеек комплектных распределительных устройств средних классов напряжения. Продвижение ко второму и третьему уровням цифровой тяговой подстанции только начинается. Второй уровень цифровой тяговой подстанции включает в себя устройства релейной защиты и автоматики, регистрации аварийных событий и противоаварийной автоматики. Третий уровень составляют системы управления тяговой подстанцией, программно-технические комплексы и человеко-машинные интерфейсы. И в этом отношении крайне важно выработать концепцию унификации применяемого на данных уровнях оборудования и программного обеспечения. Реализация данной концепции позволит на примере отдельных тяговых подстанций отработать целесообразность применения тех или иных видов оборудования и принять к реализации оптимальные варианты оборудования. Это, в свою очередь, обеспечит в дальнейшем надежность работы цифровых тяговых подстанций и повысит безопасность перевозочного процесса.

Ключевые слова

цифровая тяговая подстанция, тяговые трансформаторы, уровни присоединения и подстанции, системы диагностики и мониторинга

Для цитирования

Пузина Е. Ю. Выбор оптимальных видов оборудования уровня процесса и уровня подстанции цифровой тяговой подстанции / Е. Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 133–144. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).133-144

Информация о статье

поступила в редакцию: 28.02.2022 г.; поступила после рецензирования: 09.03.2022 г.; принята к публикации: 11.03.2022 г.

Selection of optimal types of the process level and substation level equipment of the digital traction substation

Е. Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ lena-rus05@mail.ru

Abstract

At present, the urgent task in the Open Joint Stock Company «Russian Railways», aimed at reducing operational expenses, improving the process control systems and choosing the optimal development directions, is the digitalization of all divisions of the joint-stock company. As far as the power supply for Russian railways is concerned, the elements of digital transformation include, among other things, the organization of digital traction substations. The implementation of digital traction substation projects is currently just beginning to be carried out. Single traction substations on the Gorky and West Siberian railways are equipped with the process level equipment, mainly the devices for monitoring the state of power equipment, operational circuits, high-voltage circuit breakers, surge arresters, cells of complete switchgears of medium voltage classes. The progress towards the second and third levels of the digital traction substation is just beginning. The second level of the digital traction substation includes relay protection and automation devices, emergency event registration and emergency automation. The third level consists of traction substation control systems, program-technical complexes and human-machine interfaces. And in this regard, it is extremely important to develop a concept for the unification of the equipment and software used at these levels. The implementa-

tion of this concept will allow, using the example of individual traction substations, to work out the feasibility of using certain types of equipment and to accept the best equipment options for implementation. This, in turn, will further ensure the reliability of the operation of digital traction substations and increase the safety of the transportation process.

Keywords

digital traction substation, traction transformers, connection levels and substations, diagnostic and monitoring systems

For citation

Puzina E.Yu. *Vybor optimal'nykh vidov oborudovaniya urovnya protsessy i urovnya podstantsii tsifrovoi tyagovoi podstantsii* [Selection of optimal types of the process level and substation level equipment of the digital traction substation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 133–144. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).133-144

Article info

Received: 28.02.2022; revised: 09.03.2022; accepted: 11.03.2022.

Введение

В энергетической стратегии развития Российской Федерации до 2035 года определены основные направления развития энергетической структуры железнодорожного транспорта:

– обеспечение перевозочного процесса топливно-энергетическими ресурсами в необходимых объемах в любых ситуациях;

– совершенствование системы управления энергообеспечения открытого акционерного общества «Российские железные дороги» на основе ее цифровизации.

Внедрение данных направлений развития предполагает обеспечение энергетической структуры наиболее современными цифровыми технологиями, использование которых повысит качество и надежность управления технологическими процессами, приведет к существенному снижению эксплуатационных расходов, благоприятно отразится на безопасности перевозочного процесса.

В области энергообеспечения железнодорожного транспорта к элементам цифровизации относятся и такие объекты, как тяговые подстанции [1–4].

Описание проблемной ситуации и постановка задачи

В настоящее время на отечественном железнодорожном транспорте нет полностью цифровизированных подстанций. Процесс их цифровизации останавливает как отсутствие полностью доработанного программного обеспечения отечественной разработки, учитывающего особенности эксплуатации именно тяговых подстанций, так и отсутствие единой концепции выбора оборудования для первого, вто-

рого и третьего уровней цифровой тяговой подстанции (ЦТП).

В работе [5] выполнен сравнительный анализ оборудования первого уровня ЦТП, предложены оптимальные версии оборудования, производимого отечественными предприятиями.

С целью формирования единого подхода к оснащению оборудованием второго и третьего уровней ЦТП [1–5] необходим обзор и анализ характеристик выпускаемого в России оборудования данных уровней.

Выбор оборудования уровня присоединения

Уровень присоединения включает в себя не только оборудование, но и программное обеспечение, которое служит для сбора информации с объектов первого уровня и обособленных подсистем ЦТП, ее обработки и передачи на третий уровень.

