

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ

Прасол Д.А., Саенко А.А.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

Работа посвящена актуальной теме применения цифровых технологий и решений в современной электроэнергетике и концепции цифровой трансформации электрической энергии. Рассматривается вопрос организации и построения цифровых подстанций, как одного из ведущих направлений в современной электроэнергетике. В работе приведены основные технические и организационные решения, характерные для построения цифровых подстанций на базе открытых протоколов международного стандарта МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях». Дается общая оценка состояния понизительных подстанций в энергосистеме Белгородской области. В качестве объекта исследования приводится и анализируется схема одной из типовых подстанций в энергосистеме Белгородской области. Для рассмотренной подстанции предложена концепция её модернизации с применением цифровых технологий и решений для соответствия термину «Цифровая подстанция» и в соответствии с требованиями международного стандарта МЭК 61850. Причем концепция модернизации предлагается как с учетом достижения необходимых функций управления подстанцией, так и в соответствии существующим уровнем отечественной энергетической промышленности и состоянием электрических сетей региона. Предложенная модернизация приведет к повышению уровня управляемости и наблюдаемости подстанции, уменьшению затрат на мониторинг и самодиагностику вторичных связей, поднятию уровня интеллектуального управления режимом работы силового оборудования и вторичных систем. Кроме этого она обеспечит поэтапную модернизацию действующих подстанций региона в направлении их цифровизации.

Ключевые слова: цифровая подстанция, стандарт МЭК 61850, цифровая трансформация 2030, интеллектуальные электронные устройства, локальная вычислительная сеть, релейная защита и автоматика.

THE CONCEPT OF MODERNIZING ELECTRICAL SUBSTATIONS IN THE ENERGY SYSTEM OF THE BELGOROD REGION USING DIGITAL TECHNOLOGIES AND SOLUTIONS

Dmitriy Prasol, Andrey Saenko

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract

The work is devoted to the current topic of using digital technologies and solutions in modern electric power industry and the concept of digital transformation of electrical energy. The issue of organizing and constructing digital substations is considered as one of the leading trends in the modern electric power industry. The paper presents the main technical and organizational solutions typical for the construction of digital substations based on open protocols of the international standard IEC 61850 "Networks and communication systems in substations." A general assessment of the condition of step-down substations in the power system of the Belgorod region is given. As an object of study, the diagram of one of the typical substations in the power system of the Belgorod



region is presented and analyzed. For the considered substation, a concept for its modernization has been proposed using digital technologies and solutions to comply with the term "Digital Substation" and in accordance with the requirements of the international standard IEC 61850. Moreover, the modernization concept is proposed both taking into account the achievement of the necessary substation control functions, and in accordance with the existing level domestic energy industry and the state of the region's electrical networks. The proposed modernization will lead to an increase in the level of controllability and observability of the substation, a reduction in the costs of monitoring and self-diagnosis of secondary connections, and an increase in the level of intelligent control of the operating mode of power equipment and secondary systems. In addition, it will ensure the gradual modernization of existing substations in the region in the direction of their digitalization.

Keywords: digital substation, IEC 61850 standard, digital transformation 2030, intelligent electronic devices, local area network, relay protection and automation.

Введение (Introduction)

Цифровые технологии давно и прочно вошли во многие сферы человеческой деятельности, не является исключением и электроэнергетика.

Во исполнение указа Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» разработана и утверждена советом директоров ПАО «Россети» концепция «Цифровая трансформация 2030». Эта концепция предполагает полное преобразование энергетической электросетевой инфраструктуры до 2030 года посредством внедрения цифровых технологий. Данный переход к цифровым технологиям и решениям, которые применяются на электрических подстанциях и в распределительных электрических сетях, является одним из ведущих направлений в современной электроэнергетике [1–3].

Одной из важнейших технологических составляющих цифровой трансформации электросетевого комплекса является цифровая подстанция. Цифровой подстанцией называется подстанция, в которой всё оборудование находится в единой цифровой среде, то есть подключено к одной сети, а организация по передаче, приёму и управлению потоками информации при решении задач мониторинга, анализа и удалённого управления технологическими процессами осуществляется в цифровой форме в режиме единого времени на базе открытых протоколов международного стандарта МЭК 61850 [4].

