

## Исследование вариантов подключения микропроцессорных терминалов защит тяговых подстанций

П. С. Пинчуков✉

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ pinchukov-pavel@mail.ru

### Резюме

В современной железнодорожной электроэнергетике используется широкий диапазон микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики в различных вариантах исполнения. На смену традиционным схемам подключения микропроцессорных устройств приходят новые схемы, надежность которых необходимо численно оценить путем поэтапного анализа и расчета вариантов возникновения функциональных отказов. Актуальность исследования обусловлена активной модернизацией железнодорожной энергетики за счет внедрения информационных технологий в системах управления технологическими процессами и перспективным расширением полигона использования цифровых технологий. В работе анализируются современные тенденции в области цифровизации тяговых подстанций железных дорог с применением микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики. Ввиду отсутствия в настоящее время в железнодорожной энергетике Российской Федерации базы данных показателей надежности цифровых систем релейной защиты и автоматики, в данной работе были взяты за основу схемы подключения и требования технологического проектирования для электроэнергетических цифровых подстанций, на основе чего был выполнен расчет показателей надежности для тяговых подстанций переменного тока железнодорожного транспорта. Результаты позволили провести сравнение новых и существующей (традиционной) схем по показателям надежности. Выявлено, что показатели надежности у новых схем не выше, чем у традиционной, что объясняется наличием в новых схемах нерезервируемых элементов, снижающих результирующие показатели надежности. Приводятся пошаговые примеры составления топологических схем замещения по надежности, выполнены моделирование и анализ деревьев отказов с учетом показателей надежности элементов на примере тяговой подстанции. Подчеркивается необходимость создания в ближайшем будущем базы данных нового цифрового и соединительного оборудования с указанием количественных значений показателей надежности устройств и комплексов релейной защиты и автоматики.

### Ключевые слова

тяговая подстанция, микропроцессорные устройства защиты и автоматики, цифровой трансформатор тока, наработка на отказ, вероятность безотказной работы

### Для цитирования

Пинчуков П. С. Исследование вариантов подключения микропроцессорных терминалов защит тяговых подстанций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 87–95. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).87-95

### Информация о статье

поступила в редакцию: 20.09.2021, поступила после рецензирования: 27.09.2021, принята к публикации: 10.10.2021

## Microprocessor protection terminals of traction substations: Study of connection variants

P. S. Pinchukov✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ pinchukov-pavel@mail.ru

### Abstract

A wide range of microprocessor protection and automation devices in various designs is used in modern railway electric power industry. The traditional circuits for connecting microprocessor devices are being replaced by new circuits, the reliability of which must be numerically assessed by step-by-step analysis and assessment of options for the occurrence of functional failures. The relevance of the study is based on the total modernization of railway energetics through the implementation of information technologies in the technological process control systems and the advanced extension of the use of digital technologies. The paper studies numerical indicators of reliability of microprocessor relay protection devices at traction substations. It also analyzes current trends in the digitalization of railway traction substations using microprocessor protection and automation devices. Since the database of indicators of the reliability of digital protection and automation systems in the railway power industry of the Russian Federation is currently not available the connection diagrams and technological design requirements for electric power digital substations were taken as the basis. The reliability indicators were calculated for traction substations of alternating current of

railway transport. The results made it possible to compare new and existing (traditional) schemes in terms of reliability. It was revealed that the reliability indices of the new circuits are not higher than in the traditional one, which is explained by the presence of non-redundant elements in the new circuits, reducing the resulting reliability indices. Step-by-step examples of compiling topological equivalent circuits for reliability are given. Modeling and analysis of fault's trees are carried out, taking into account the reliability indicators of elements with an example of the traction substation. The need to create in the near future a database of new digital and connecting equipment with an indication of the quantitative values of the reliability indicators of devices and complexes of relay protection and automation is emphasized.

### Keywords

traction substation, microprocessor protection and automation devices, digital current transformer, mean time between failures, survival function

### For citation

Pinchukov P. S. Issledovanie variantov podklyucheniya mikroprocessornyh terminalov zashchit tyagovyh podstancij [Microprocessor protection terminals of traction substations: connection variants analyse]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 4 (72), pp. 87–95. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).87-95

### Article Info

Received: 20.09.2021, Revised: 27.09.2021, Accepted: 10.10.2021

### Введение

Надежное и устойчивое функционирование устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) является гарантом бесперебойного электроснабжения потребителей железных дорог, поэтому модернизации и обновлению технологий и элементов в системе РЗА уделяется повышенное внимание.