К оборудованию уровня присоединения относят терминалы релейной защиты и автоматики (РЗА), устройства регистрации аварийных событий и устройства противоаварийной автоматики (ПА). Так как шкафы состояются на базе микропроцессорных терминалов, сведем их выбор в табл. 1.

Анализ информации, приведенной (табл. 1) позволяет сделать вывод, что для защиты распределительных устройств (РУ) 0,4, 10, 110 и 220 кВ тяговых подстанций подходит защита ООО «Релематика», так как терминалы этой компании отвечают всем необходимым требованиям, также количество входов для аналоговых и дискретных сигналов больше. Для защит РУ 27,5 кВ остановим выбор на терминалах ИнТер компании ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», так как данные терминалы специализированы

под напряжение 27,5 кВ. Рассмотрим подробно защиты для потенциальных распределительных устройств ЦТП.

Защиты для распределительных устройств центральной тяговой подстанции

1. РУ 220, 110 кВ.

В качестве защиты для РУ питающего напряжения ЦТП представляется оптимальным использовать централизованную цифровую РЗА 110–220 кВ производства ООО «Релематика» (рис. 1).

Данная защита представляет собой комплекс устройств, способных не только реализовывать функции основных и резервных защит всех объектов ЦТП, но и осуществлять измерение, сигнализацию и управление коммутационными аппаратами всех присоединений ее РУ.

Достоинства централизованной защиты:

- сокращаются затраты на кабельную продукцию до 70 % и эксплуатацию;
- сокращаются работы по проектирова-

нию на 25 %;

– снижается общее количество шкафов РЗА на 50%;

– сокращается время ввода в эксплуатацию и интеграцию автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

2. РУ 27,5 кВ.

Для защиты присоединений 27,5 кВ имеет смысл выбирать терминалы ИнТер-825 производства «НИИЭФА-Энерго», которые помимо комплекса функций, указанных ранее для терминалов производства ООО «Релематика», также способны осуществлять диагностику выключателей и самодиагностику терминалов в специализированных тяговых РУ (рис. 2).

К перечню функций РЗА, которые способен выполнять терминал ИнТер-825, также относятся:

- направленная максимальная токовая защита;
- направленная защита по увеличению

Таблица 1. Характеристики терминалов релейной защиты и автоматики

Table 1. Characteristics of relay protection and automatics terminals

Характеристики терминалов микропроцессорной защиты и противоаварийной автоматики	Производитель		
	ООО «НИИЭФА-Энерго»	ООО НПП «Экра»	ООО «Релематика»
Температурные условия, °С	(-10)–(+45)	(-5)–(+45)	(-55)–(+55)
Номинальное напряжение, кВ	27,5	35(6,10) – 750	35(0,4, 6, 10) – 750
Интерфейс	МЭК 61850	МЭК 61850	МЭК 61850
Интервал значений напряжения питания, В	176–253	88–242	88–242
Количество входов:			
Аналоговых, шт.	8	13	24
Дискретных, шт.	30	32	80
Осциллограф	+	–	+
Диагностика выключателя	+	+	+
Управление выключателем	+	+	+
Управление разъединителем	+	+	+
Дифференциальная защита по току	+	+	+
Устройство резервирования отказа выключателя	+	+	+
Максимальная токовая защита	+	+	+
Токковая защита нулевой последовательности	+	+	+
Устройство автоматического повторного включения	+	+	+
Газовая защита	–	+	+
Автоматическое регулирование напряжения силовых трансформаторов	–	+	+
Защита по минимальному напряжению	+	+	+
Автоматическая частотная разгрузка	+	+	+
Определитель места повреждения в контактной сети	+	+	+

тока за заданное время;

- защита с выдержкой времени по напряжению и току;
- направленная защита по критической скорости нарастания тока;
- блокировка многократных включений.

Выбор противоаварийной автоматики

В качестве ПА представляется оптимальным выбрать «Ш2400 20,5» от ООО «Релематика».

Данные шкафы представляют собой многофункциональные шкафы ПА, выполненные на основе терминала серии «ТОР 300 ПА»,

комплекс устройств ПА имеет модульную структуру, что дает возможность реализовывать различные модификации для конкретного проекта.

Функции ПА, выполняемые на ЦТП:

- ограничение снижения напряжения, три очереди по уровню напряжения;
- ограничение повышения напряжения;
- разгрузка при перегрузке по току;
- фиксация отключения объекта: линии силового трансформатора, выключателя присоединения;
- фиксация тяжести короткого замыкания.