Термин «Цифровая подстанция» неразрывно связан с международным стандартом МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях», который описывает форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов энергообъекта, стандартизирует язык конфигурирования подстанций, устройств и функций [5]. Стандарт распространяется на строительство новых подстанций, а также на реконструкцию и техническое перевооружение действующих подстанций.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Работа и управление цифровыми подстанциями базируется на программно-техническом комплексе цифровой подстанции (ПТК ЦПС) [5, 6], который подразделяется на 3 структурных уровня:

- уровень подстанции;
- уровень присоединения;
- уровень процесса.

Структурные уровни объединяются между собой посредством сегментов локально-вычислительной сети (ЛВС) Ethernet. Сегменты ЛВС образуют шину процесса, объединяющую уровни процесса и присоединения, и шину подстанции, объединяющую



уровни присоединения и подстанции (рис. 1). Инструментами объединения различного оборудования подстанции в её информационную систему являются следующие протоколы:

- MMS (МЭК 61850-8-1) – для интеграции оборудования в систему АСУ ТП;
- GOOSE (МЭК 61850-8-1) – для передачи дискретной информации между терминалами РЗА и первичным оборудованием;
- SV (МЭК 61850-9-2) – для передачи оцифрованных аналоговых измерений.

Таким образом, основная идея цифровой подстанции заключается в организации всех информационных потоков взаимодействия систем мониторинга, анализа и удалённого управления в цифровой форме.

В энергосистеме Белгородской области продолжается процесс модернизации электрических подстанций. С каждым годом становится больше системообразующих питающих центров, которые управляются дистанционно. Каждый такой проект на один шаг приближает отрасль к цифровой электроэнергетике будущего.

С другой стороны, в энергосистеме Белгородской области имеется ряд действующих подстанций, срок эксплуатации которых, превышает полный установленный срок службы для трансформаторной подстанции, который нормируется нормативной документацией. Такие подстанции нуждаются в реконструкции и техническом перевооружении с переходом на микропроцессорную элементную базу и единый цифровой стандарт. Данные мероприятия связаны с физическим и моральным устареванием энергетического оборудования, которое выработало свой ресурс, и дальнейшая его эксплуатация не гарантирует высокой надёжности и безопасности электроснабжения. Значительный износ электрооборудования может приводить к частым отключениям потребителей электроэнергии. Кроме того, существует риск возникновения аварийных ситуаций из-за наличия масляной изоляционной среды в некоторых видах оборудования, что может привести к взрыво- и пожароопасности. Эксплуатационные и ремонтные издержки, установленного на подстанциях оборудования уже давно вышли за допустимые рамки. Передача аналоговых данных между первичным и вторичным оборудованием на таких подстанциях осуществляется при помощи медных кабельных связей, что приводит к увеличению суммарной длины электрических кабелей. Также на данных энергообъектах различные подсистемы используют большое количество различных коммуникационных стандартов (протоколов), усложняющих процесс передачи данных [7].

Реализация основных идей и принципов построения цифровой подстанции, в соответствии со стандартом МЭК 61850, предлагается к рассмотрению на примере типовой понизительной подстанции энергосистемы Белгородской области классом напряжения 110 кВ, для которой также характерны указанные выше недостатки. Такая подстанция предназначена для электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей. По способу присоединения к энергосистеме подстанция является проходной, включается в расщелку одной линии с двусторонним питанием.

Подстанция состоит из следующих основных узлов: открытого распределительного устройства 110 кВ (ОРУ 110 кВ) и комплектного распределительного устройства наружной установки 10 кВ (КРУН 10 кВ), которые связаны между собой через два силовых двухобмоточных трансформатора связи Т1 и Т2; силовых коммутационных аппаратов (высоковольтных выключателей, разъединителей и заземляющих ножей), посредством которых осуществляется подключение всех присоединений в РУ к общим участкам токоведущих шин (сборным шинам); устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА и ПА), выполненных на аналоговых электромеханических реле; ячейки телемеханики и связи; помещения общеподстанционного пункта управления (ОПУ) (рис. 2).



