Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю.
I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko, E. Yu. Tryapkin

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ASSESSMENT OF THE DIGITALIZATION LEVEL OF RAILWAY TRANSPORT ELECTRIC POWER INFRASTRUCTURE

Игнатенко Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: eao79@yandex.ru.
Ivan V. Ignatenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: eao79@yandex.ru.

Власенко Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: vsa_ens@mail.ru.
Sergey A. Vlasenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: vsa_ens@mail.ru.

Тряпкин Евгений Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: evgenmehanik@mail.ru.
Evgeny Yu. Tryapkin – Senior Lecturer, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: evgenmehanik@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрен переход на управление тяговой подстанцией железной дороги за счёт использования различных типов построения систем управления потоками информации, а также взаимодействия с другими объектами. Проведение анализа работы цифровых технологий обмена информацией на информационных моделях цифровых подстанций и ускорения внедрения в эксплуатацию является актуальной задачей для развития цифровой железной дороги в целом.

Summary. The article considers the transition of control of a railway traction substation through the use of various types of building information flow control systems, as well as interaction with other objects. Analyzing the work of digital technologies for information exchange on information models of digital substations and accelerating the introduction into operation is an urgent task for the development of the digital railway as a whole.

Ключевые слова: цифровизация, цифровые технологии, уровень цифровизации, цифровая тяговая подстанция, системы тягового электроснабжения, электроэнергетика.

Key words: digitalization, digital technologies, digitalization level, digital traction substation, traction power supply systems, electric power industry.

УДК 621.311

Трансформация железной дороги при переходе на управление с помощью современных информационных технологий [1] требует разработки ряда информационных моделей устройств, существующих только в определённых сегментах, например в системе тягового электроснабжения. Попытка внедрения технологии обмена информацией для реализации информационного обмена в электроэнергетической инфраструктуре при управлении режимами работы электрических сетей за счёт только технического перевооружения оборудования может быть недостаточной [2]. В тяговом электроснабжении очень важным фактором является взаимодействие между службами тяги, пути, сигнализации, управления движением. Качественная интеграция всех причастных

служб в единый информационный процесс мониторинга и управления повысит эффективность её применения [3]. Одним из первых элементов в системе тягового электроснабжения является тяговая подстанция. Сложность управления отдельными устройствами, а также обеспечение надёжности не позволяют допустить отклонений от требуемых технологических параметров [4]. Поэтому проведение анализа работы цифровых технологий обмена информацией на информационных моделях цифровых подстанций с оценкой экономического эффекта [5] и ускорения внедрения в эксплуатацию является актуальной задачей для развития цифровой железной дороги в целом [6].

Уровень цифровизации подстанции – совокупность принятого типа структурных и функциональных схем организации информационных потоков и объёма внедрения цифровых систем на подстанции, подлежащей обновлению, реконструкции, расширению или новому строительству [7].

Цифровая тяговая подстанция представляет собой сложный информационно-технический объект, реализацию которого целесообразно разделить на несколько этапов в зависимости от глубины цифровизации, применяемых технологий, состава информационных потоков и получаемых результатов. Можно выделить 4 типа цифровых подстанций, характеризующихся этапностью применения технических решений, основанных на принятых ранее уровнях цифровизации [8].

Нулевой тип характеризуется применением отдельных технологий цифровизации, внедрением интеллектуальных информационных модулей и устройств [9], организующих отдельные функции управления, мониторинга и др.

Структурная схема организации информационных потоков на цифровой тяговой подстанции нулевого типа представлена на рис. 1.