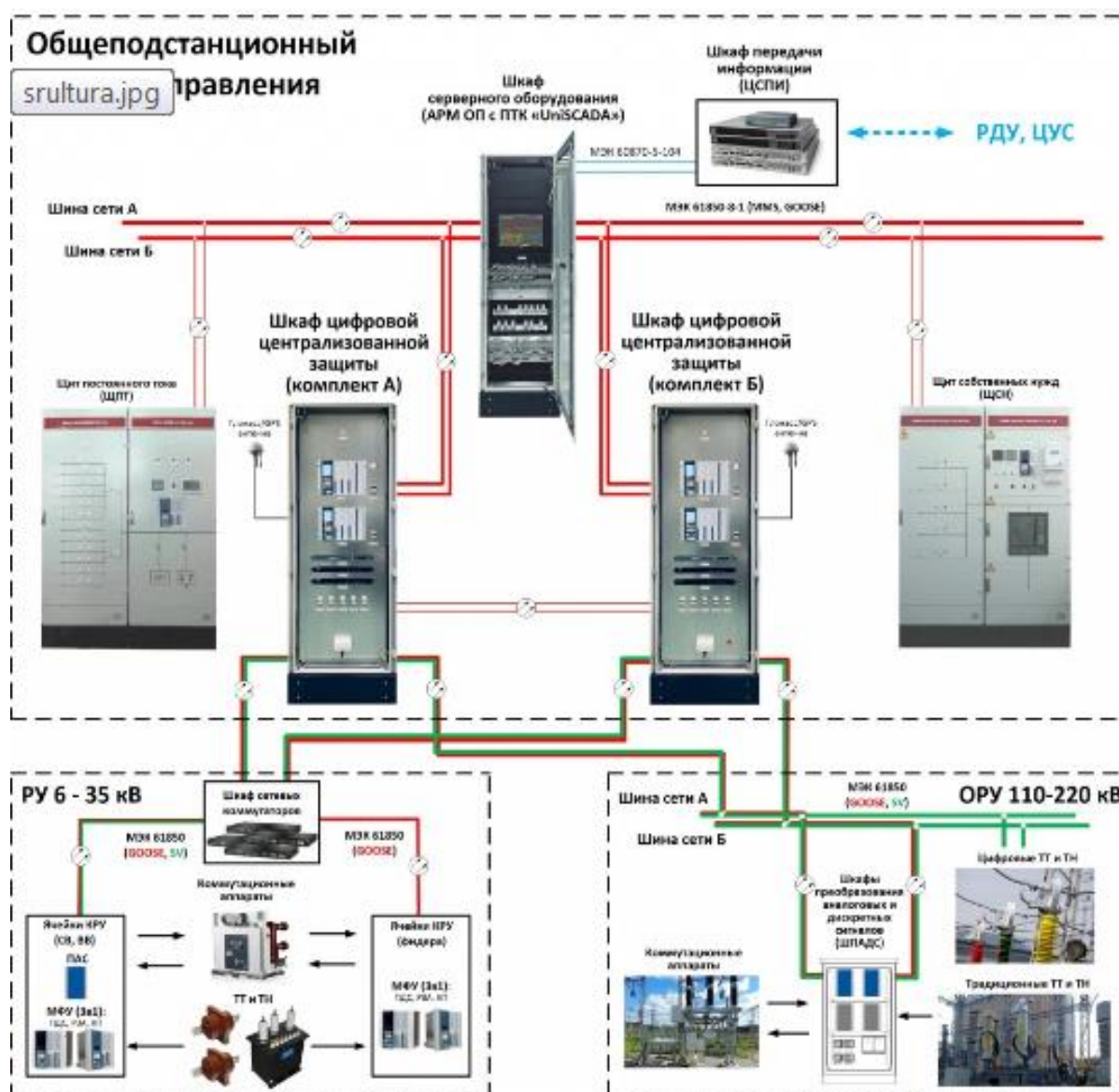


Рис. 1. Цифровая централизованная релейная защита и автоматика
Fig.1. The centralized digital relay protection and automatics

Выбор системы регистрации аварийных событий

Для регистрации аварийных событий целесообразно использовать на ЦТП устройство типа «Ш2600 03.50X» компании «Релематика». Его основная функция – запись и хранение различных сигналов при возникновении аварийных событий.

В составе шкафа Ш2600 03.50X находятся терминалы «ТОР 300 РАС 50X», способные регистрировать до 80 дискретных и 24 аналоговых сигналов. На базе этих терминалов можно создавать локальную сеть, связанную с сервером данных. Сервер данных соединяется с программно-техническим комплексом (ПТК) для синхронизации по времени, просмотра состояния аналоговых и дискретных входов, изменения установок, просмотра, записи и удаления осциллограмм.

Терминал ТОР 300 РАС 50X осуществляет следующие основные функции:

- пуск при недопустимом изменении значений дискретных и аналоговых сигналов, симметричных составляющих, значений частоты;
- функция определения места повреждения.

Выбор оборудования уровня подстанции

Уровень подстанции – это третий, верхний уровень управления, на котором расположены, согласно [1–5], основные системы управления подстанцией, ПТК и автоматизированное рабочее место (АРМ) персонала ЦТП. В состав оборудования уровня подстанции входят:

- сервер управления цифровой тяговой

подстанции;

- сервер управления подстанционным оборудованием (SCADA);
- сервер контроля и связи;
- сервер сбора, хранения и передачи информации;
- АРМ персонала;
- сервер точного времени;
- средства гарантированного питания.

Объединение данного оборудования в единую технологическую сеть осуществляется через сетевое оборудование, которое включает коммутаторы, сетевые шлюзы, межсетевые экраны, конвертеры протоколов.