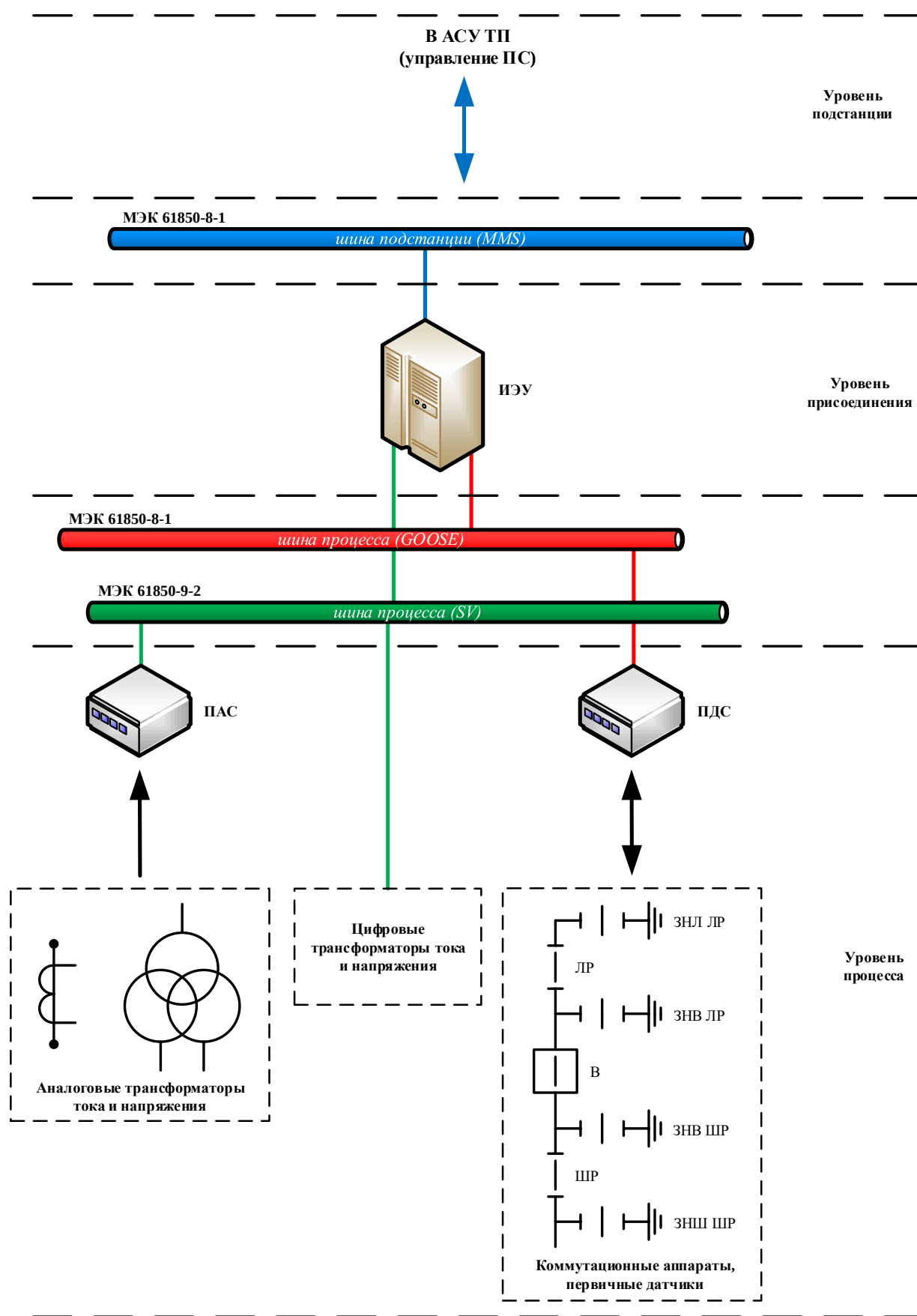


Рис. 1. Структурные уровни и шины цифровой подстанции



ОРУ 110 кВ выполнено по схеме «мостик» с масляными выключателями в цепях воздушных линий 110 кВ и ремонтной перемычкой с двумя разъединителями со стороны линий. Для обеспечения транзита воздушные линии 110 кВ соединены между собой через секционный масляный выключатель 110 кВ (выключатель мостика) и секционные разъединители (рис. 2).

