

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОВЕРКИ КОМПЛЕКСОВ ЦИФРОВОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рассмотрены особенности применения цифровых устройств релейной защиты электроэнергетических установок. Дано техническое описание и представлены основные заключения по опытной эксплуатации полигона программно-технического комплекса «Цифровая подстанция». Предложен способ имитационного моделирования децентрализованной системы релейной защиты, осуществляющей связь между элементами по цифровым протоколам. Представленная модель учитывает особенности компоновки реального комплекса защит и может быть использована при проверке корректности функционирования действующих устройств, а также при построении алгоритмов для новых цифровых защит, соответствующих стандарту МЭК 61850.

Ключевые слова: цифровая подстанция, МЭК 61850, цифровой двойник энергосистемы, децентрализованная релейная защита, моделирование аварийных режимов.

Наращивание темпов производства неизбежно связано с реконструкцией электроустановок и вводом новых энергетических мощностей [1]. Поскольку аварии в энергетике связаны с нарушением электроснабжения, недоотпуском продукции, убытками и отличаются сложностью восстановления нормального режима, устройства защиты электроустановок представляют собой сложную систему, которая учитывает различные виды возможных повреждений.

К устройствам релейной защиты предъявляют четыре основных требования [2]: селективность, быстродействие, чувствительность и надежность. Под селективностью понимают способность отключать только поврежденный участок сети. Быстродействие защиты является главным условием для сохранения устойчивости энергосистемы. Чувствительность защит определяется по условию реагирования на отклонения от нормального режима и резервирования следующего участка энергосистемы. Безотказная работа при повреждениях в пределах установленной зоны и несрабатывание в режимах, при которых работа не предусматривается, определяют надежность защиты.

Помимо основных требований, существует ряд дополнительных, связанных скорее с современной техноэкономической парадигмой. Например, интеграция комплексов защит в «Умные сети» (Smart

Grid) [3], увеличение быстродействия за счет уменьшения времени работы РЗА по стандарту МЭК 61850 [4], упрощение возможности передачи данных с различных энергообъектов для анализа селективности и др.

В последнее время в России и в мире взят курс на цифровую трансформацию энергетики [5]. Ряд крупных организаций, таких как ПАО ФСК «ЕЭС», ПАО «Сибур», ПАО «Газпром нефть» и др. [6–8] вводят в опытную эксплуатацию так называемые «Цифровые подстанции» — распределительные устройства, в которых сети и системы связи реализуются в соответствии со стандартом МЭК-61850 [4]. На данный момент на таких объектах применяются децентрализованные системы защиты. Следующим закономерным шагом видится применение централизованных защит.

Абсолютная надежность защиты технически невозможна, тогда как чрезмерные требования к надежности влекут за собой неприемлемо высокие затраты. Полной реализации рационального сочетания надежности и затрат для релейной защиты электрической системы со сложной конфигурацией добиться пока не удалось. Принятие стандарта МЭК-61850 (Сети и системы связи на подстанциях), описывающего форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов энергообъекта и свод правил для организации собы-



Рис. 1. Программно-технический комплекс «Цифровая подстанция» АО «Газпром нефть – ОНПЗ»