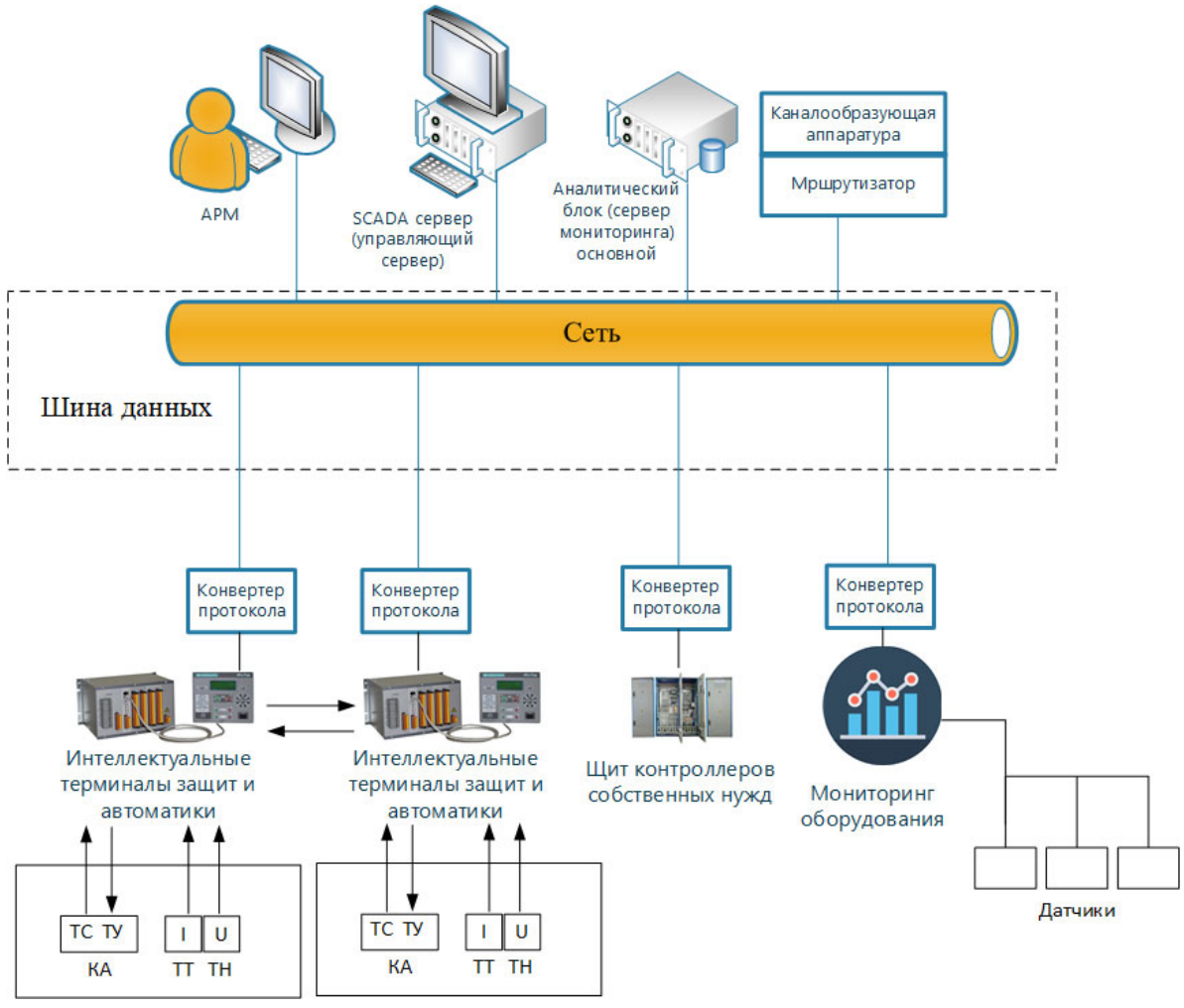

Рис. 1. Структурная схема формирования информационных потоков в цифровой тяговой подстанции нулевого типа

Первый тип характеризуется реализацией резервируемой шины подстанции. Данная шина объединяет оборудование подстанции и связывает его с оборудованием процесса. На этом этапе внедряется единый информационный стандарт передачи данных, формируется информационная модель подстанции, участвующая во всех этапах жизни подстанции (проектирование, наладка, эксплуатация) [7]. Структурная схема организации информационных потоков на цифровой тяговой подстанции первого типа представлена на рис. 2.

