

ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Рассмотрены особенности цифровой трансформации электроэнергетики и вопросы внедрения интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) во вторичные цепи электрических станций и подстанций. Выполнен анализ нормативно-методической документации, определены особенности плано-предупредительного технического обслуживания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), возможности и перспективы организации технического обслуживания оборудования по состоянию. Определены этапы, исполнение которых не зависит от формы организации технического обслуживания. Предложен способ проверки электрических и временных характеристик максимальной токовой защиты устройства РЗА, разработанного в соответствии со стандартом МЭК-61850, при работе в локальной вычислительной сети цифровой подстанции архитектуры III.

Ключевые слова: цифровая подстанция, МЭК-61850, релейная защита, техническое обслуживание по состоянию, интеллектуальное электронное устройство.

Цифровизация стала парадигмой ускоренного экономического развития в XXI веке. В её основе лежит обмен данными в режиме реального времени. Цифровой трансформации подвергаются все отрасли экономики, от малого бизнеса до топливно-энергетического комплекса. В Российской Федерации утвержден ряд законодательных актов, являющихся основанием для тотальной модернизации отраслей экономики [1–2].

Главным объектом преобразований в электроэнергетике является цифровая подстанция — энергообъект, на котором доступ к информации, её обработка и передача осуществляются в цифровом виде в отличие от традиционной компоновки подстанции, в которой передача информации осуществляется по аналоговым каналам связи. В первую очередь речь идет об устройствах релейной защиты и автоматики (РЗА) [3–5]. Нормативной основой, регламентирующей цифровые коммуникации в электроэнергетике, является серия стандартов МЭК-61850 «Сети и системы связи на подстанциях», описывающих форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов энергообъекта и свод правил для организации событийного протокола передачи данных [6]. Область применения МЭК 61850 — системы связи внутри подстанции. Изменения в структурах вторичных цепей электрических станций и подстанций требу-

ют разработки новых подходов к их обслуживанию и диагностированию неисправностей.

Целью данной работы является разработка способа проверки токовых защит максимального действия устройства РЗА, сконфигурированного в соответствии со стандартом МЭК-61850.

Техническое обслуживание (ТО) устройств РЗА является важнейшей частью эксплуатационного цикла вторичных цепей электрических станций и подстанций. Именно благодаря строго регламентированной системе ТО обеспечивается безопасная и безаварийная эксплуатация силового электрооборудования. Для современных (микропроцессорных) устройств РЗА уровней напряжения 0,4–35 кВ, цикл ТО, в зависимости от категории помещения установки, составляет 6, 8 или 12 лет и включает в себя проверку при новом включении (наладку), первый профилактический контроль, профилактический контроль, опробование и профилактическое восстановление. Период эксплуатации устройства или срок его службы до списания определяется износом устройства до такого состояния, когда восстановление его становится нерентабельным [7–9].

В 2020 году Министерством энергетики Российской Федерации утверждены Правила технического обслуживания устройств и комплексов релейной защиты и автоматики и внесены изменения в требования к обеспечению надежности и безопас-

ности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок [9]. Принципиальным изменением стало разделение технического обслуживания по видам организации на планово-предупредительное ТО и ТО по состоянию. В настоящее время система планово-предупредительного ТО является основной и применяется для всех типов устройств РЗА независимо от элементной базы, а также для вторичного оборудования. Систему ТО по состоянию допускается применять только для микропроцессорных устройств РЗА, в отношении которых выполняются следующие условия и требования:

— устройства установлены в помещениях первой и второй категории, согласно [10];

— не превышен срок службы устройства РЗА;

— выполнены проверка при новом включении (наладка) и первый профилактический контроль для новых устройств;

— выполнены проверка при новом включении (наладка), первый профилактический контроль, профилактический контроль или восстановление в течение половины времени цикла ТО до планируемого обслуживания по состоянию;

— обеспечен автоматизированный сбор информации с РЗА и мониторинг состояния устройства с помощью автоматизированного рабочего места (АРМ РЗА).