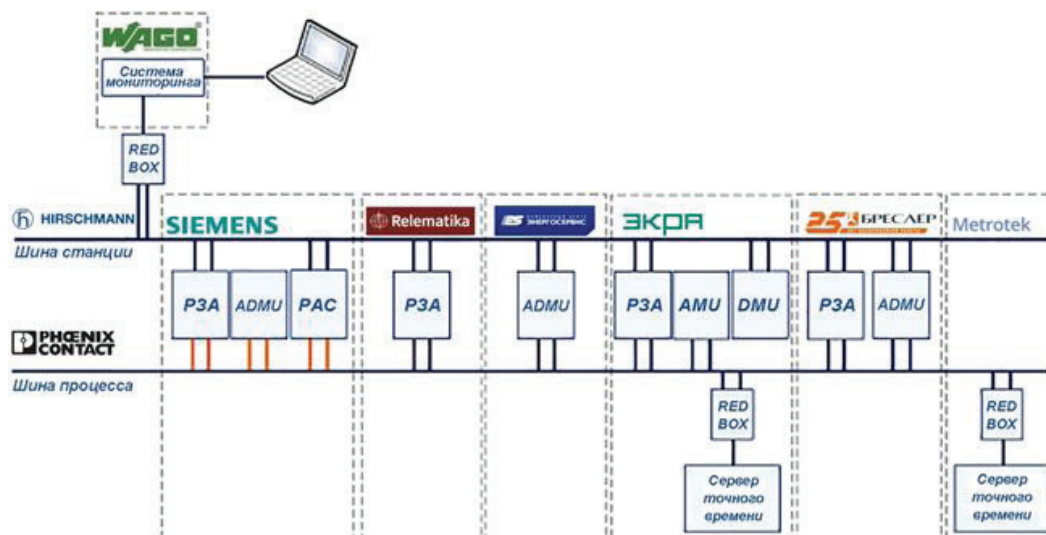


Рис. 2. Функциональная схема ПТК «Цифровая подстанция»

тийного протокола передачи данных не принесло ожидаемых результатов. Совершенного алгоритма работы централизованных систем релейной защиты на данный момент не разработано. Существующие на сегодняшний день алгоритмы централизованных защит не могут обеспечить требования по надежности для сложных и ответственных энергосистем. Кроме того, анализ корректности работы децентрализованных систем защиты, соответствующих требованиям МЭК 61850, не является очевидным и вызывает определенные трудности.

Целью данной работы является имитационное моделирование комплекса устройств децентрализованной релейной защиты для промышленных энергообъектов и определение возможности применения результатов моделирования для проверки и технического обслуживания подобных защитных устройств.

В феврале 2019 года на Омском НПЗ «Газпром нефть» начал работу опытный полигон программно-технического комплекса «Цифровая подстан-

ция». Новый объект станет ключевым элементом в процессе перехода системы управления энергетическими объектами полностью в цифровой формат, что существенно повысит эффективность, безопасность и надежность энергосистемы предприятия (рис. 1).

Программно-технический комплекс «Цифровая подстанция» Омского НПЗ не имеет аналогов в нефтеперерабатывающей отрасли и включает в себя современную инфраструктуру интеллектуальных устройств защиты и управления [9]. Комплекс позволяет специалистам предприятия в режиме реального времени тестировать надежность и устойчивость работы оборудования различных производителей в единой информационной среде, подключенного к действующему объекту. Опытную эксплуатацию этого комплекса осуществляют специалисты ООО «Газпромнефть-Энергосервис». Результаты испытаний лягут в основу проектов по строительству новых объектов энергообеспечения собственных НПЗ «Газпром нефть» с примене-