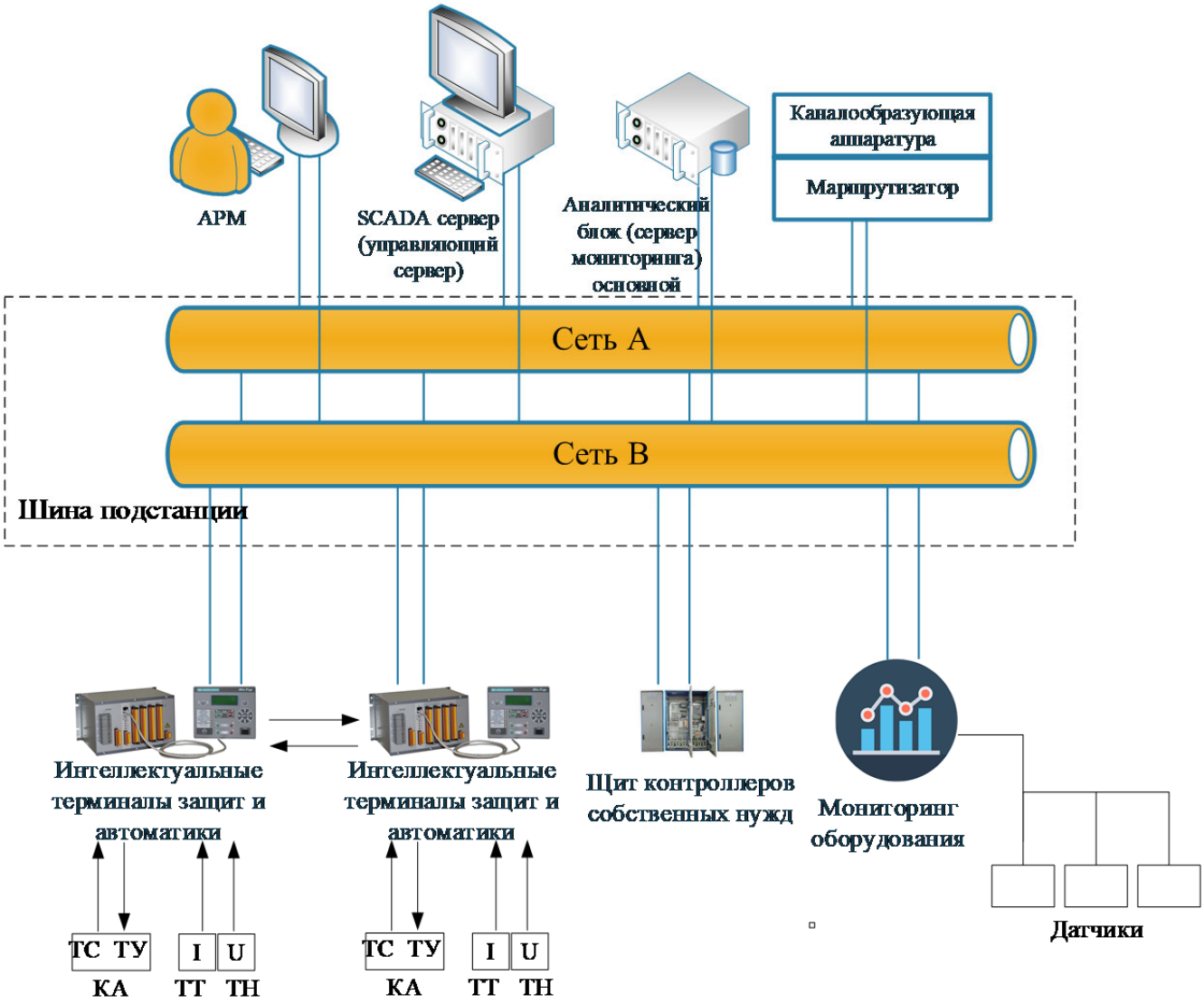

Рис. 2. Структурная схема формирования информационных потоков в цифровой тяговой подстанции первого типа

Второй тип – реализация шины присоединения, объединение данной шиной оборудования уровня присоединения и полевого уровня. На данном этапе дискретные цепи управления, сигнализации и блокировки заменяются цифровой сетью. В рамках данной сети устройства являются одноранговыми и могут обмениваться широковещательными, групповыми или индивидуальными сообщениями. Сообщения передаются по канальному уровню передачи данных. Для целей управления и сигнализации коммутационных аппаратов устанавливаются преобразователи дискретных сигналов в шкафах управления. Вся сеть уровня присоединения функционирует с применением протокола бесшовного резервирования.

Структурная схема организации информационных потоков на цифровой тяговой подстанции второго типа представлена на рис. 3.