Правительством Российской Федерации утверждена долгосрочная программа по развитию ОАО «РЖД» до 2025 г., в соответствии с которой разработаны план и «дорожная карта» перехода на «цифровую железную дорогу», в результате чего ожидается повышение качества транспортных услуг за счет применения цифровых технологий [1, 2]. Основная роль в цифровой трансформации РФ на ближайшие два десятилетия определена интеллектуальному взаимодействию человека, программно-аппаратных модулей с развитой архитектурой и искусственного интеллекта в едином потоке цифровой информации на одном языке общения в общем информационном пространстве.

Реализуемые в системах электроснабжения железных дорог новые подходы и технологии в направлении цифровой трансформации предусматривают решение задач управления, связи, защиты и мониторинга между отдельными элементами системы и системой в целом. Новые цифровые технологии открывают для железнодорожной энергетики более широкие перспективы для реализации указанных вопросов и позволяют при решении привычных инженерных задач добиваться более эффективного и координированного управления сложными системами, их

режимами и параметрами, а также отдельными элементами этих систем [3–9]. Поэтому вполне ожидаемо, что цифровая трансформация одной из первых затронула систему РЗА железнодорожного транспорта, где от качественного функционирования всей системы и ее отдельных элементов напрямую зависит эффективность и бесперебойность перевозочного процесса [10–12].

### Актуальность проблемы и постановка цели и задач

Целью проводимого исследования является повышение эффективности функционирования микропроцессорных терминалов защит тяговых подстанций в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. Для достижения поставленной цели проводится анализ вариантов схем подключения микропроцессорных защит, которые могут быть использованы на тяговых подстанциях переменного тока.

Актуальность исследования обусловлена реализацией проектов электрификации расширения Восточного полигона железных дорог и электрификации Байкало-Амурской магистрали (БАМ-2 и БАМ-3), который предусматривает оснащение строящихся тяговых подстанций современными микропроцессорными терминалами. Однако вопрос выбора схем подключения микропроцессорных терминалов РЗА пока остается открытым. Результаты проводимого анализа помогут обосновать выбор наилучших схемных решений для подключения микропроцессорных терминалов защит с последующей их реализацией на новых тяговых подстанциях.

### **Анализ основных мировых и отечественных тенденций развития техники и технологий микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики**

Произведенный анализ литературных источников [10–14] показал, что развитие микропроцессорных устройств РЗА (МУРЗ) происходит преимущественно посредством следующих направлений:

- применение цифровой техники и информационных технологий при создании систем РЗА (базирование используемых технологий на стандарте МЭК 61850 и концепции цифровой подстанции, развитие систем автоматизированного проектирования устройств РЗА);

- повышение функциональной и аппаратной интеграции за счет применения адаптивных принципов, увеличения гибкости используемой функциональной и аппаратной архитектуры схем и устройств МУРЗ;

- обеспечение надежности и кибербезопасности функционирования устройств и систем;

- оптимизация и совершенствование всех этапов жизненного цикла устройств РЗА, начиная от их проектирования и заканчивая системой технического обслуживания и диагностики.

Одним из важных и нерешенных на данный момент времени аспектов функционирования МУРЗ является вопрос надежности их работы. Отечественные и зарубежные исследователи отмечают необходимость пересмотра подходов к оценке надежности (проектной и эксплуатационной) комплексов РЗА, реализуемых по технологии цифровой подстанции в соответствии с протоколом МЭК 61850. Также подчеркивается важность разработки новых и корректировки существующих методик оценки основных показателей надежности (поток отказов, время восстановления и пр.) [9, 11–18].

Также отмечается необходимость организации непрерывного мониторинга показателей надежности устройств РЗА цифровых подстанций, что позволит проработать решения в области повышения надежности МУРЗ. Концептуальные вопросы по развитию РЗА на базе МЭК 61850 предусматривают поэтапный переход от «контроллерного» исполнения устройств РЗА к «компьютерному» виду и рассматриваются многовариантно – в краткосрочной, среднесрочной или долгосрочной перспективе [9, 11–18].