Анализ требований показал, что лишь для ограниченного числа устройств РЗА может быть организовано ТО по состоянию. В то же время все перечисленные требования соответствуют свойствам устройств РЗА цифровых подстанций. Переход на ТО по состоянию является одним из ключевых векторов цифровизации электроэнергетики и важнейшим эффектом внедрения цифровых подстанций. За счет этого шага ожидается повышение эффективности ТО вторичных систем энергообъекта с одновременным снижением операционных затрат. Тем не менее, исходя из существующих требований, необходим способ проверки электрических и временных характеристик устройств РЗА цифровых подстанций при наладке и первом профилактическом контроле.

В нормативной документации [11] существует определение трех архитектур цифровых подстанций (табл. 1). Цифровые подстанции архитектуры I выполнены со стандартными аналоговыми и дискретными цепями, протоколы МЭК используются только для связи со SCADA. Подстанции архитектуры II, помимо свойств предыдущего типа, способны осуществлять горизонтальный обмен данными между устройствами по протоколу GOOSE. Подстанция архитектуры III является полностью цифровизованной и оперирует величинами измерений и горизонтального обмена в формате протоколов МЭК-61850. Рассмотрим принцип проверки устройства РЗА цифровой подстанции архитектуры III.

Электрические величины с измерительных трансформаторов тока и напряжения с помощью оцифровки в устройстве сопряжения (УСО) поступают в локальную вычислительную сеть (ЛВС) подстанции, откуда распределяются коммутаторами на интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) в соответствии с коммуникационными параметрами.

В соответствии с правилами [10], комплексная проверка устройств проводится при номинальном напряжении оперативного тока при подаче на устройство параметров аварийного режима от постороннего источника питания и полностью собранных цепях устройств при закрытых кожухах реле, при этом возможность воздействия на другие устройства РЗА и коммутационные аппараты должна быть исключена.

Проверяется правильность регистрации устройством поданной величины и определяется погрешность измерения (1):

$$\varepsilon_{I_{\text{пер}}} = \left(1 - \frac{I_{\text{пер}}}{I_{\text{исп}}} \right) \cdot 100\% , \quad (1)$$

где $I_{\text{исп}}$ — значение испытательного тока, $I_{\text{пер}}$ — регистрируемый устройством ток.

Для контроля времени действия защиты подается величина, равная 1,3 уставки срабатывания. Отклонение времени срабатывания определяется по формуле (2):

$$\Delta t_{\text{ср}} = t_{\text{уст}} - t_{\text{ср}} , \quad (2)$$

где $t_{\text{уст}}$ — уставка защиты по времени, $t_{\text{ср}}$ — время срабатывания защиты.

При комплексной проверке производится измерение полного времени действия каждой из ступеней устройства, в том числе по цепям ускорения, и проверяется правильность действия сигнализации.

Ток и напряжение, соответствующие аварийному режиму, подаются на все ступени и фазы (или все комбинации фаз) проверяемого устройства. Для защит максимального действия подаваемая величина составляет 0,9 и 1,1 от уставки срабатывания для контроля несрабатывания защиты в первом и срабатывания во втором случаях. Определяется погрешность тока срабатывания по формуле (3) и коэффициент возврата по формуле (4):

$$\varepsilon_{I_{\text{ср}}} = \left(1 - \frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{уст}}} \right) \cdot 100\% , \quad (3)$$

где $I_{\text{уст}}$ — уставка защиты по току, $I_{\text{ср}}$ — ток срабатывания защиты.

Таблица 1

Особенности архитектур цифровых подстанций

Вид	Протоколы МЭК	Обмен данными
Архитектура I	MMS	Аналоговые измерения и дискретные горизонтальные связи
Архитектура II	MMS, GOOSE	Аналоговые измерения и цифровые горизонтальные связи
Архитектура III	MMS, GOOSE, SV	Цифровые измерения и горизонтальные связи

Таблица 2

Допустимые отклонения параметров срабатывания устройств РЗА [8]

Нормируемый параметр	Погрешность
Выдержка времени защит с независимой характеристикой	$\pm 0,1c$
Переменный ток и напряжение срабатывания реле	$\pm 3 \%$
Коэффициент возврата реле максимальной величины, не менее	0,9