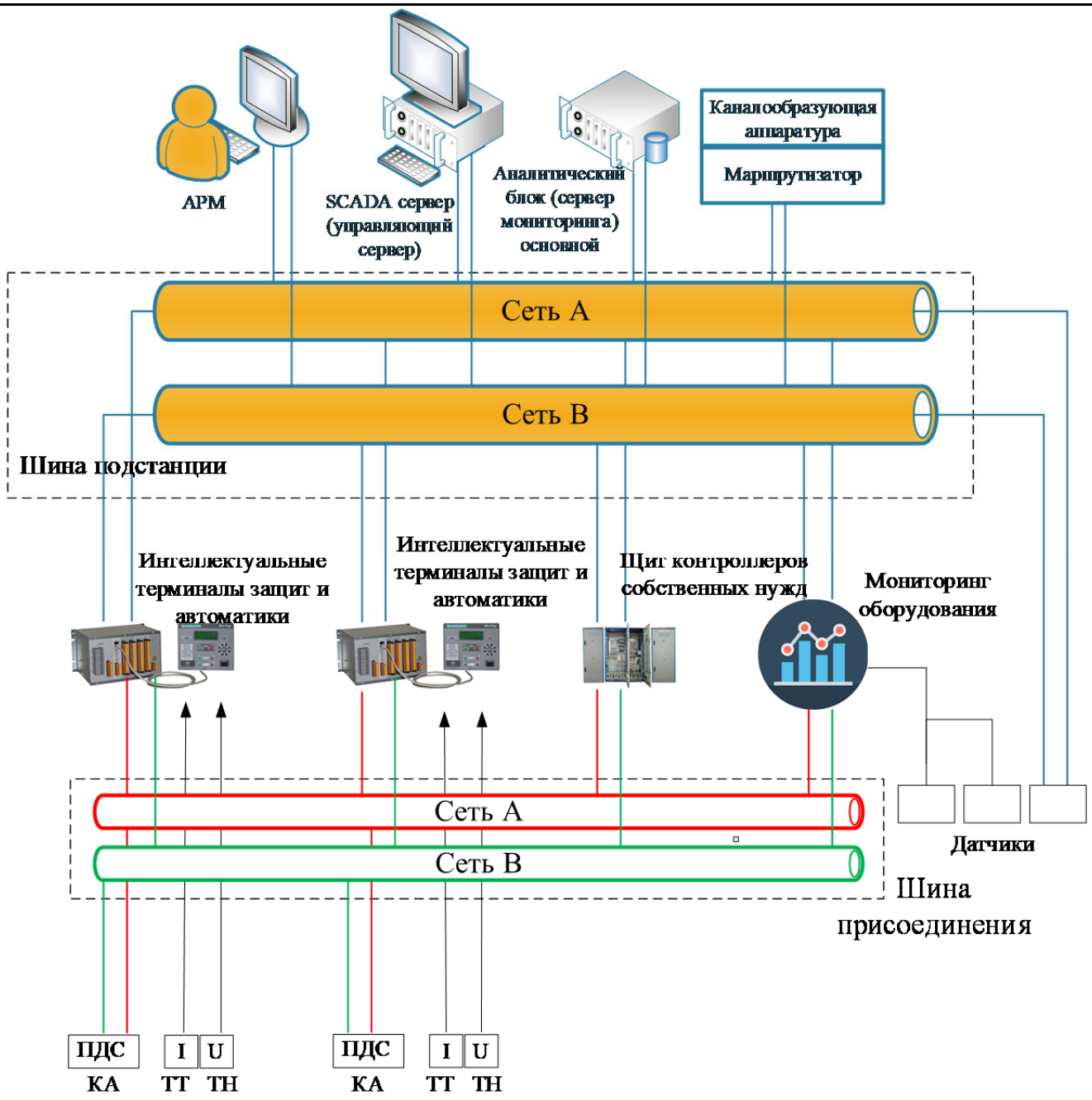

Рис. 3. Структурная схема формирования информационных потоков в цифровой тяговой подстанции второго типа

Третий тип – реализация шины процесса. На этом этапе применяются цифровые цепи трансформаторов напряжения (ТН) и трансформаторов тока (ТТ), которые оснащаются преобразователями аналогового сигнала (ПАС) или заменяются цифровыми. Передача цифровых сигналов осуществляется по шине процесса. Вся сеть уровня процесса функционирует с применением протокола бесшовного резервирования. Структурная схема организации информационных потоков на цифровой тяговой подстанции третьего типа представлена на рис. 4.

Решение о принятии того или иного типа цифровизации строится исходя из следующих параметров: экономической эффективности реализации; технического эффекта от реализации; показателей надёжности цифровой подстанции [10].

Из имеющихся источников можно определить в допустимом доверительном интервале только достигаемый технический эффект [11], тогда как экономический эффект и показатели

надёжности принимаемых технических мероприятий главным образом зависят от соответствия поставляемого оборудования и программного обеспечения техническим требованиям, правильности монтажа и обслуживания программно-технических средств (ПТК) [12]. Достижение требуемых показателей зависит от качества и полноты проведённых предварительных испытаний.