Важно отметить, что используемые в настоящее время методы расчета и контроля реальных показателей аппаратной и структурной надежности комплексов РЗА необходимо проанализировать на предмет применимости в условиях эксплуатации и проектирования цифровых подстанций. Также необходима наработка базы данных используемого оборудования с количественными значениями показателей надежности устройств и комплексов РЗА и сравнительная оценка различных архитектур РЗА.

### **Оценка различных архитектур при подключении микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики**

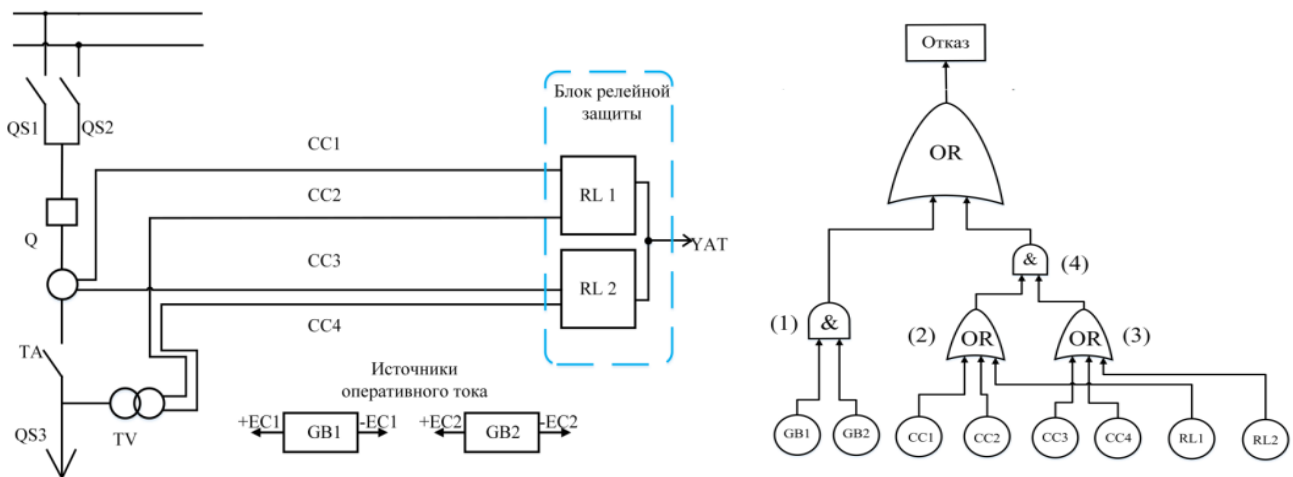
Произведем оценку схем подключения МУРЗ на цифровой тяговой подстанции, составив структурные схемы, схемы замещения по надежности, и выполним расчет и анализ показателей надежности цифровой тяговой подстанции для трех вариантов конфигурации схемы локальной вычислительной сети [15–17]: традиционная схема; схема соединения «двойная звезда»; схема соединения «двойное кольцо».

Расчет показателей надежности схем будем выполнять путем составления деревьев отказов, что облегчает процесс расчета топологически сложных схем. Составление схем и деревьев отказа является логическим процессом, который наиболее трудоемок и требует особого внимания, поэтому приведем его более детально.

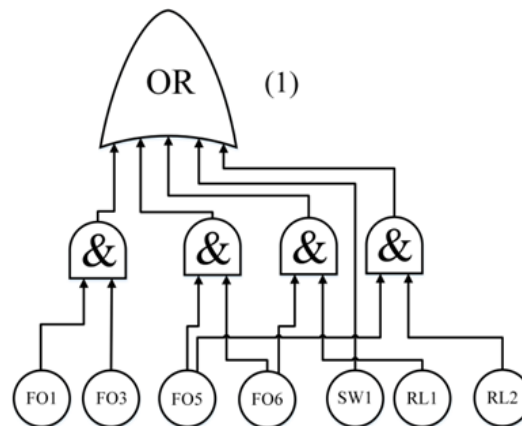
Расчеты показателей надежности произведем с использованием экспоненциального закона распределения отказов и показателей надежности оборудования. Рассматриваемые схемы подключения и соответствующие им деревья отказов приведены на рис. 1–4.

Для составления дерева отказов по каждой из трех упомянутых схем необходимо определить события, которые вызывают отказ всей системы.