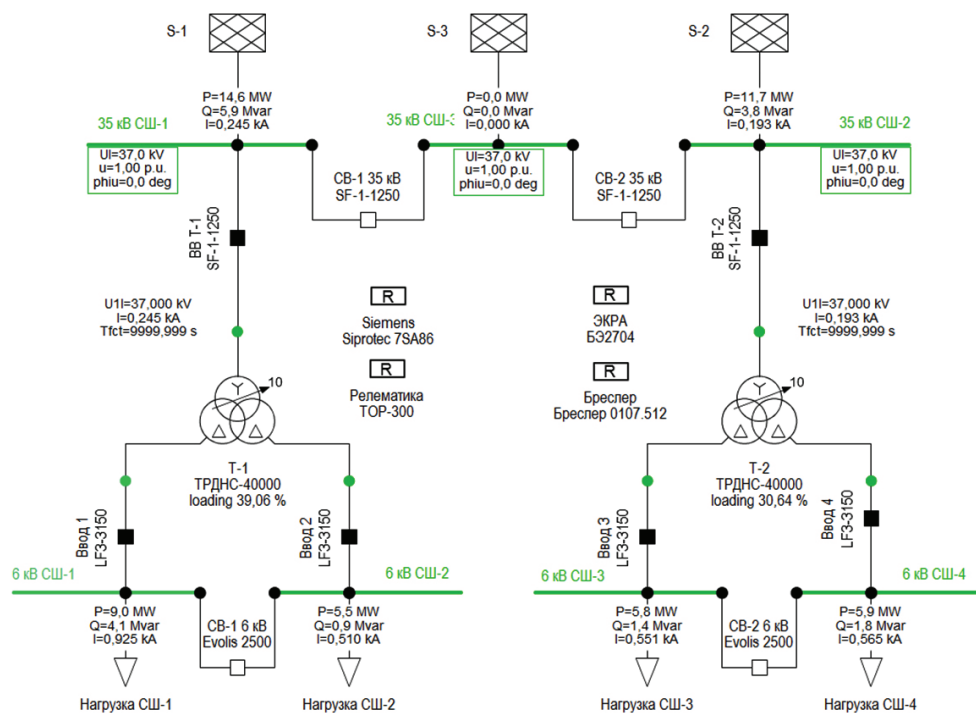


Рис. 3. Имитационная модель участка энергосистемы

нием технологии «цифровой подстанции». Функциональная схема построения связи ПТК «Цифровая подстанция» представлена на рис. 2.

При проведении комплексного опробования проверка взаимодействия с другими устройствами защиты, электроавтоматики, управления и сигнализации с использованием GOOSE-коммуникации заключается в фиксации:

- формирования терминалом-источником исходящих сообщений;
- формирования терминалом-приемником соответствующих выходных воздействий;
- формирования терминалом (приемником) исходящих GOOSE сообщений;
- времени прохождения сообщений.

В случае, если комплекс РЗА состоит из устройств, выполненных в соответствии с второй редакцией МЭК 61850, все терминалы, участвующие в проверке, переводят в тестовый режим. При этом исходящие сообщения указанных терминалов станут недоступны для всех внешних устройств, что вносит ряд затруднений при проведении комплексного опробования.

По результатам первого этапа опытной эксплуатации выявлены следующие проблемы:

1. Отсутствие механизма приемки оборудования от производителей. Не имея достаточного опыта в обслуживании и эксплуатации систем подобного рода, задача оценки соответствия поставленного оборудования требованиям технического задания является весьма сложной. Несмотря на то, что изготовители цифровых устройств декларируют полную совместимость между аналогичными устройствами других производителей, возможны случаи несовместимости даже при соответствии применяемых устройств требованиям МЭК 61850 [10].

2. Недостаточная квалификация обслуживающего персонала и отсутствие опыта проектных организаций. Помимо компетенций в области электроэнергетики и релейной защиты, необходимо также

обладать знаниями в области информационных технологий. К решению данной проблемы необходим структурный подход по подготовке специалистов, обладающих компетенциями в разных, зачастую не связанных между собой областях.

3. Отсутствие опыта в эксплуатации и обслуживании подобных комплексов.

4. Необходимость разработки типовых мероприятий для проверки функционирования устройств защиты. В отличие от традиционных устройств защиты, механизм проверки оборудования, функционирующего в соответствии с требованиями МЭК 61850, не является очевидным. Требуется разработка дополнительных технических средств и мероприятий, способствующих улучшению восприятия результатов проверки.

Одним из решений данной проблемы может стать имитационное моделирование применяемого комплекса защит в специализированном программном обеспечении.

В рамках политики цифровой трансформации, в ООО «Газпромнефть-Энергосервис» с 2018 года ведутся работы по созданию цифровых двойников энергосистем, заключающиеся в создании математических моделей распределительной сети и силового электрооборудования нефтеперерабатывающих предприятий. Моделирование осуществляется с использованием программного продукта DigSilent PowerFactory — современного средства с полным набором функций для расчета и анализа режимов работы распределительных сетей НПЗ [11]. Это программное обеспечение возможно адаптировать для целей анализа корректности работы защит, а также для проектирования систем защит новых цифровых подстанций.

Выполним построение упрощенной имитационной модели ПТК «Цифровая подстанция» Газпромнефть в программной среде DigSilent PowerFactory.

В соответствии с реальной топологией сети, модель представляет собой распределительное устройство 35/6 кВ, которое оснащено двумя транс-

Таблица 1

Токи короткого замыкания энергосистемы

| Сеть | $I_{кз.макс}$, кА | $R/X_{макс}$, о.е. | $I_{кз.мин}$, кА | $R/X_{мин}$, о.е. |
|------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| S-1 | 5,929 | 0,1 | 5,77 | 0,1 |
| S-2 | 18,82 | 0,1 | 17,42 | 0,1 |
| S-3 | 5,934 | 0,1 | 5,775 | 0,1 |

форматорами с расщепленной обмоткой низкого напряжения (рис. 3). Питание подстанции осуществляется от двух независимых вводов с возможностью перехода на питание от третьего ввода. Параметры энергосистемы (табл. 1) заданы значениями токов КЗ на шинах 35 кВ. Данные о загрузке трансформаторов импортированы из систем коммерческого учета электроэнергии.