Таблица 3

Параметры настройки токовой защиты трансформатора 35/6 кВ

Наименование	K_{TT} , о.е.	I_1 , А	I_2 , А	$t_{уст}$, с	Характеристика
МТЗ ВН II ст.	1000/5	1050	5,25	1,5	Независимая (Definite Time)

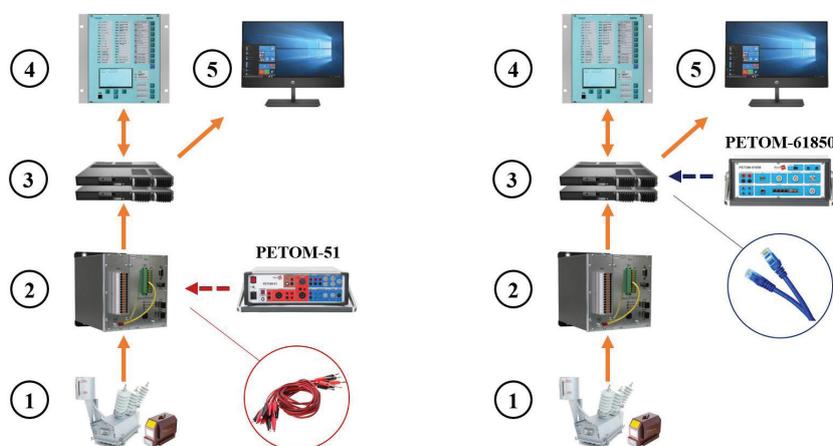


Рис. 1. Схема подключения испытательных установок

$$K_v = \frac{I_{вз}}{I_{сп}}, \quad (4)$$

где $I_{вз}$ — ток возврата защиты.

Допустимые погрешности и диапазоны определяемых величин приведены в табл. 2.

Особенностью устройств РЗА, спроектированных в соответствии со стандартом МЭК-61850, является отсутствие разъемов для подключения аналоговых входов. Кроме того, могут отсутствовать разъемы для подключения дискретных входов и выходов. Связь с терминалом может быть осуществима только с помощью интерфейсных разъемов, что сделает невозможным испытание с помощью постороннего аналогового источника без использования дополнительных преобразователей.

Выполним проверку электрических и временных характеристик устройства РЗА цифровой подстанции, а именно максимальной токовой защиты силового трансформатора 35/6 кВ с помощью аналоговой и цифровой испытательной установки. Настройки защиты приведены в табл. 3.

Для проверки с помощью аналогового источника применяется испытательная установка РЕТОМ-51 [12]. Выходы аналогового источника подключаются к предварительно подготовленным цепям тока

и напряжения в соответствии с маркировками (рис. 1а). Для регистрации факта и времени срабатывания токовой защиты используется контрольный выход, назначаемый в конфигураторе на дискретный разъем терминала (при наличии) или на преобразователь дискретных сигналов (ПДС) устройства сопряжения.

Для измерения тока срабатывания защиты в окне ручной настройки РЕТОМ-51 (рис. 2) выполняется ступенчатое изменение величины подаваемого тока от 0,9 установленного значения. Значение срабатывания защиты фиксируется автоматически при появлении сигнала на контрольном выходе (условием замыкания реле назначается пуск токовой защиты). После срабатывания осуществляется уменьшение тока с идентичным шагом для проверки тока возврата защиты, который фиксируется автоматически при размыкании реле контрольного выхода. Данная операция повторяется три раза, вычисляется коэффициент возврата и погрешность тока срабатывания.

Для измерения времени срабатывания защиты подается величина, равная 1,3 уставки срабатывания. Условием замыкания реле контрольного выхода назначается работа токовой защиты. Время срабатывания регистрируется автоматически при появлении сигнала на контрольном выходе. Данная