Канал связи строится на основе технологии «Ethernet» или не уступающей в параметрах производительности, надежности и защищенности.

Выбор основного сервера

В связи с наличием всех необходимых для ЦТП функций рекомендуется использовать серверный шкаф «Ш2800 01» компании «Релематика» (рис. 3), который предназначен для сбора, обработки, хранения и передачи информации.

Основные функции:

- сбор аналоговой и дискретной информации;
- ведение баз данных событий, трендов и действий персонала;
- синхронизация по времени компонентов АСУ ТП;
- интеграция со смежными подсистемами



Рис. 2. Терминал ИнТер
Fig.2. InTer terminal

(АСКУЭ, видеонаблюдением, охранной и пожарной сигнализациями и т. д.);

- горячее резервирование компонентов ПТК;
- тестирование и самодиагностика компонентов ПТК;
- поддержка различных типов каналов связи (RS-485, МЭК 61850, Ethernet, беспроводные сети).

Состоит шкаф из следующего оборудования:

- серверы (STSS Flagman, Lenovo (IBM) под управлением ОС MS Windows Server 2008R2 и выше);
- промышленные коммутаторы таких производителей, как Моха, Hirschmann, Etherwan;
- KVM (монитор, клавиатура, мышь, KVM-консоль);
- контроллер самодиагностики шкафа ОВЕН 100;



Рис. 3. Сервер сбора, хранения и передачи информации

Fig.3. Server for collection, storage and transfer of information

- сервер точного времени Метроном-200/300/600/900;
- источник бесперебойного питания;
- лампы сигнализации неисправности.

Выбор шкафа контроллеров присоединения

Шкаф контроллеров присоединения (КП) «Ш2800 02» обеспечивает мониторинг и управ-

ление оборудованием одного или нескольких присоединений электрической подстанции. Соответственно, его удобно использовать на ЦТП.

Основные функции КП:

- сбор аналоговой и дискретной информации коммутационных аппаратов;
- управление коммутационными аппаратами;
- оперативные блокировки разъединителей;
- интеграция со смежными подсистемами (охранной и пожарной сигнализации и т. д.);
- возможность применения схем резервирования компонентов.

Для реализации указанных функций шкаф Ш2800 02 оснащается следующими видами оборудования:

- контроллер присоединения;
- коммутаторы таких производителей, как Моха, Hirschmann, Etherwan;
- лампы сигнализации неисправности.

Выбор устройства сопряжения с объектом

В качестве устройства сопряжения с объектом (УСО) на ЦТП целесообразно использовать шкаф УСО «Ш2800 03» (рис. 4).



Рис. 4. Шкаф устройства сопряжения с объектом «Ш2800 03»

Fig.4. The Object interface device box «SH2800 03»

Его основные задачи:

- сбор дискретных сигналов и сигналов телеизмерения;

- передача сигналов телеуправления;
- обработка, временное хранение и передача информации.

Оборудование, устанавливаемое в шкафу:
– общеподстанционный контроллер ARIS C30X (C301, C302, C303);

- коммутаторы таких производителей, как Моха, Hirschmann, Etherwan;
- multifunctional измерительные преобразователи ЭНИП-2;
- лампы сигнализации неисправности.

Выбор шкафа связи

Шкаф связи «Ш2800 04» предназначен для сбора, промежуточной обработки, временного хранения и передачи технологической информации.

Шкаф связи выполняет следующие функции:

- объединение микропроцессорных устройств в единую локальную сеть Ethernet с применением соответствующих конверторов физических интерфейсов;

- объединение в локальную сеть смежных подсистем (охранной и пожарной сигнализаций);

- возможность применения резервирования компонентов, а также каналов с верхним уровнем;

- объединение устройств по различным типам каналов связи (RS-485, оптика, Ethernet, беспроводные сети).

Основное оборудование, устанавливаемое в шкафу:

- коммутаторы таких производителей, как Моха, Hirschmann, Etherwan;

- шлюз UniSCADA на базе контроллера ARIS CS;

- контроллер самодиагностики шкафа ОБЕН 100;

- сетевые экраны MOXA EDR-903 или Ruggedcom RX1500;

- лампы сигнализации неисправности.

Выбор устройства гарантированного питания

В качестве устройства гарантированного питания имеет смысл использовать шкаф гарантированного питания «Ш2800 05».

Основными функциями шкафа являются:

- обеспечение работы оборудования третьего уровня ЦТП в случае аварийного исчезновения напряжения;

- стабилизация напряжения;
- фильтрация питающего напряжения;
- защита от перегрузки и короткого замыкания;

- самодиагностика.

Для выполнения данных функций шкаф Ш2800 05 оснащается таким оборудованием, как:

- источник бесперебойного питания таких производителей, как APC, Eaton;

- инвертор производства Benning;

- контроллер самодиагностики шкафа производства ОБЕН 100;

- лампы сигнализации неисправности.

Технические средства охраны подстанции

Технические средства охраны ЦТП организуют комплексную автоматизированную систему управления безопасностью, обладающую возможностью мониторинга состояния объектов и их управления [6–16]. В состав этой комплексной системы входят несколько подсистем.