Так для схемы (см. рис. 1) работа релейной защиты в аварийном режиме становится невозможной при одновременном отказе обеих аккумуляторных батарей – GB1 и GB2. Обозначим этот случай на дереве отказов логическим элементом «И» (&). Для прекращения работы терминала РЗА достаточно обрыва одного из кабелей, ведущих к измерительным трансформаторам, или отказа самого терминала. Этому варианту развития событий соответствует логический элемент «ИЛИ» (OR).



**Рис. 1.** Традиционная схема локальной вычислительной сети и дерево отказов  
**Fig.1.** Traditional LAN connection diagram and corresponding fault's tree



**Рис. 2.** Схема подключения локальной вычислительной сети «двойная звезда»  
и соответствующее ей дерево отказов  
**Fig.2.** Double Star LAN connection diagram with the corresponding fault's tree

Тем не менее отказом системы также будет являться прекращение работы обоих терминалов РЗА, поэтому внесем в дерево отказов элемент «И». Получаем схему, где отражены все возможные пути возникновения отказов системы (см. рис. 1).

Для цифровой подстанции протокол параллельного резервирования основывается на принципе параллельной работы двух независимых сетей и дублировании информационных сообщений. Каждый пакет информации, отправляемый устройством, дублируется и одновременно передается по обеим сетям. В нормальном режиме до принимающего устройства доходят оба пакета данных, но это происходит неодновременно из-за разной скорости передачи в независимых сетях. Принимающее устройство отбрасывает

последний полученный пакет в нормальном режиме или принимает единственный пакет в случае отказа одной из сетей, за счет чего возможна беспроводная передача данных.

Такому протоколу соответствует схема «двойная звезда», представляющая собой радиальную структуру с сетевыми коммутаторами в центре и устройствами полевого уровня на периферии. Для обеспечения надежности работы систем РЗА требуются основная и резервная защиты, что для схемы (рис. 2) достигается использованием полевых устройств с резервированными сетевыми портами, подключенных к мультиплексорам MU с помощью оптических кабелей FO, и парой терминалов РЗА с резервированными сетевыми портами, также под-

ключенных к коммутаторам SW и выполняющих функции основной и резервной защит.

В этой схеме элементов гораздо больше, чем в традиционной, поэтому дерево отказов представляется более разветвленной структурой (рис. 2). Для реализации протокола применим схему «двойное кольцо», топология которой приведена на рис. 3.

К отказу системы РЗА может привести отсутствие показаний тока или напряжения, т. е. одновременный отказ кабелей FO1 и FO3, отказ кабелей FO5, FO6 между коммутатором и терминалами РЗА, отказ коммутатора SW1. Также к отказу работы сети может привести нарушение связи между коммутатором и терминалом РЗА при отказе второго терминала РЗА.

Варианты развития событий для схемы «двойная звезда» показаны на рис. 3.

Отказ работы сети также может вызвать нарушение связи между коммутатором и терминалом РЗА при отказе второго терминала РЗА. На рис. 3. этому случаю соответствует элемент, обозначенный как (1). Элемент (1) рассматривает события в первой независимой ветви «звезды», элемент (2) – во второй ветви. Элемент (3) учитывает, что при отказе одной сети вторая продолжает работать независимо. Элементы (4)

и (5) описывают работу устройства сопряжения с шиной (УСШ), к которым подключены измерительные приборы. Элемент (7) отражает требование к питанию цепи оперативным током, элемент (8) – к резервированию защит.

Далее составим дерево отказов для следующей схемы («двойное кольцо»). Каждое измерительное устройство в этой схеме подключается к двум УСШ, которые последовательно соединены оптическими кабелями, каждый с соответствующим терминалом РЗА и между собой. Для замыкания кольца также соединяются последовательно терминалы РЗА.

В схеме соединения локальной вычислительной сети (ЛВС) «двойное кольцо» каждый элемент, участвующий в системе РЗА, продублирован, однако все элементы соединены последовательно. Отказом системы является одновременный отказ двух точек «кольца» или одновременный отказ обоих источников оперативного тока. Отметим, что отказом не является нарушение в работе соединительных кабелей FO3 и FO4, которые необходимы для реализации протокола HSR. При отказе этих кабелей функциональность схемы не меняется, но снижается скорость передачи данных, увеличивается вероятность отказа системы.