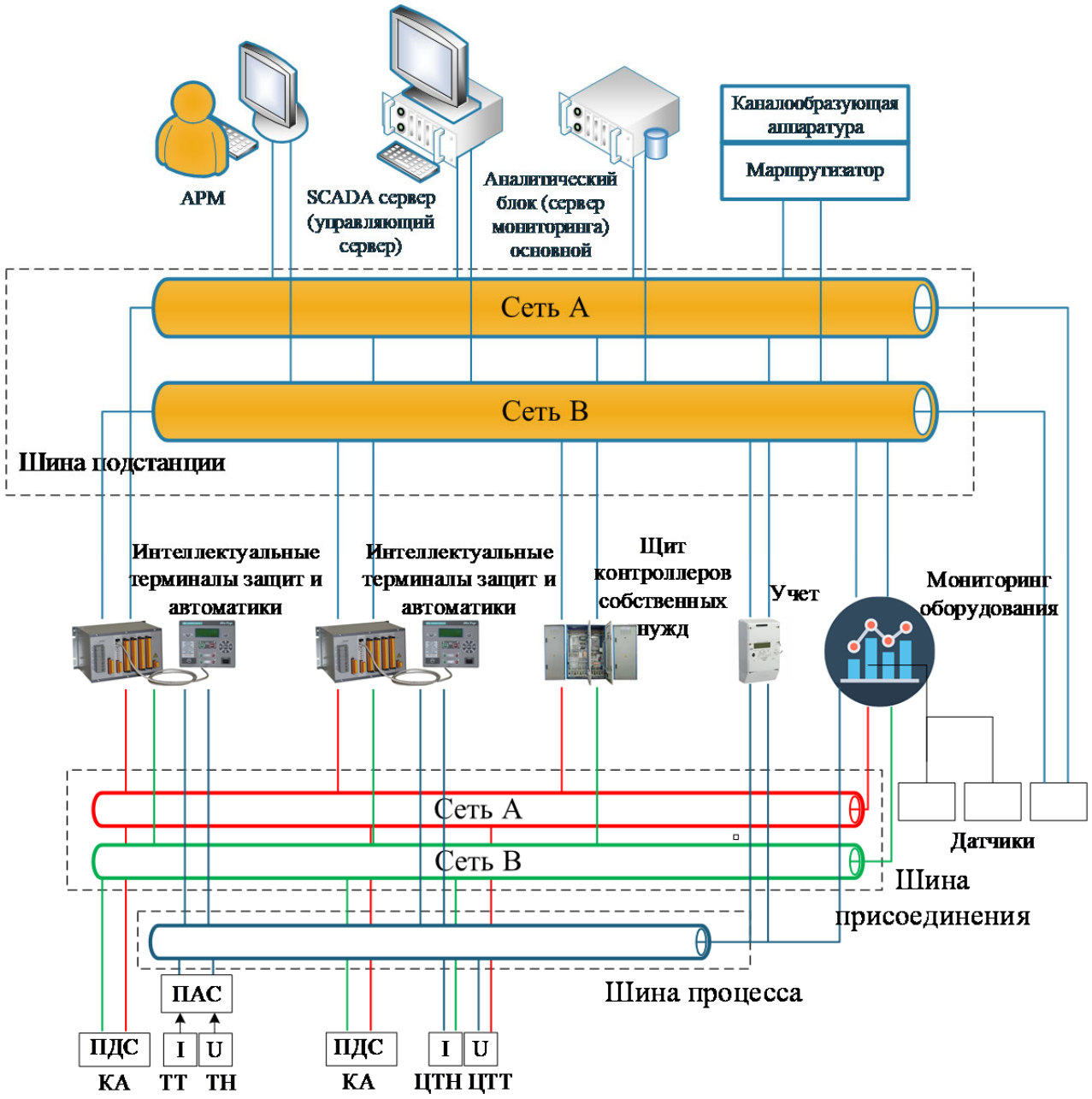

Рис. 4. Структурная схема формирования информационных потоков в цифровой тяговой подстанции третьего типа

Параметры надёжности достигаются выбором наиболее эффективного и надёжного способа передачи информации – выбором топологии сети и стандартов (протоколов) передачи информации, а также соответствием поставляемой программно-технической продукции заявленным требованиям [11]. Программные и технические средства при приёмке до внедрения на действующих подстанциях должны быть опробованы и протестированы на предмет комплексного взаимодействия во всех режимах работы на специализированном полигоне или в лаборатории. В ходе данного тестирования в том числе должны быть отработаны вопросы взаимодействия оборудования,

программ и сетей связи с учётом влияния систем безопасности на работу оборудования (наличие активных и пассивных средств и систем безопасности может повлиять на процесс транспортировки и обработки информационных сигналов). Данная процедура также необходима при обновлении программного обеспечения серверов и оборудования, антивирусных баз.

Достоверные параметры экономической эффективности выявляются на этапах опытной эксплуатации цифровой тяговой подстанции на выбранном полигоне действующей подстанции и сравниваются с соответствующими показателями схожего объекта [9].

Для принятия решения о готовности типа применяемых технических решений к внедрению на тяговой подстанции предлагается проведение мероприятий, представленных в блок-алгоритме (см. рис. 5).