На трансформаторе Т-1 установлены устройства защиты Siprotec 7SA86 (Siemens) и TOP-300 (Релематика). Ввод 2 защищается с помощью БЭ2704 (ЭКРА) и Бреслер 0107.512 (Бреслер).

Как уже отмечалось ранее, каждое устройство способно резервировать работу других терминалов или самостоятельно осуществлять защиту двух трансформаторов. Выполним имитационное моделирование описанного принципа построения защиты в программном обеспечении DigSilent PowerFactory. С целью экономии времени и ресурсов выполним моделирование одной ступени максимальной токовой защиты (МТЗ).

Блок-схема устройства защиты, функционирующего в соответствии с принципами работы

«Цифровой подстанции», выполненная в программной среде DigSilent PowerFactory, представлена на рис. 4.

Аналоговые сигналы с трансформаторов тока (ТТ) и трансформаторов напряжения (ТН) поступают в устройства сопряжения с объектом (УСО), откуда в формате SV-протокола (Sampled Values) отправляются на коммутатор. Коммутатор распределяет сигналы по соответствующим устройствам релейной защиты. Помимо данных в формате SV-протокола, устройства защиты осуществляют связь между собой по GOOSE-протоколу (Generic Object Oriented Substation Event) [12]. В рассматриваемом случае, для обеспечения читаемости схемы (рис. 4) взаимосвязь между устройствами защиты по GOOSE-протоколу выполнена во внешних логических блоках.

При получении сигнала с пускового органа защиты терминалы начинают выполнять взаимный опрос соседних устройств защиты. В случае, если произошел отказ устройства, отвечающего за защиту присоединения, сигнал на отключение повреждения формирует следующее по рангу устройство защиты. В случае повторного отказа ситуация повторяется.

Для проверки корректности работы разработанной схемы необходимо принудительно создать аварийный режим. Для этого в программной среде PowerFactory выполним моделирование трехфазного короткого замыкания на вводе трансформатора Т-1, предварительно осуществив вывод трех устройств защиты из четырех (рис. 4). Функционирование защиты можно оценить по параметру T_{fct} (время устранения повреждения). В случае срабатывания защиты этот параметр возвращает значения уставки по времени отключения. В противном