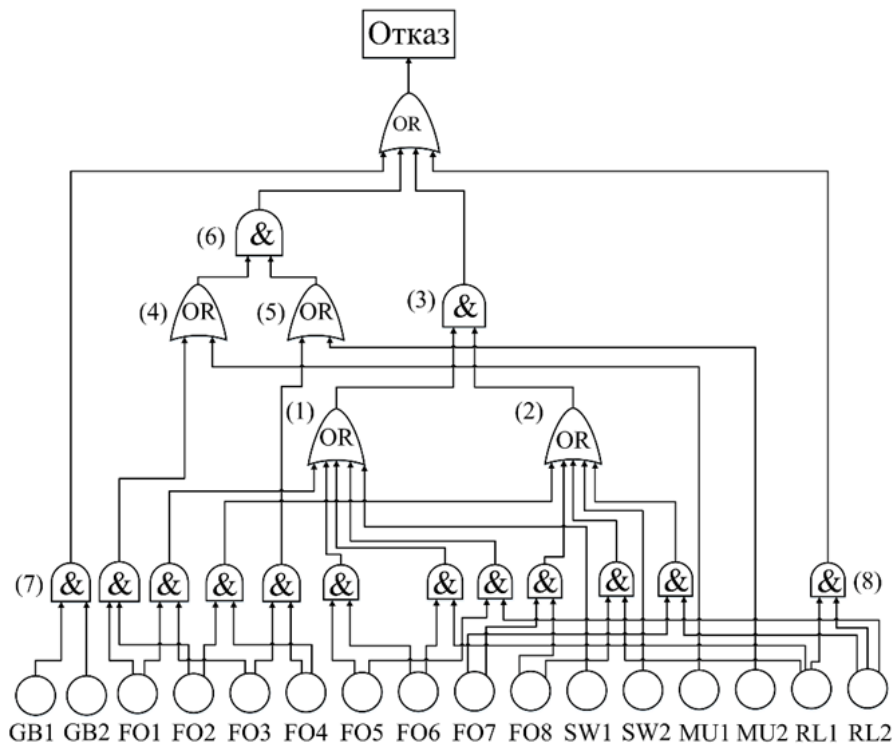
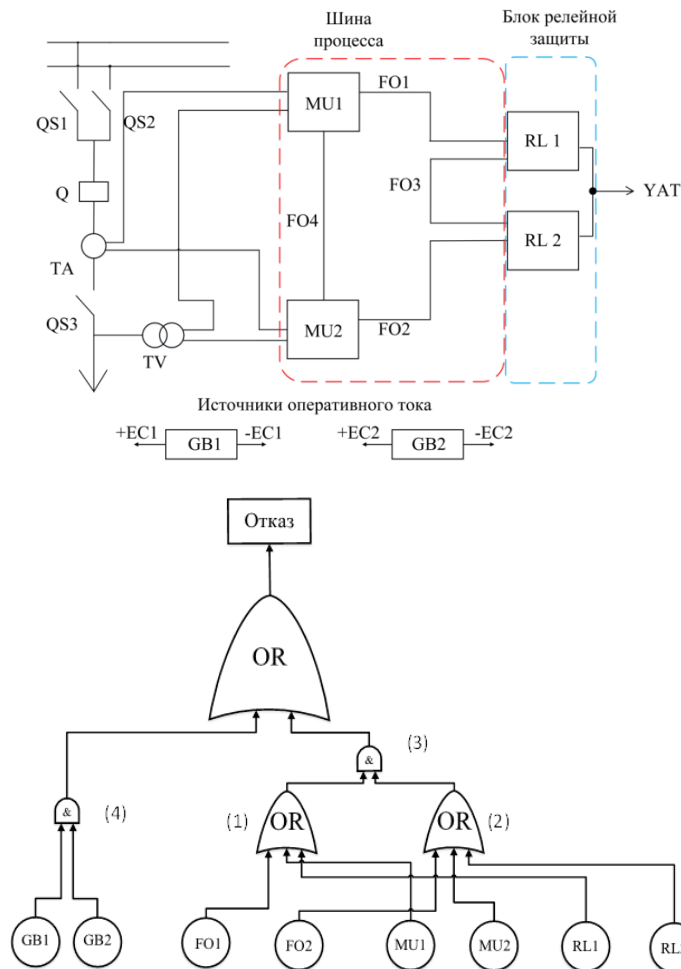