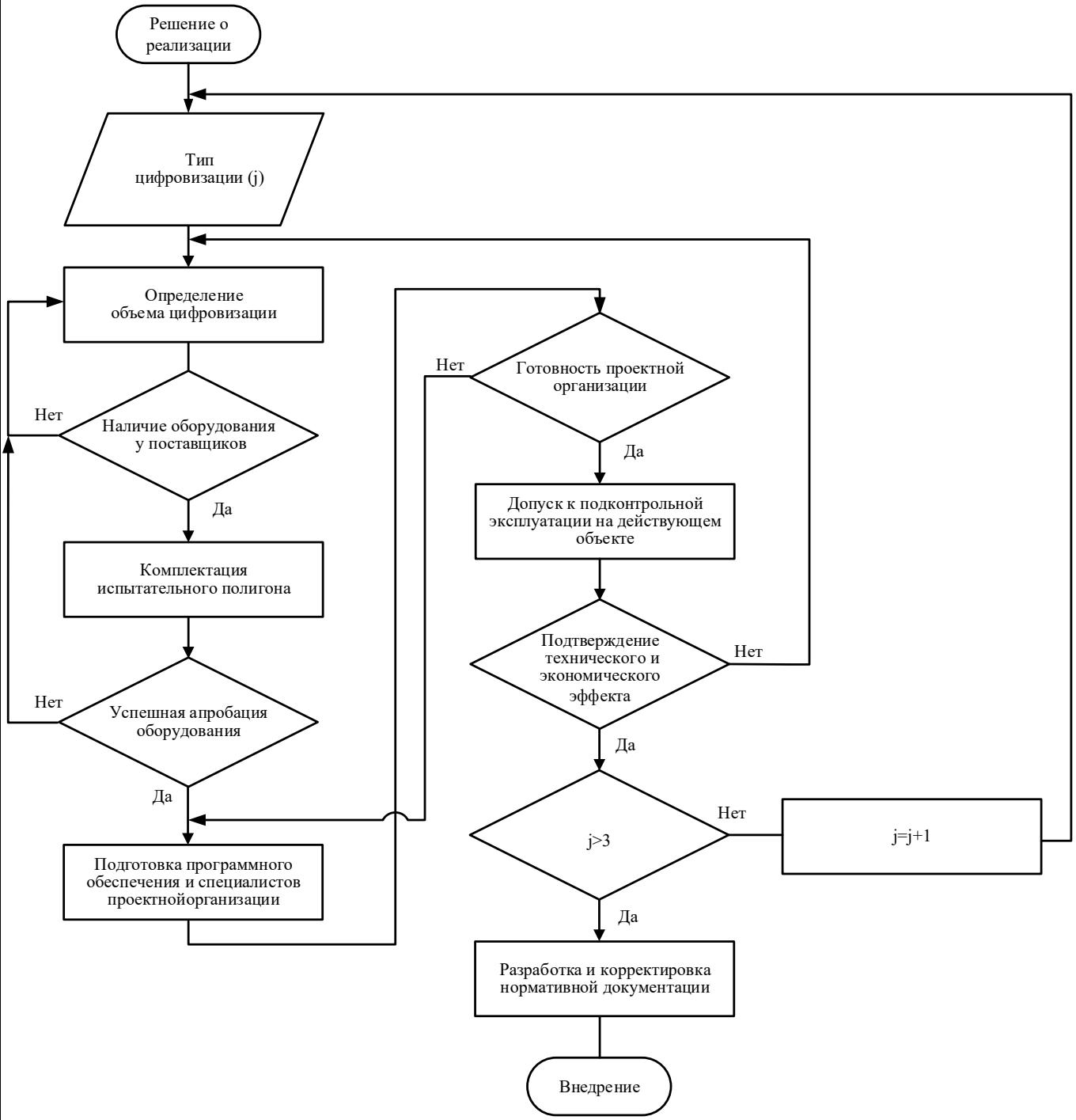

Рис. 5. Блок-алгоритм проведения мероприятий для подготовки и проверки технических решений, внедряемых на цифровой тяговой подстанции

Согласно представленному блок-алгоритму принимается решение о подготовке к внедрению типа цифровизации *j*. Каждый тип цифровизации подразумевает развитие определённого сегмента сети, принятие и поддержку стандартов передачи информации, протоколов резервирования и синхронизации, стандартных моделей описания логических функций, узлов, синтаксиса. В рамках рассматриваемого этапа производители оборудования производят научно-конструкторские работы и изготовление устройств и программных продуктов в соответствии с предъявляемыми требованиями, в том числе по параметрам надёжности функционирования программно-аппаратных средств.

Для принятия решения о соответствии оборудования потенциальных поставщиков требованиям, типу цифровизации, оборудование и ПО должны быть опробованы и протестированы на предмет комплексного взаимодействия во всех режимах работы на специализированном полигоне или в лаборатории [12]. В ходе данного тестирования в том числе должны быть отработаны вопросы взаимодействия оборудования, программ и сетей связи с учётом влияния систем безопасности на работу оборудования (наличие активных и пассивных средств и систем безопасности также может влиять на процесс транспортировки и обработки информационных сигналов) [13].

На данном этапе возможно появление новых требований к оборудованию и программным средствам, а также отдельных технических и инженерных решений для комплексного взаимодействия оборудования, снижения сложности и повышения технологичности обслуживания и эксплуатации [14]. При получении результатов, подтверждающих надёжность и эффективность предлагаемых технических решений, делается заключение о реализации пилотного проекта на территории действующей подстанции. Проектирование должно осуществляться с учётом уровня цифровизации. Начиная с цифровой подстанции первого типа проект должен выполняться в программных средствах с применением технологии BIM [11]. При проектировании осуществляется информационное моделирование устройств и программно-технических комплексов. Формируются алгоритмы работы логических узлов интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), производится описание всех сетей связи, информационных протоколов и сообщений. Далее формируются модель подстанции, содержащая однолинейную схему, описание основного оборудования, данные по параметрированию интеллектуальных устройств и их сетей связи. Проектирование должно осуществляться с использованием информационных моделей оборудования, которые разрабатывают и предоставляют производители оборудования.

Протокол коммуникаций и модель описания функций оборудования (логических узлов) должны быть составлены на основе единого стандарта, описывающего сети и системы связи. После изготовления проекта, отвечающего стандартам BIM проектирования, строится опытный образец на территории действующей подстанции.