КРУН 10 кВ выполнено по схеме с одной одиночной, секционированной выключателем, системой сборных шин. Питание первой секции шин 10 кВ осуществляется от трансформатора Т1, питание второй секции – от трансформатора Т2 через вводные масляные выключатели. Большинство высоковольтных выключателей отходящих линий 10 кВ также имеют масляную изоляционную среду (рис. 2).

Анализ схемы подстанции показывает, что большая часть оборудования ОРУ 110 кВ и КРУН 10 кВ выработала свой ресурс, нуждается в комплексной модернизации и повышении уровня автоматизации управления оборудованием с применением интеллектуальных систем управления режимами работы оборудования и вторичных систем в соответствии с требованиями стандартов серии МЭК 61850 [7].

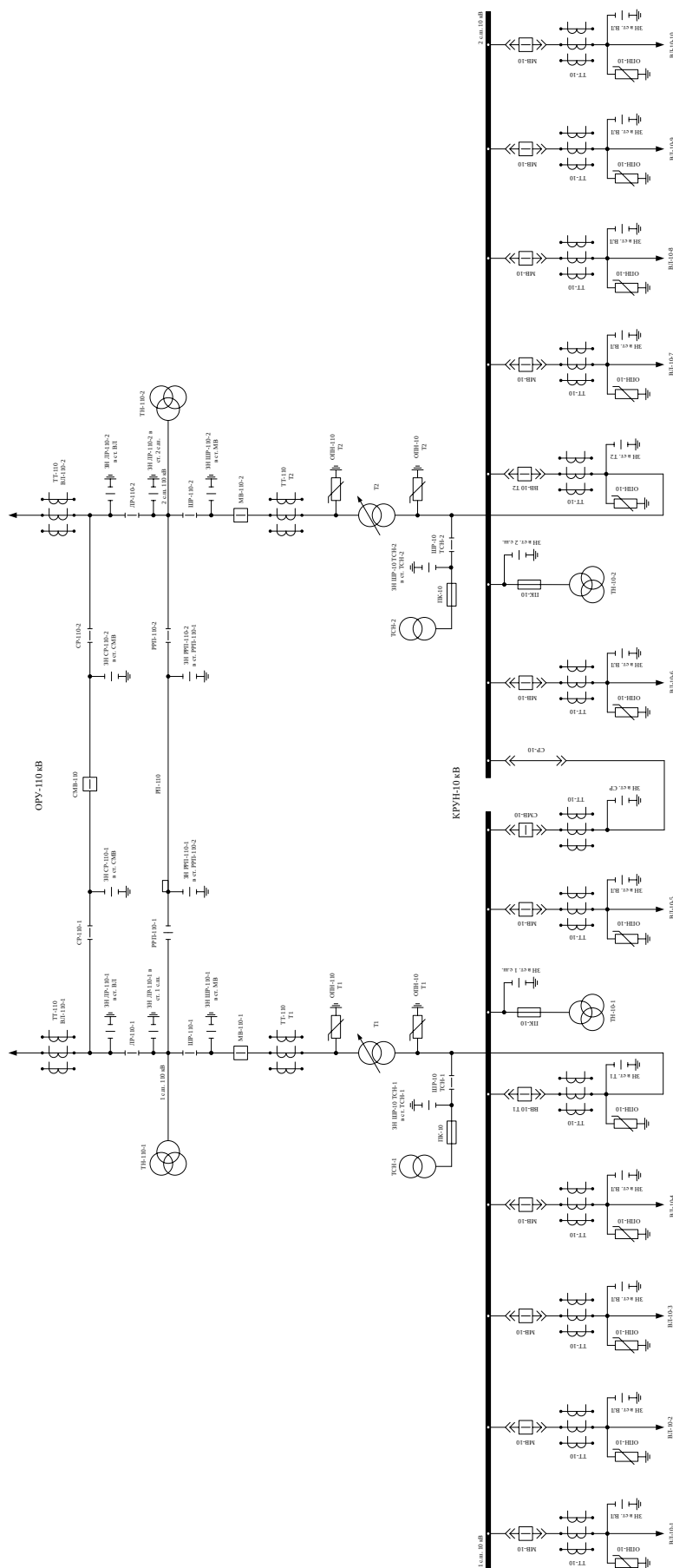


Рис. 2. Однолинейная схема электрических соединений подстанции



Результаты (Results)

В настоящее время во многих сетевых компаниях есть большой опыт построения систем АСУ ТП с применением стандарта МЭК 61850-8-1 на подстанционном уровне. Чего нельзя сказать об уровне процесса и присоединения [8, 9].

Одним из проблемных аспектов построения схем цифровых подстанций является то, что отечественной промышленностью в настоящее время цифровые (интеллектуальные) высоковольтные выключатели не выпускаются и находятся на стадии разработки, а стоимость цифровых измерительных трансформаторов на сегодняшний момент на порядок выше стоимости традиционных электромагнитных. Поэтому на уровне процесса цифровой подстанции более рациональным является формирование цифрового интерфейса коммутационных аппаратов и измерительных трансформаторов тока и напряжения с устройством сопряжения с объектом (преобразователи аналоговых сигналов (ПАС), преобразователи дискретных сигналов (ПДС)). Исходя из схемы ОРУ 110 кВ подстанции для исключения отказа работоспособности функций ПАС и ПДС выполняется резервирование данных устройств. Для ячеек КРУН 10 кВ в целях оптимизации возможна установка комбинированного устройства, совмещающего в себе функции ПАС и ПДС (ПАДС). Преимуществами передачи аналоговых и