Рис. 3. Детализированное дерево отказов для схемы «двойная звезда»

Fig. 3. Detalized fault's tree for double star LAN connection diagram



**Рис. 4.** Схема подключения локальной вычислительной сети «двойное кольцо» и соответствующее ей дерево отказов

**Fig. 4.** Double ring LAN connection diagram with the corresponding fault's tree

В расчетах примем следующие упрощения и исходные данные:

– пренебрегаем показателями надежности измерительных трансформаторов и силовых коммутационных аппаратов, поскольку исследуется схемная надежность топологии;

– расчетный период, на котором производится расчет, примем равным 4 380 ч, что соответствует периодичности технических осмотров аппаратуры и вторичных цепей подстанции и позволяет не учитывать параметры восстановления оборудования;

– параметры по надежности оборудования примем для оборудования, применяемого на действующей подстанции.

Используемый экспоненциальный закон распределения позволяет произвести расчеты основных показателей надежности для каждой из схем по классической методике [15–18].

**Таблица 1.** Исходные данные для расчета  
**Table 1.** Initial data for calculating

Наименование оборудования	Среднее время наработки на отказ, ч	Интенсивность отказов, 1/ч
Терминал P3 SIE-MENS 7SA522	125 000	–
Кабельная линия (1 м КВВГЭнг(А)-LS 7×4)	–	$5,87 \cdot 10^{-9}$
Волоконно-оптическая линия (1 км)	–	$1,19 \cdot 10^{-9}$
Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU	280 000	–
Коммутатор MOXA EDS-408A	363 000	–
Батареи аккумуляторные	–	$2,50 \cdot 10^{-7}$

### Полученные результаты и их обсуждение

Результаты численной оценки вероятности безотказной работы трех перечисленных схем подключения МУРЗ сведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета для схем устройств релейной защиты и автоматики различной топологии

**Table 2.** Calculation results for RPA schemes of various topologies

Номер схемы	Название схемы	Вероятность безотказной работы, $R$
1	Традиционная	0,9979914
2	«Двойная звезда»	0,9984287
3	«Двойное кольцо»	0,9975560

По результатам произведенных расчетов при переходе от традиционных к новым коммуникационным стандартам и цифровым устройствам существенного изменения результирующих значений показателей надежности не происходит. Традиционная схема подключения РЗА, в сравнении со схемой «двойное кольцо», даже имеет  $R(t)$  несколько выше ( $0,9975560 < 0,9978814$ ).

Использование схемы «двойная звезда», приводит к незначительному повышению показателей надежности: вероятность безотказной работы со значения 0,9979914 (традиционная схема) до 0,9984287 («двойная звезда»).

Часть параметров оборудования, которые используются в качестве исходных данных, взять для расчета не представляется возможным ввиду их отсутствия у завода-изготовителя, что еще раз подчеркивает важность создания базы данных нового цифрового и соединительного оборудования с указанием

количественных значений показателей надежности устройств и комплексов РЗА.

Таким образом, при сравнении характеристик по надежности двух рекомендованных схем при переходе на новые коммуникационные стандарты предпочтение следует отдавать схеме «двойная звезда».

### Заключение

Проведенное исследование позволило структурировать основные тенденции развития техники и технологий микропроцессорных РЗА, применяемых в настоящее время.

Выполненный анализ трех вариантов схем подключения микропроцессорных терминалов защит и автоматики тяговых подстанций переменного тока и сравнительная оценка их показателей надежности позволяют заключить, что схема подключения МУРЗ «двойная звезда» более надежна, чем схема «двойное кольцо». Показатели надежности у новых схем не выше, чем у традиционной, что объясняется наличием в них нерезервируемых элементов и ИТ-оборудования, снижающих результирующие показатели надежности.

На надежность работы микропроцессорных систем РЗА влияет ряд факторов [11, 15–18]: степень подготовки персонала, надежность используемого оборудования, правильность его наладки и эксплуатации и т. д.

Новые возможности, которые открывает внедрение цифровых технологий, а именно, удаленная диагностика, мониторинг состояния оборудования и прогнозирование и т. п. открывают новые перспективы для более эффективной интеграции микропроцессорных РЗА на этапе перехода к цифровым технологиям в соответствии со стандартами МЭК 61850.