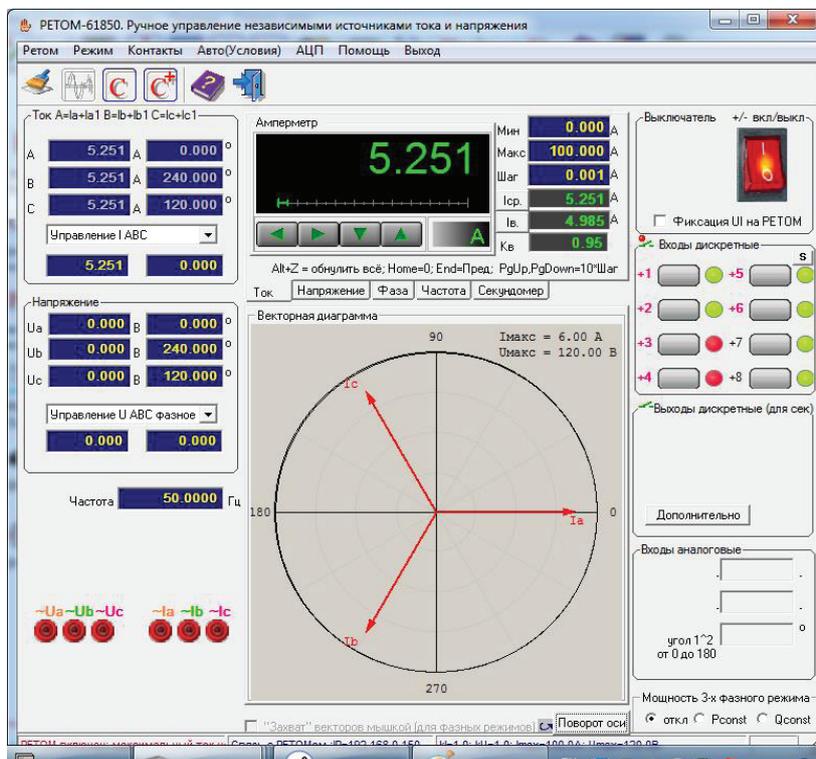


Рис. 2. Окно ручной настройки РЕТОМ

Таблица 4

Результаты проверки параметров устройства РЗА

Установка	Фаза	$I_{исп}, A$	$I_{пер}, A$	$\epsilon_{пер}, \%$	$N\theta$	$I_{ср}, A$	$I_{вз}, A$	$K_B, o.e$	$\epsilon_{иср}, \%$	$t_{ср}, c$	$\Delta t_{ср}, c$
РЕТОМ-51	A	5,000	4,996	0,08	1	5,271	4,998	0,948	0,4	1,525	0,025
	B	5,000	4,997	0,06	2	5,284	5,001	0,946	0,648	1,528	0,028
	C	5,000	4,996	0,08	3	5,272	4,997	0,948	0,419	1,531	0,031
РЕТОМ-61850	A	5,000	5,000	0	1	5,251	4,985	0,949	0,019	1,524	0,024
	B	5,000	5,000	0	2	5,257	4,993	0,95	0,133	1,525	0,025
	C	5,000	4,999	0,02	3	5,253	4,997	0,951	0,057	1,524	0,024

Таблица 5

Значения сигналов исходящего GOOSE-сообщения устройства РЗА

Имя сигнала	Порядковый номер сигнала	Значение сигнала
GOOSE 1	1	Пуск токовой отсечки
GOOSE 2	2	Работа токовой отсечки
GOOSE 3	3	Пуск МТЗ
GOOSE 4	4	Работа МТЗ

операция повторяется три раза, вычисляется погрешность времени срабатывания. Результаты проверки устройства РЗА приведены в табл. 4.

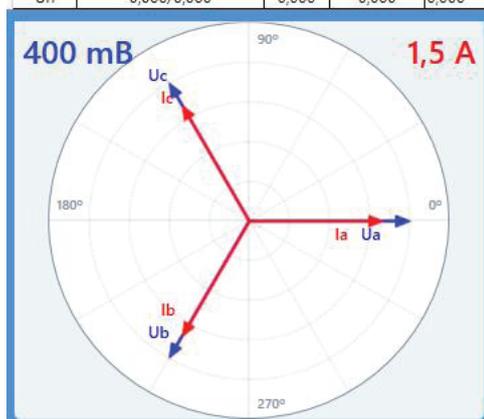
Для проверки с помощью цифрового источника применяется испытательная установка РЕТОМ-61850 [12]. Цифровой источник подключается к ЛВС в шину процесса и шину станции (рис. 1б). Для проверки устройства РЗА источники генерируют значения токов и напряжений в виде сетевого трафика (протокол Sampled Values), а информацию о состоянии устройства получают в виде сообщений с набором булевых переменных (протокол GOOSE) [13].