дискретных сигналов в цифровом виде являются: сокращение числа линий связи внутри ячеек и между ячейками, повышение электромагнитной совместимости устройств, благодаря применению оптоволоконных оптических линий связи. Во время передачи цифрового сигнала, а также во время его обработки во вторичном оборудовании не добавляется никаких дополнительных погрешностей. Этим обеспечивается соответствие требованиям, как по релейной защите, так и по измерениям [7-9].

Цифровыми решениями, применяемыми на уровне присоединения, является использование интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) – микропроцессорных терминалов РЗА, в которых реализована поддержка протоколов обмена по стандарту МЭК 61850. Основная функция данных устройств связана с реализацией функций по защите и автоматике присоединения. Дополнительные функции связаны с выполнением функций контроллера присоединения. Связь между устройствами РЗА осуществляется по протоколу МЭК 61850-8-1, посредством обмена GOOSE-сообщениями. Для этих целей в терминале РЗА выделены два порта с поддержкой протокола PRP, по которым идёт обмен GOOSE-сообщениями для передачи дискретных сигналов контроля и управления оборудованием. По этим же портам идёт обмен GOOSE-сообщениями с преобразователями дискретных сигналов (ПДС). Связь между преобразователями аналоговых сигналов (ПАС) и терминалами РЗА для передачи SV-поток организована по протоколу МЭК 61850-9-2 через два других порта, также с использованием протокола резервирования PRP. Протокол PRP использует бесшовное (дублированное) резервирование, благодаря чему информация передаётся одновременно в каждую из подсетей, обеспечивая надёжность передачи данных. Также для синхронизации времени применяется протокол точного времени PTP. Применение данного протокола позволяет устройствам, подключённым к шине процесса в режиме реального времени производить мониторинг состояния энергосистемы и оперативно фиксировать возникновение аварийных ситуаций. Предлагаемая структурная схема реализуемой цифровой подстанции в результате модернизации представлена на рис. 3.