### Список литературы

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации : указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 89 с изм. и доп. от 16.12.2015.
2. Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» до 2030 года // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (дата обращения 22.09.2021).
3. Ливинский П.А., Гвоздев Д.Б. Инновационная энергосистема России в 2050 году // Энергетическая политика. 2017. № 6. С. 16–21.
4. Galeeva G. Digital transformation of the energy industry in the Russian economy // Sustainable Energy and Power Engineering 2021 (SUSE-2021) : E3S Web Conf. 2021. Vol. 288 : international Symposium. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801065>.
5. Бойченко О.В., Дячук В.С. Построение информационной модели цифровой подстанции на основе стандарта МЭК 61850 // Междунар. науч.-техн. журн. 2016. № 4-2 (46). С. 39–42.
6. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Куцкий А.П. Мультиагентные технологии управления в системах электроснабжения магистральных железных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 1 (37). С. 56–65.

7. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск : Изд-во ИрННТУ, 2015. 218 с.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future : proceeding № 2. Magdeburg : Otto-von-Guericke University Magdeburg, 2013. P. 44–48.
9. Liu N., Panteli M., Crossley P.A. Reliability Evaluation of a Substation Automation System Communication Network Based on IEC 61850 // 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2014.0057.
10. Агафонов А.И., Бростилова Т.Ю., Джазовский Н.Б. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. 296 с.
11. Жуков А.В. Обобщение мировых тенденций развития техники и технологий электроэнергетики в области работы ИК В5 «Релейная защита и автоматика» релейной защиты и автоматике энергосистем (по итогам 47-ой сессии СИГРЭ 2018 г.) // CIGRE : сайт. URL: [http://cigre.ru/47/pdf/B5\\_%D0%96%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2.pdf](http://cigre.ru/47/pdf/B5_%D0%96%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2.pdf) (дата обращения 22.09.2021).
12. Tutorial on Networking for Digital Substations / R. Hunt, M. Zapella, C. Pimentel et al. // 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). USA. TX. College Station, 2019. P. 1–15. DOI: 10.1109/CPRE.2019.8765874.
13. On the mathematical simulation of digital substation technological processes / V.I. Dubrov, R.G. Oganyan, N.D. Narakidze et al // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Т. 12. № 2. P. 276–282.
14. Khrennikov A.Yu., Aleksandrov N.M. Approaches and experience in testing of digital substation primary equipment and relay protection // Elektroenergetika 2019 : proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Slovakia : Technical University of Kosice, 2019. P. 280–283.
15. Methodology for reliability indices determination in electric power substation / J.D. Barbosa, R. Santos, J.F. Romero et al. // IEEE Latin America Transactions. 2018. № 16. P. 1959–1968. DOI: 10.1109/TLA.2018.8447363.
16. Макашова С.И., Пинчуков П.С. Расчет показателей надежности цифровой подстанции // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2019. Т. 19. № 4. С. 41–51. DOI: 10.14529/power190405.
17. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Estimation of Digital Substation Reliability Indices // Advances in intelligent systems and computing : VIII International scientific Siberian Transport Forum. 2020. Vol 1. Т. 1115. P. 3–14. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_1.
18. Pinchukov P., Makasheva S. Improving methods for reliability assessment of electric power systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. Vol. 692. P. 162–169.