Подсистема *охранно-пожарной сигнализации* осуществляет быстрое информирование о случаях проникновения за ограждение или в помещения ЦТП посторонних лиц и о возникновении пожара на ЦТП. При этом она делится на охранно-пожарную сигнализацию (ОПС) и охранную сигнализацию периметра (ОСП).

Для организации ОСП используют высокочувствительный кабель, пропущенный в специальном спиралевидном металлическом барьере, смонтированном непосредственно на верхней границе ограждения ЦТП. Также к ее элементам относятся всепогодные пассивные инфракрасные извещатели, смонтированные на крыше здания ЦТП, въездных воротах.

ООПС монтируется в общеподстанционном пункте управления, в закрытых РУ, в насосной.

Подсистема охранного телевидения (СОТ) основана на использовании стационарных и поворотных видеокамер, видеорегистратора, коммутаторов, АРМ.

СОТ служит для наблюдения, верификации, регистрации событий, автоматического обнаружения проникновения.

С целью наблюдения за внутренней территорией ЦТП, включая контроль состояния электрооборудования, необходимо устанавливать поворотные видеокамеры.

С помощью стационарных видеокамер производится общий обзор территории ЦТП и

при необходимости выполняется приближение объектов для рассмотрения деталей. Расположение камер должно исключать непросматриваемые участки.

Видеорегистратор принимает сигналы с видеокамер и осуществляет их передачу пользователям. В АРМ персонала полученная пользователями информация может просматриваться для удобства в полноэкранном, мультиэкранном режиме или по заданной программе.

Подсистема тревожной сигнализации и охранного оповещения предназначена для обнаружения случаев незаконного проникновения на ЦТП и сообщения об этом в профильные службы по спутниковому каналу связи. В данной подсистеме используются стационарные и переносные тревожные кнопки, при нажатии которых срабатывает сирена для извещения персонала.

Телекоммуникационная подсистема служит для организации передачи данных и обмена информацией между указанными подсистемами. В ее состав входят кабели, кроссы и активное сетевое оборудование.

Подсистема оповещения на ЦТП и ее территории выполняет свои функции в таких случаях, как авария, пожар, стихийное бедствие,

нападение, с ее помощью осуществляется координация действий персонала ЦТП в таких случаях. Для оповещения используются рупорные громкоговорители.

Выбор системы пожаротушения трансформаторов

Автоматическими установками пожаротушению оснащаются следующие трансформаторы с номинальным напряжением обмотки высокого напряжения (ВН):

- 500 кВ и выше;
- 220–330 кВ и выше, мощностью 200 МВА и более;
- 220 кВ и выше, мощностью 63 МВА и более;
- 10 кВ и выше, мощностью 40 МВА и более (рис. 5).

При осуществлении пожаротушения маслонаполненного силового трансформатора ставятся задачи ликвидации горения (или снижение его интенсивности) и охлаждения. Для ликвидации горения в течение 3–5 минут на трансформатор подается пленкообразующая пена низкой кратности.