Выводы (Conclusion)

В результате, реализация предложенных цифровых технологий и решений на действующих подстанциях энергосистемы Белгородской области обеспечит:

- сокращение суммарной длины электрических кабелей и вторичных цепей;
- повышение уровня управляемости и наблюдаемости;





- При этом предложенная концепция модернизации учитывает существующий уровень отечественной энергетической промышленности; позволяет применять электрооборудование, терминалы связи и обработки данных только отечественного производства, а также учитывает состоянием электрических сетей региона.

Предложенная концепция модернизации подстанций в энергосистеме Белгородской области с применением цифровых технологий и решений должна обеспечить поэтапную модернизацию действующих подстанций в направлении их цифровизации.

Информация о финансировании (Acknowledgments)

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Библиографический список

1. Майоров А.В. Развитие системы оперативно-технологического управления электросетевым комплексом в рамках концепции цифровой трансформации 2030 // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № S2 (13). – С. 2-7. EDN: [HMDFRL](#)
2. Майоров А.В. Технические решения для повышения надежности эксплуатации распределительных электрических сетей в рамках цифровой трансформации // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № S3 (14). – С. 2-6. EDN: [RTGWFR](#)
3. Шилова Л.А., Адамцевич А.О. Интеграция цифровых технологий как ключевой фактор развития Российской энергетики // Энергетическая политика. – 2020. – № 9 (151). – С. 60-73. DOI: [10.46920/2409-5516_2020_9151_60](#). EDN: [PCLTXC](#)
4. Саенко А.А. Анализ, обоснование и выбор архитектуры цифровой подстанции // В сб.: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук. Сб. докл. Национальной конф. с межд. участием. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2022. – С. 522-527. EDN: [FNOXXS](#)
5. Зацепина В.И., Кудрявцев А.Е. Основы построения цифровой подстанции // В сб.: Актуальные вопросы тепло- и электроэнергетики. Мат-лы Всеросс. научно-техн. конф. с межд. участием. – Грозный: РПК «Спектр»; ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, 2021. – С. 78-82. EDN: [PEYPIE](#)
6. Основы построения цифровых подстанций в рамках концепции «Цифровая трансформация 2030» / Л.П. Андрианова, З.Х. Павлова, М.И. Хакимьянов, Р.Т. Хазиева // В сб.: Всероссийский педагогический форум. Сб. ст. II Всеросс. научно-метод. конф. – Петрозаводск: МЦНП «Новая Наука», 2020. – С. 348-360. DOI: [10.46916/20112020-1-978-5-00174-039-1](#). EDN: [BYQHRN](#)
7. Цифровизация энергообъектов: задачи и их решения / Е.С. Воробьев, В.А. Наумов, В.И. Антонов и др. // В сб.: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Мат-лы III Межд. научно-техн. конф. – Чебоксары: ЧГУ, 2019. – С. 267-272. EDN: [EXJGYA](#)
8. Гаврилов Ф.В. Основные преимущества и недостатки цифровой электрической подстанции // Теория и практика современной науки. – 2018. – № 6 (36). – С. 169-173. EDN: [YAVMIH](#)
9. Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 9-27. DOI: [10.46960/2658-6754_2018_1_9](#). EDN: [YOYWMH](#)

References

1. Mayorov, A. V. (2019). Razvitiye sistemy` operativno-texnologicheskogo upravleniya e`lektrosetevy`m kompleksom v ramkax koncepcii cifrovoj transformacii 2030 [Development of an operational and technological management system for the electric grid complex within the framework of the concept of digital transformation 2030]. *E`lektroe`nergiya. Peredacha i raspredelenie*, S2 (13), 2-7. [In Russian]
2. Mayorov, A. V. (2019). Texnicheskie resheniya dlya povы`sheniya nadezhnosti e`kspluatatsii raspredelitel`ny`x e`lektricheskix setej v ramkax cifrovoj transformacii // *E`lektroe`nergiya. Peredacha*