### References

1. Ukaz Prezidenta RF ot 7 iyulya 2011 g. № 899 “Ob utverzhdenii prioritetnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologiy i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologiy Rossiyskoy Federatsii”. S izmeneniyami i dopolnениями ot 16 dekabrya 2015 g. [Ordinance of the President of Russia of 07.07.2011 No. 899 “On approval of priority directions of scientific, technological and engineering development in the Russian Federation the list of critical technologies of the Russian Federation”. Amended and supplemented on 16.12.2015]. Moscow, 2015.
2. Strategiya razvitiya holdinga OAO “RZHD” do 2030 goda [JSC “Russian Railways” Development strategy until 2030]. URL: <http://doc.rzd.ru> (Accessed 22.09.2021).
3. Livinsky P.A., Gvozdev D.B. Innovacionnaya energosistema Rossii v 2050 godu [Russian innovative energy system in 2050]. *Energeticheskaya politika [Energy politic]*. 2017, No. 6, pp. 16–21.
4. Galeeva G. Digital transformation of the energy industry in the Russian economy 2021 *International Symposium “Sustainable Energy and Power Engineering 2021” (SUSE-2021). E3S Web Conf.* Vol. 288, pp. 01065. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801065>.
5. Boychenko O.V., Dyachuk V.S. Postroenie informacionnoy modeli cifrovoy podstancii na osnove standarta MEK 61850 [Creating the information models of a digital substation based on the IEC 61850 standard]. *Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal [International scientific and technical journal]*. 2016, No. 4-2(46), pp. 39–42.
6. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kutsij A.P. Mul'tiagentnye tekhnologii upravleniya v sistemah elektrosnabzheniya magistral'nyh zheleznih dorog [Multi-agent control technologies in power systems of main railways]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technology]*. 2018, No. 1(37), pp. 56–65.
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intellektual'nye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii [Intelligent technologies of power quality management]. Irkutsk: IrNITU Publ., 2015. 218 p.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent traction power supply system. *The power grid of the future*. Proceeding № 2. Otto-von-Guericke University Magdeburg, Magdeburg, 2013. P. 44–48.
9. Liu N., Panteli M., Crossley P.A. Reliability evaluation of a substation automation system communication network based on IEC 61850. *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2014.0057.
10. Agafonov A.I., Brostilova T.Yu., Dzhazovskiy N.B. Sovremennaya releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem: uchebnoe posobie [Modern relay protection and automation of electrical power systems: tutorial]. Penza: PGU Publ., 2017. 296 p.
11. Zhukov A.V. Obobshchenie mirovykh tendenciy razvitiya tekhniki i tekhnologiy elektroenergetiki v oblasti raboty IK V5 “Releynaya zashchita i avtomatika” releynoy zashchity i avtomatiki energosistem (po itogam 47-oy sessii SIGRE 2018 g.) [Generalization of world trends in the equipment and technologies development of electric power industry in the field of operation of IC V5 “Relay protection and automation” of relay protection and automation of power systems (based on the results of the 47th



session of CIGRE in 2018)]. URL: [http://cigre.ru/47/pdf/B5\\_%D0%96%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2.pdf](http://cigre.ru/47/pdf/B5_%D0%96%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2.pdf) (Accessed 22.09.2021).

12. Hunt R., Zapella M., Pimentel C., Silvano G. Tutorial on Networking for Digital Substations. *72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. USA. TX. College Station, 2019. Pp. 1–15. DOI: 10.1109/CPRE.2019.8765874.

13. Dubrov V.I., Oganyan R.G., Narakidze N.D., Aleksanyan G.K. On the mathematical simulation of digital substation technological processes. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. T. 12. No. 2. Pp. 276–282.

14. Khrennikov A.Yu., Aleksandrov N.M. Approaches and experience in testing of digital substation primary equipment and relay protection. *Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Elektroenergetika*, 2019. 2019. No. 10. pp. 280–283.

15. Barbosa J.D., Santos R., Romero J.F., Asano P.T., Neto A.V., Junior J.R., Junior J.B., Cugnasca P.S. Methodology for Reliability Indices Determination in Electric Power Substation. *IEEE Latin America Transactions*, 2018. No. 16, pp. 1959–1968. DOI: 10.1109/TLA.2018.8447363.

16. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Raschet pokazatelej nadezhnosti tsifrovoy podstancii [Digital Substation Reliability Evaluation]. *Vestnik YUUrGU. Seriya "Energetika" [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering]*. 2019. Vol. 19, No. 4, pp. 41–51. DOI: 10.14529/power190405.

17. Pinchukov P., Makasheva S. Estimation of Digital Substation Reliability Indices. *VIII International scientific Siberian Transport Forum, Vol. 1, Book series: Advances in intelligent systems and computing*, 2020. Vol. 1115. Pp. 3–14. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-21.

18. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Improving methods for reliability assessment of electric power systems *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017. Vol. 692. pp. 162–169. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_17.

#### Информация об авторах

**Пинчуков Павел Сергеевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры систем электроснабжения, директор Электроэнергетического института, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: [pinchukov-pavel@mail.ru](mailto:pinchukov-pavel@mail.ru).

#### Information about the authors

**Pavel S. Pinchukov** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Power Supply Systems, Director of the Electric Power Institute, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: [pinchukov-pavel@mail.ru](mailto:pinchukov-pavel@mail.ru).