На рис. 6 приведены карты орошения для оросителей «Антифайер», используемых как

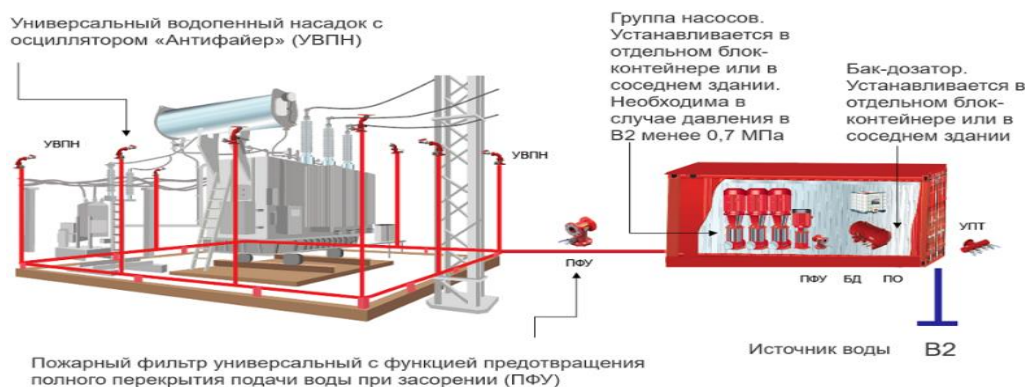


Рис. 5. Система пожаротушения
Fig.5. The firefighting system

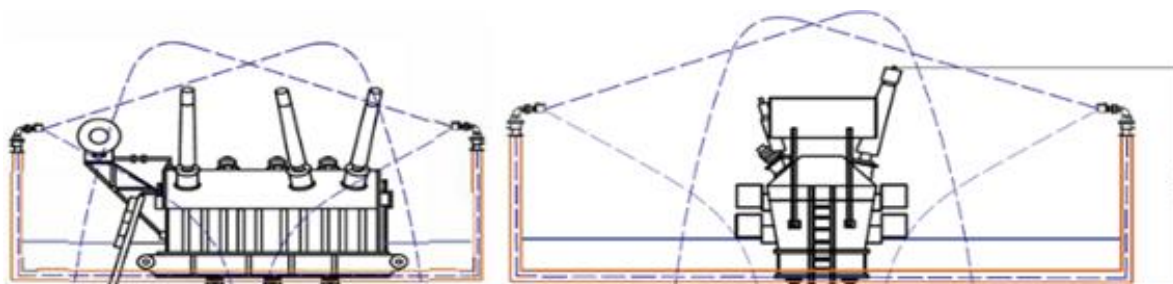


Рис. 6. Карты орошения
Fig.6. Watering maps

для подачи пены, так и для подачи воды. Их работа организована так, что за счет соударения струй образуется объем распыляемой пены или воды низкой кратности. За счет этого быстро снижается интенсивность пожара, а в дальнейшем посредством образования на горячей поверхности трансформаторного масла изолирующей пленки горение и вовсе прекращается. Вслед за этим осуществляется подача распыленной воды для интенсивного охлаждения трансформатора.

В рассмотренной системе пожаротуше-

ния применяются дренчерные оросители, универсальные водопенные насадки «Антифайер», которые разработаны и производятся в России предприятием ГК «Пожнефтехим».

Схема информационной сети цифровой тяговой подстанции

На рис. 7 показана схема информационной связи оборудования различных уровней.

Оборудование всех РУ и всех уровней связано между собой общей интеллектуальной сетью, по которой передается информация от системы мониторинга и диагностики. Также по

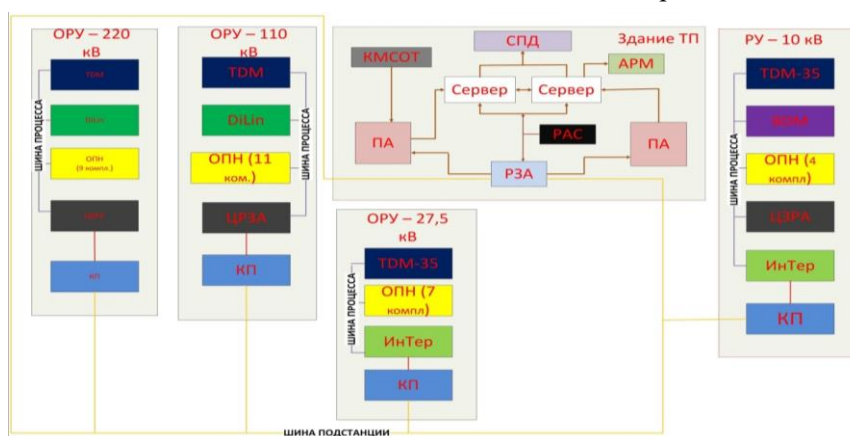


Рис. 7. Схема организации информационной сети

Fig.7. Setup scheme of information network

Таблица 2. Выбранное оборудование уровня присоединения

Table 2. The selected connection level equipment

Номинальное напряжение установки, кВ	Назначение устройства	Наименование устройства	Производитель
220 (110)	Защита присоединений 220, 110 кВ	ЦРЗА	ООО «Релематика»
27,5	Защита присоединений 27,5 кВ	ИнТер-825	ООО «НИИЭФА-Энерго»
10	Защита присоединений 10 кВ	ИнТер-825	
10	Защита присоединений 10 кВ	ЦРЗА	ООО «Релематика»

Таблица 3. Общеподстанционные устройства

Table 3. General substation devices

Тип оборудования	Наименование оборудования	Производитель
Оборудование уровня присоединения		
Противоаварийная автоматика	Ш2400 20,5	ООО «Релематика»
Регистрация аварийных событий	Ш2600 03.50X	
Программное обеспечение	ПТК «МИКРА ПРО»	
Программное обеспечение	ПТК «АСУ»	ООО «НИИЭФА-Энерго»
Оборудование уровня подстанции		
Общий сервер (основной и резервный)	Ш2800 01	ООО «Релематика»
Шкаф контроллеров присоединения	Ш2800 02	
Шкаф устройства сопряжения с объектом	Ш2800 03	
Шкаф связи	Ш2800 04	
Шкаф гарантированного питания	Ш2800 05	
Программное обеспечение	ПТК «Uniscada»	

данной сети передаются показания терминалов микропроцессорной защиты. После приема данных сервером, он обрабатывает полученную информацию и в последующем передает ее в АРМ и далее с помощью средств передачи данных.

Виды выбранных устройств и оборудования для установки на ЦТП в рамках второго и третьего уровней сведены в табл. 2 и 3.

Заключение

Использование приведенного оптимального оборудования для второго и третьего

уровней ЦТП и разработанной схемы информационной сети позволит реализовать не только второй и третий уровни, но и первый, а также будет способствовать выполнению задач, поставленных в области цифровизации системы электроснабжения железнодорожного транспорта, отраженных в энергетической стратегии развития РФ до 2035 г., направленных на повышение безопасности осуществления перевозок [17–25].