В течение достоверного интервала времени сравниваются показатели надёжности, окупаемости, эффективности, безопасности в сравнении с аналогичным объектом предыдущего поколения. При получении положительного опыта внедрения данного типа цифровизации он признаётся эффективным и принимается решение о его применении в качестве типового для внедрения на вновь строящихся и реконструируемых объектах. Также принимается решение о начале внедрения следующего этапа цифровизации.

Уровень цифровизации зависит от следующих факторов:

1. типа цифровизации подстанции, принятого для внедрения;
2. объёма монтируемого оборудования на подстанции, выраженного в количественном или стоимостном выражении от общего количества (стоимости) оборудования, выражается в %.

В зависимости от объёма реконструируемого оборудования можно различить 4 наиболее эффективных уровня цифровизации, определяемых сценарными условиями внедрения цифровых технологий (см. рис. 6).

Сценарное условие 1 – некомплексная реконструкция, расширение, техническое перевооружение до 10 %.

Оборудование внедряется в существующую автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУ ТП) и телемеханизации (ТМ). Дополнительная сетевая инфра-

структура не строится, управление происходит с существующего щита управления, для чего происходит его расширение. При наличии в составе устанавливаемого оборудования цифровых систем диагностики и мониторинга рекомендуется его подключение к пульту управления дежурного подстанцией для сбора/обработки информации.

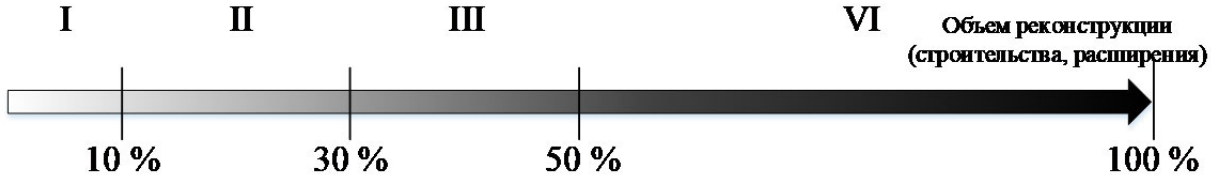

Рис. 6. Определение сценарных условий внедрения цифровых технологий

Сценарное условие II – некомплексная реконструкция, расширение, техническое перевооружение, от 10 до 30 %.

Управление новым и старым оборудованием происходит с щита управления. Всё новое оборудование управляется также с АСУ ТП. Для реализации АСУ ТП строится шина подстанции. Устанавливаются SCADA-сервер и автоматизированное рабочее место (АРМ) оперативного персонала. Объём цифровизации шины подстанции происходит в масштабе модернизируемого/вновь устанавливаемого оборудования с учётом возможности подключения дополнительного оборудования при прогнозе его установки в пятилетней перспективе без учёта дополнительного оборудования в более поздние сроки. При наличии уже установленного оборудования, поддерживающего работу шины подстанции, происходит его подключение к данной шине. Управление новыми выключателями и разъединителями происходит при использовании традиционных каналов связи. При наличии средств мониторинга/диагностики, достаточном для принятия решения на переход обслуживания ряда электроустановок по состоянию, устанавливается сервер мониторинга с организацией канала связи с АРМ контроля состояния.

Сценарное условие III – некомплексная реконструкция, расширение, техническое перевооружение, от 30 до 50 %.

Всё новое оборудование АСУ ТП объединено шиной подстанционного уровня. Подстанционный уровень проектируется в полном объёме с учётом возможности расширения. Все ИЭУ должны быть обеспечены возможностью осуществлять их дистанционную настройку, управление и мониторинг состояния.

Шина присоединения и шина процесса проектируются в объёме планируемой реконструкции (расширения). Управление новыми коммутационными аппаратами осуществляется через шину присоединения при условии наличия в шине процесса всех сигналов, участвующих в логике оперативной блокировки. При отсутствии части сигналов блокировка осуществляется электромагнитным способом, но закладывается сетевая инфраструктура для дальнейшей модернизации оборудования.

При наличии уже установленного оборудования, поддерживающего работу шины подстанции, происходит его подключение к шинам подстанции, шинам процесса и шинам присоединения. Все шины выполняются резервированными, с функцией бесшовного резервирования шины присоединения и шины процесса.

Устройства телемеханики интегрируются в АСУ ТП или демонтируются. В последнем случае управление происходит через ПТК АСУ ТП.

В случае установки цифровых ТН и ТТ на стороне питающего напряжения целесообразно установить ПАС на ТТ вводов остальных классов напряжения для функционирования устройств защит трансформатора с использованием шины процесса и шины присоединения.

Новое оборудование: (авто)трансформаторы, высоковольтные ввода, выключатели, разъединители, реакторы и др. – оснащается устройствами, позволяющими осуществить дистанционный мониторинг состояния.

Сценарное условие IV – комплексная реконструкция, от 50 до 100 %.

Условием для проектирования подстанции будет отсутствие постоянного дежурного персонала. Строится полнофункциональная система АСУ ТП. Шина подстанционного уровня строится в полном объёме. При наличии оборудования, не поддерживающего интеграцию в шину подстанции по принятому протоколу связи, интеграция происходит с использованием преобразователей протоколов. Все ИЭУ должны быть обеспечены возможностью осуществлять их дистанционную настройку, управление и мониторинг состояния.