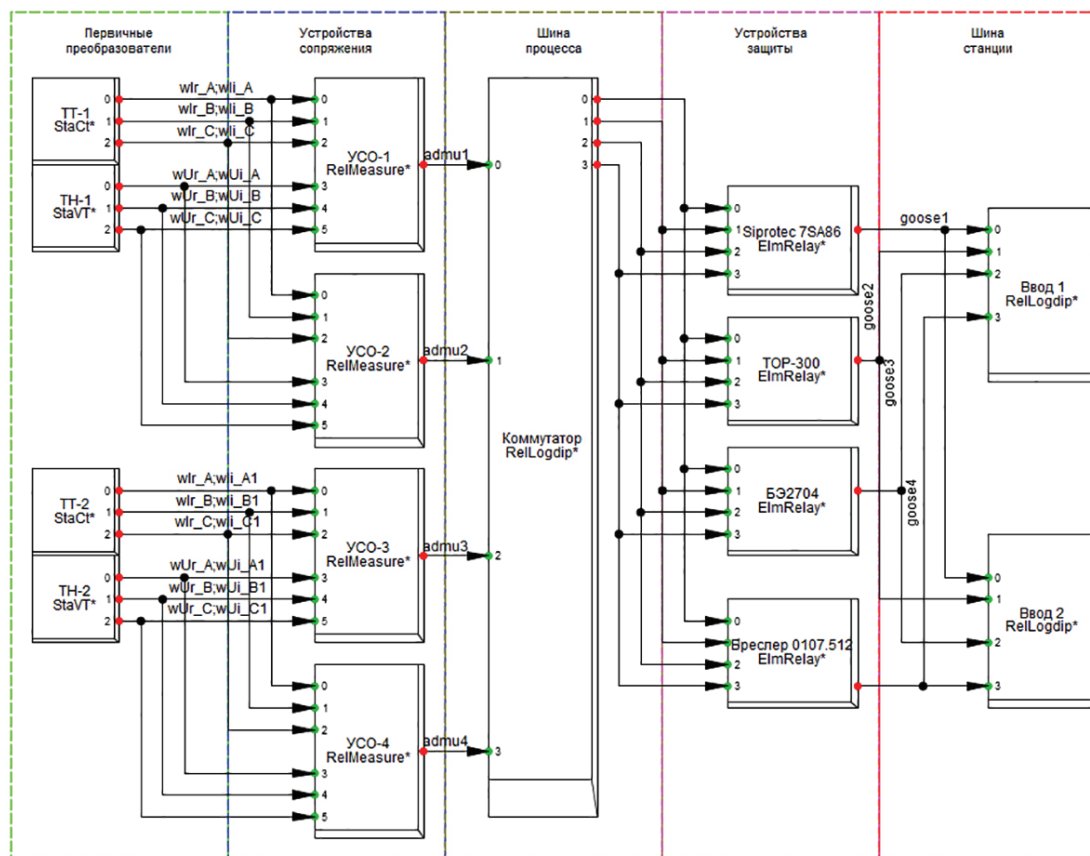


Рис. 4. Математическая модель комплекса защит, соответствующего МЭК 61850

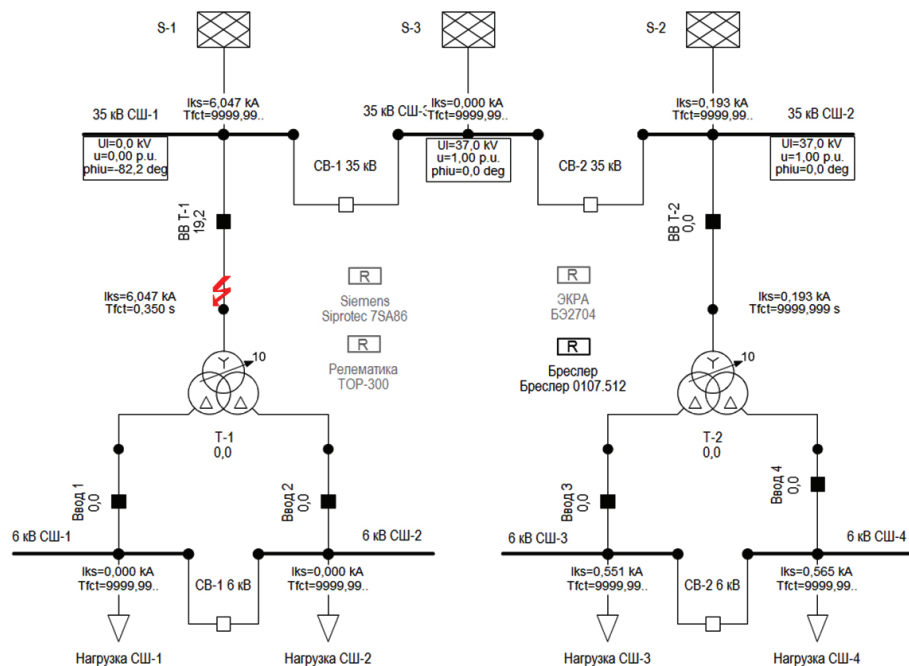


Рис. 5. Моделирование аварийного режима на участке сети

случае его значение равно максимально возможно времени.

Анализ результатов расчета (рис. 5) показал, что аварийный режим, возникший на первом вводе распределительного устройства, при условии вывода из работы защит этого присоединения, был устранен защитой соседнего присоединения за время $T_{fct} = 0,35$ с (при моделировании не учтено собственное время выключателя). В связи с этим можно сделать вывод о корректной работе модели комплекса цифровых защит.