Список литературы

1. Кустов А.Н., Зацепина В.И., Бялы В. Возможные внедрения цифровых технологий в энергетический комплекс // Вести высш. учеб. заведений Черноземья. 2021. № 4 (66). С. 9–17.
2. СТО 56947007-29.240.10.299-2020 Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС. М. : ПАО «ФСК ЕЭС», 2020. 125 с.
3. Король Ю.Н. Концепция цифровой тяговой подстанции. М. : Трансэнерго 2020. 28 с.
4. Электротехнический завод «ВЕКТОР». Цифровая подстанция МЭК 61850 : буклет. М., 2020. 22 с. URL: https://etzvektor.ru/storage/document/file_46.pdf (Дата обращения 20.04.2020).
5. Казаков Д.О., Пузина Е.Ю. Технические решения по цифровизации тяговых подстанций // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 227-237.
6. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. «Применение систем мониторинга на силовых трансформаторах тяговых подстанций ВСЖД // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : XXI Межвуз. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. С. 7–12.
7. Крюков А.В., Куций А.П., Черепанов А.В. Применение управляемых источников реактивной мощности в системах электроснабжения железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы конф. Иркутск, 2016. Т. 1. С. 588–593.
8. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск : Изд-во ИРГУПС, 2020. 184 с.
9. Пузина Е.Ю. Оценка остаточного ресурса тяговых трансформаторов Северного хода ВСЖД // Транспорт-2013 : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2013. С. 173–175.
10. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features / K. Firuzi, M. Vakilian, B. Toan Phung et al. // Power Delivery IEEE Transactions. 2019. Vol. 34, №. 2. P. 542–550.
11. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493986.
12. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer / X. Zhu, M. Chen, S. Xie et al. // IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115. DOI:10.1109/ICIRT.2016.7588719.
13. Kalathiripi H., Karmakar S. Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques // IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester, 2017. P. 1–5.
14. Система мониторинга состояния изоляции / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.А. Хамнаева и др. // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 50–52.
15. Определение остаточной несущей способности металлических конструкций контактной сети / В.П. Ступицкий, И.А. Худоногов, В.А. Тихомиров и др. // Известия Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 88–99.
16. Тихомиров В.А. Повышение эффективности процесса сушки изоляции тяговых электрических машин подвижного состава : дис. ... канд. техн. наук / Омский государственный университет путей сообщения. Иркутск, 2012. 205 с.
17. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers' residual service life // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743069.
18. Применение распределенного мониторинга качества электрической энергии в MICROGRID / К.В. Суслов, Н.Н. Солонина, А.С. Смирнов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2014. № 6 (89). С. 185–189.
19. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation // International Russian Automation Conference. 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
20. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2020. DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.

21. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The use “Technical rigidity” indices to assess climatic factors effects on power transformers reliability // International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon. 2020. pp. 136–141.
22. Системы мониторинга и диагностические приборы для контроля технического состояния высоковольтного оборудования // Dimrus : сайт. URL: <https://dimrus.ru/manuals/dimrus2019.pdf> (Дата обращения 01.02.2022).
23. Устройство мониторинга высоковольтного выключателя АВМ-ВК. Руководство по эксплуатации. М., 2011. URL: <https://docplayer.com/87161434-Ustroystvo-monitoringa-vysokovoltного-vyklyuchatelya-avm-vk.htm> (Дата обращения 01.02.2022).
24. Комплекс мониторинга систем оперативного тока серии КМСОТ «Дубна» // Техноэнергокомплект : сайт. URL: <https://thc-samara.ru/product/sistema-operativnogo-postoyannogo-toka/sistemy-raspredeleniya-postoyannogo-toka/kompleks-monitoringa-operativnogo-toka/kompleks-monitoringa-sistemy-operativnogo-toka-kmsot-m-dubna/> (Дата обращения: 01.02.2022).
25. Обеспечение безопасности сложных технических систем (технологические подходы) / С.В. Елисеев, В. Гозбенко, Н.М. Быкова и др. Деп. ВИНИТИ РАН 17.04.2008, № 328-B2008.