- i raspredelenie. – 2019. – № S3 (14). – S. 2-6. EDN: RTGWFR [Technical solutions to improve the reliability of operation of electrical distribution networks as part of digital transformation]. *E'lektroe`nergiya. Peredacha i raspredelenie, S3 (14), 2-6.* [In Russian]
3. Shilova, L. A., & Adamtsevich, A. O. (2020). Integraciya cifrovyy`x texnologij kak klyuchevoj faktor razvi-tiya Rossijskoj e`nergetiki [Integration of digital technologies as a key factor in the development of Russian energy]. *E`nergeticheskaya politika, 9(151), 60-73.* https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_9151_60 [In Russian]
 4. Saenko, A. A. (2022). Analiz, obosnovanie i vy`bor arxitektury` cifrovoj podstancii [Analysis, justification and selection of digital substation architecture] In *Proc. of Mezhdunarodnaya nauchno-texnicheskaya konferenciya molody`x ucheny`x BGTU im. V.G. Shuxova* (pp. 522-527). Izd-vo BGTU [In Russian]
 5. Zatsepina, V. I., & Kudryavtsev, A. E. (2021). Osnovy` postroeniya cifrovoj podstancii [Basics of building a digital substation]. In *Proc. of Aktual`ny`e voprosy` teplo- i e`lektroe`nergetiki* (pp. 78-82). RPK «Spektr»; GGNTU im. akad. M.D. Millionshhikova. [In Russian]
 6. Andrianova, L. P., Pavlova, Z. X., Hakimyanov, M. I., & Haziyeva, R. T. (2020). “Osnovy` postroeniya cifrovyy`x podstancij v ramkax koncepcii «Cifrovaya transformaciya 2030” [Basics of building digital substations within the framework of the “Digital Transformation 2030” concept]. In *Proc. of All-Russian Pedagogical Forum* (pp. 348-360). ICSP “New Science”. <https://doi.org/10.46916/20112020-1-978-5-00174-039-1> [In Russian]
 7. Vorobyov, E. S., Naumov, V. A., Antonov, V. I., Soldatov, A. V., & Mitin, D. A. (2019). Cifrovizaciya e`nergoob`ektov: zadachi i ix resheniya [Digitalization of energy facilities: challenges and their solutions]. In *Proc. of Problemy` i perspektivy` razvitiya e`nergetiki, e`lektrotexniki i e`nergoe`ffektivnosti* (pp. 267-272). ChGU. [In Russian]
 8. Gavrilov, F. V. (2018). Osnovny`e preimushhestva i nedostatki cifrovoj e`lektricheskoy podstancii [Main advantages and disadvantages of digital electrical substation]. *Teoriya i praktika sovremennoj nauki, 6 (36), 169-173.* [In Russian]
 9. Loskutov, A. B. (2018). Problemy` perexoda e`lektroe`nergetiki na cifrovyy`e texnologii [Problems of transition of the electric power industry to digital technologies]. *Intellektual'naya e`lektrotexnika, 1, 9-27.* https://doi.org/10.46960/2658-6754_2018_1_9 [In Russian]

Сведения об авторах

Прасол Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и автоматика», БГТУ им. В.Г. Шухова, e-mail: dapras@mail.ru, ORCID [0000-0003-4369-8173](https://orcid.org/0000-0003-4369-8173).

Саенко Андрей Александрович, инженер по релейной защите и автоматике, служба релейной защиты, автоматике, измерений и метрологии, Филиал ПАО «Россети Центр» – «Белгородэнерго», e-mail: mr.andrey.sa@mail.ru.

Authors about

Dmitriy Prasol, Cand. of Tech. Sciences, department «Electric power and automation», BSTU named after V.G. Shukhov, e-mail: dapras@mail.ru, ORCID [0000-0003-4369-8173](https://orcid.org/0000-0003-4369-8173).

Andrey Saenko, relay protection and automation engineer, relay protection, automation, measurement and metrology service, Branch of Public Joint stock company «Rosseti Centre» - «Belgorodenergo», e-mail: mr.andrey.sa@mail.ru