В ходе работы выполнено тестовое моделирование цифрового комплекса защит на примере максимальной токовой защиты. Функционирование разработанного алгоритма в условиях созданного ненормального режима соответствует теоретическим ожиданиям. Следующим этапом планируется сопоставление работы каналов связи построенной модели и объекта моделирования. В связи с тем, что функционал применяемого программного обеспечения позволяет сохранять результаты экспериментов в Comtrade-формате [13], файлы моделирования можно использовать при отладке реальных систем защиты. Для этого из программы выполняется экспорт данных в формате Comtrade и с помощью испытательных комплексов РЕТОМ-51, РЕТОМ-61850 условия моделирования могут быть применены к программно-техническому комплексу «Цифровая подстанция», в ходе чего будет дана оценка корректности функционирования защит.

Представленный подход к моделированию систем релейной защиты можно использовать для проверки предлагаемых технических решений, в том числе соответствующих требованиям МЭК 61850. Кроме того, данную программную среду можно использовать для разработки собственных алгоритмов централизованных и децентрализованных устройств релейной защиты.

Библиографический список

1. Тряпицын А. Б., Кирпичникова И. М., Бухтояров В. Ф. [и др.]. Анализ аварийности и травматизма в электроэнергети-

ке Российской Федерации // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2018. Т. 18, № 4. С. 30–40. DOI: 10.14529/power180404.

2. ГОСТ Р 56865-2016. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Релейная защита и автоматика. Технический учет и анализ функционирования. Общие требования. Введ. 2016–09–01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200132292> (дата обращения: 10.09.2019).

3. Куликов А. Л., Осокин В. Л., Папков Б. В. Проблемы и особенности распределенной электроэнергетики // Вестник НГИЭИ. 2018. № 11 (90). С. 123–136.

4. Бочкарев С. В., Хисамов Р. Р. Повышение эффективности устройств релейной защиты и автоматики с использованием микропроцессорных терминалов в автоматизированных системах управления технологических процессов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 5. С. 172–175. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-5-172-175.

5. Хлебцов А. П., Шилин А. Н. Тенденции и перспективы развития информационно-измерительных систем диагностики цифровых подстанций // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2018. № 2 (23). С. 31–36.

6. Официальный сайт ПАО «СИБУР Холдинг». URL: <https://www.sibur.ru/press-center/news/Vvedeny-v-stroyklyuchevye-obekty-dlya-elektrosnabzheniya-ZapSibNeftekhima/> (дата обращения: 10.09.2019).

7. Официальный сайт ПАО «ФСК ЕЭС» URL: http://www.fsk-ees.ru/press_center/company_news/?ELEMENT_ID=226377 (дата обращения: 10.09.2019).

8. Официальный сайт ПАО «Газпром нефть» URL: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/news/2443184/> (дата обращения: 10.09.2019).

9. ГОСТ Р МЭК 61850-7-3-2009. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 7. Базовая структура связи для подстанций и линейного оборудования. Раздел 3. Классы общих данных. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-mek-61850-7-3-2009> (дата обращения: 10.09.2019).

10. Вертинский А. А. Проблема внедрения стандарта МЭК 61850 в системы микропроцессорной релейной защиты и автоматики // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: сб. материалов. Тюмень, 2015. С. 17–20.

11. DIgSILENT PowerFactory // Официальный сайт производителя ПО. URL: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html> (дата обращения: 01.08.2019).

12. Лизунов И. Н., Васев А. Н., Мисбахов Р. Ш. [и др.]. Технологии передачи данных в современных системах релейной защиты и автоматики и их показатели качества // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 52–63.

13. Celeita D., Gutierrez M., Toro M. [et al.]. Out-of-step protection modeling for playback testing applied to industrial generators // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/TIA.2019.2897670.

СИМАКОВ Александр Владимирович, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

SPIN-код: 3865-0506

AuthorID (РИНЦ): 894651

Адрес для переписки: simak_off94@mail.ru

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафе-

дрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: hvv-omgups@mail.ru

СКОРОХОДОВ Вячеслав Игоревич, магистрант гр. ЭЭМ-191 факультета элитного образования и магистратуры Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: skorohodov154@gmail.com

Для цитирования

Симаков А. В., Харламов В. В., Скороходов В. И. Разработка метода проверки комплексов цифровой релейной защиты электроэнергетических установок // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 58–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-58-63.

Статья поступила в редакцию 17.09.2019 г.

© А. В. Симаков, В. В. Харламов, В. И. Скороходов