References

1. Kustov A.N., Zatssepina V.I., Byaly V. Vozmozhnye vnedreniya tsifrovyykh tekhnologii v energeticheskii kompleks [Possible implementation of digital technologies in the energy complex]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya* [Conduct of higher educational institutions of the Chernozem region]. 2021, no 4(66), pp. 9-17.
2. Standart organizatsii STO 56947007- 29.240.10.299-2020 «Tsifrovaya podstantsiya. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu TSPS» [Digital substation. Methodological guide lines for the design of the CPS. Standard of the organization 56947007- 29.240.10.299-2020]. Moscow: FSK EES Publ., 2020. 125 p.
3. Korol Yu. N. Kontseptsiya tsifrovoi tyagovoi podstantsii [The concept of a digital traction substation]. Moscow: Transenergo Publ., 2020. 28 p.
4. Tsifrovaya podstantsiya MEK 61850 [Digital Substation IEC 61850]. Votkinsk: Elektrotekhnicheskii zavod «VEKTOR» Publ., 2020. 22 p.
5. Kazakov D.O., Puzina E.Yu. Tekhnicheskie resheniya po tsifrovizatsii tyagovykh podstantsiy [Technical solutions for digitalization of traction substations]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia]. 2021, no 1(11), pp. 227-237.
6. Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Primenenie sistem monitoringa na silovykh transformatorakh tyagovykh podstantsii VSZHD [Application of monitoring systems on power transformers of traction substations of VSZHD]. *Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii na zhelezнодорожном транспорте»* [Proceedings of the XXI Interuniversity Scientific and Practical Conference «Innovative technologies in railway transport»]. Krasnoyarsk, 2017, pp. 7-12.
7. Kryukov A.V., Kutsyi A.P., Cherepanov A.V. Primenenie upravlyаемых istochnikov reaktivnoi moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [The use of controlled sources of reactive power in railroad power supply systems]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2016, Vol. 1, pp. 588-593.
8. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii [Monitoring systems for power transformers of traction substations]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2020. 184 p.
9. Puzina E.Yu. Otsenka ostatochnogo resursa tyagovykh transformatorov Severnogo khoda VSZHD [Evaluation of the residual service life of the Northern route traction transformers East Siberian Railroad]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport-2013»* [Proceedings of the International scientific and practical conference «Transport-2013»]. Rostov-on-Don, 2013, Vol. 3, pp. 173-175.
10. Keyvan Firuzi, Mehdi Vakilian, B. Toan Phung, Trevor R. Blackburn, "Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features," Power Delivery IEEE Transactions on, vol. 34, no. 2, pp. 542–550, 2019.
11. Y. Dang and W. Chen, "Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect," 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, pp. 1–4, 2018.
12. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, Shaofeng Xie and Jie Luo, "Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer," 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), Birmingham, pp. 111–115, 2016.
13. H. Kalathiripi and S. Karmakar, "Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques," 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, pp. 1–5, 2017.
14. Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Divinets M.A., Korsun A.A. Sistema monitoringa sostoyaniya izolyatsii [Insulation condition monitoring system]. *Zhelezнодорожный транспорт* [Railway transport]. 2021, no 3, pp. 50-52.
15. Stupitskii V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Opredelenie ostatochnoi nesushchei sposobnosti metallicheskiikh konstruksii kontaknoi seti [Determination of the residual bearing capacity of metal structures of the contact network]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletin of Transsib]. 2019, no 3 (39), pp. 88-99.
16. Tikhomirov V.A. Povyshenie effektivnosti protsessa sushki izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava [Improving the efficiency of the insulation drying process of traction electric vehicles of rolling stock]. Ph.D's thesis, Irkutsk, 2012, 205 p.
17. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers' residual service life. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 10.1109/ICIEAM.2019.8743069.
18. Suslov K.V., Solonina N.N., Smirnov A.S., Solonina Z.V. Primenenie raspredelennogo monitoringa kachestva elektricheskoi energii v MICROGRID [Application of distributed monitoring of the quality of electrical energy in MICROGRID]. *Vestnik*

Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. 2014, no 6 (89), pp. 185-189.

19. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.

20. Khudonogov I.A., Puzina, E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer (2020) Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.

21. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The use «Technical rigidity» indices to assess climatic factors effects on power transformers reliability. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020. 2020, pp. 136-141.

22. Sistemy monitoringa i diagnosticheskie pribory dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'nogo oborudovaniya [Monitoring systems and diagnostic devices for monitoring the technical condition of high-voltage equipment]. Available at: <https://dimrus.ru/manuals/dimrus2019.pdf> (Accessed February 1, 2022).

23. Ustroystvo monitoringa vysokovol'nogo vyklyuchatelya AVM-VK. Rukovodstvo po ekspluatatsii [AVM-VK high-voltage switch monitoring device. Operation Manual]. Available at: <https://docplayer.com/87161434-Ustroystvo-monitoringa-vysokovol'nogo-vyklyuchatelya-avm-vk.htm> (Accessed February 01, 2022).

24. Kompleks monitoringa sistem operativnogo toka serii KMSOT «Dubna» [Monitoring complex for operational current systems of the KMSOT series «Dubna»]. Available at: <https://thc-samara.ru/product/sistema-operativnogo-postoyannogo-toka/sistemy-raspredeleniya-postoyannogo-toka/kompleks-monitoringa-operativnogo-toka/kompleks-monitoringa-sistemy-operativnogo-toka-kmsot-m-dubna/> (Accessed February 1, 2022).

25. Eliseev S.V., Gozbenko V.E., Bykova N.M. etc. Obespechenie bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem (tekhnologicheskie podkhody) [Mine ensuring the safety of complex technical systems (technological approach)]. *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript]. VINITI RAN no 328-V2008. April 17, 2008.

Информация об авторах

Пузина Елена Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: lena-rus05@mail.ru

Information about the authors

Elena Yu. Puzina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment «Electric Power Industry of Transport», Irkutsk State Transport University; the Subdepartment «Power Supply and Electrical Engineering», Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: lena-rus05@mail.ru