Шины всех уровней выполняются резервированными, с функцией бесшовного резервирования шины присоединения и шины процесса.

Шина присоединения и шина процесса проектируются в полном объёме. На реконструируемых объектах устанавливаются цифровые ТН и ТТ. При наличии традиционных ТТ и ТП на вводах трансформатора устанавливаются ПАС. Управление всеми новыми коммутационными аппаратами осуществляется через шину присоединения. При наличии оборудования, не имеющего функции интегрирования в шину присоединения, интеграция происходит через преобразователь дискретных сигналов. Управление подстанцией осуществляется через ПТК АСУ ТП. Всё новое электроэнергетическое оборудование оснащается устройствами, позволяющими осуществить дистанционный мониторинг состояния.

В настоящее время отечественные решения в области информационных систем и поставки ИЭУ не могут в полной мере реализовать все типы цифровых тяговых подстанций с достаточным уровнем надёжности их работы. Увеличение производительности серверов по обработке и управлению информационными потоками делает возможным появление в скором времени нового типа подстанции, реализующего все протоколы управления устройствами в рамках виртуальной системы, проработка и анализ возможных вариантов исполнения которого требуют проведения отдельного исследования с точки зрения как технического исполнения, так и обеспечения безопасности и устойчивости в особо критичной инфраструктуре железнодорожного транспорта. Дальнейшее техническое и информационное развитие основных производителей оборудования позволит реализовать цифровые подстанции всех типов и использовать наиболее эффективный уровень цифровизации подстанции, зависящий от объёма реконструкции (строительства, модернизации, расширения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг, Е. Н. О стратегии развития цифровой железной дороги / Е. Н. Розенберг, В. В. Батраев // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». – 2018. – № 1. – С. 9-27.

2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р // Министерство транспорта Российской Федерации, сайт. – URL: https://mintrans.gov.ru/documents/2/11577 (дата обращения: 10.12.2021). – Текст: электронный.

3. Жаворонков, А. Е. Технологии Цифровой подстанции / А. Е. Жаворонков, С. В. Митрофанов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-методической конф. (с международным участием), Оренбург, 30 января – 01 февраля 2013 г. – Оренбург: Издательско-полиграфический комплекс «Университет», 2013. – С. 289-296.

4. Tryapkin, E. Development of «digital substation» technology for power supply of railways / E. Tryapkin, I. Ignatenko, M. Keino // MATEC Web of Conferences, Novosibirsk, 16-19 мая 2018 года. – Novosibirsk: EDP Sciences, 2018. – P. 01051. – DOI 10.1051/matecconf/201823901051.

5. Положительный опыт внедрения систем на базе технологий МЭК 61850-9-2 / А. Ю. Мартихин, А. В. Вылегжанин, В. В. Семин, С. Э. Беккер // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 6. – С. 16-21.

6. Кондратьев, Ю. В. Концепция развития цифровой тяговой подстанции / Ю. В. Кондратьев, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: материалы третьей междунар. науч.-практ. конф. – Омск: ОМГУПС, 2018. – С. 13-20.

7. Digital information exchange technologies at electric power facilities of the railway transport and its cost-benefit / A. N. Kobylitsky, I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 8, Novosibirsk, 22-27 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2020. – P. 012185. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012185.
8. Болдырев, В. В. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения / В. В. Болдырев, М. А. Горькавый // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 9-18.
9. Ye Cai, Yu Chen, Yong Li, Yijia Cao, Xiangjun Zeng. Reliability Analysis of Cyber-Physical Systems: Case of the Substation Based on the IEC 61850 Standard in China. Energies 2018, 11, 2589.
10. Цифровая линия электропередач / Е. В. Добрынин, С. А. Блинкова, А. М. Батищев, М. А. Гузитаева // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 9 (250). – С. 84-88.
11. Игнатенко, И. В. Перспективы развития технологии обмена информацией цифровой тяговой подстанции / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Е. Ю. Тряпкин // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 16-26 февраля 2021 г. / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 106-110.
12. Применение методов машинного обучения в задачах оценки технологических процессов / О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев, Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 68-72.
13. Киселёва, О. Индустриальная революция и кибербезопасность / О. Киселёва, Ю. Широков // Современные технологии автоматизации. – 2019. – № 2. – С. 44-49.
14. Власенко, С. А. Определение уязвимостей и меры по информационной защите цифровой тяговой подстанции / С. А. Власенко, И. В. Игнатенко, Е. Ю. Тряпкин // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 4 (21). – С. 78-82.
15. Krause, T.; Ernst, R.; Klaer, B.; Hacker, I.; Henze, M. Cybersecurity in Power Grids: Challenges and Opportunities. Sensors 2021, 21, 6225. https://doi.org/10.3390/s21186225.