Для измерения тока срабатывания защиты в конфигураторе РЕТОМ-61850 настраивается исходящий SV-поток с обязательным указанием сетевых параметров: MAC-адрес, идентификатор потока (svID), идентификатор приложения (appID), идентификатор VLAN (vlanID). Для автоматической регистрации параметров настраивается прием входящих GOOSE-сообщений, и их автоматическая нумерация. Сведения о параметрах SV и GOOSE

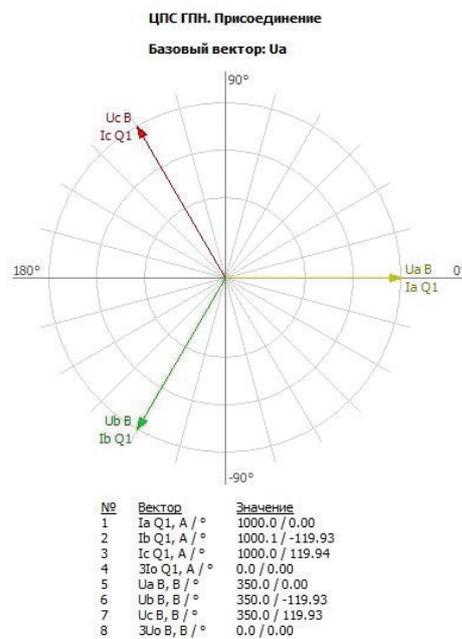
хранятся в конфигурации устройства РЗА. Перечень сигналов GOOSE-сообщения устройства РЗА представлен в табл. 5.

Для измерения тока срабатывания принцип подачи измерительных сигналов аналогичен преды-

Сигнал	Первичные/вторичные	Угол, °	Частота, Гц	RMS
Ia	1000,000/5,000	0,000	50,000	1000,000
Ib	1000,000/5,000	-120,000	50,000	1000,000
Ic	1000,000/5,000	120,000	50,000	1000,000
In	0,000/0,000	0,000	0,000	0,000
Ua	350,000/0,318	0,000	50,000	350,000
Ub	350,000/0,318	-120,000	50,000	350,000
Uc	350,000/0,318	120,000	50,000	350,000
Un	0,000/0,000	0,000	0,000	0,000



а)



б)

Рис. 3. Векторные диаграммы аварийного режима

дущему эксперименту. Регистрация тока срабатывания и возврата происходит по факту изменения состояния 3-й переменной GOOSE-сообщения (согласно табл. 5, пуск токовой защиты). Для регистрации времени срабатывания используется 4-я переменная GOOSE-сообщения (согласно табл. 5, работа токовой защиты). На рис. 3а изображена векторная диаграмма тока, отправляемая испытательной установкой в формате SV, а на рис. 3б изображены величины, принимаемые устройством РЗА. Результаты испытаний и измерений сведены в табл. 4.

Анализ результатов измерений показал:

- устройство РЗА соответствует требованиям нормативно-технической документации по величине погрешности тока и времени срабатывания реле и допустимым значениям коэффициента возврата;

- при проверке устройства защиты аналоговой испытательной установкой отмечается более высокая погрешность измеряемого тока и тока срабатывания защиты, чем при испытании цифровой установкой, что обусловлено дополнительными потерями в аналоговых цепях и УСО;

- более высокие значения погрешности времени срабатывания при испытании аналоговой установкой могут быть обусловлены инерционностью источника питания.

В ходе работы выполнен анализ нормативной документации, регламентирующей виды, объемы и порядок технического обслуживания устройств РЗА. Определено, что переход на ТО по состоянию связан с рядом условий и в основном применим к терминалам РЗА цифровых подстанций. В то же время ТО по состоянию не отменяет обязательных проверок оборудования при наладке и первом профилактическом контроле, в частности, проверки электрических и временных характеристик токовой защиты. Выполнение измерений такого характера по действующей методике с помощью аналоговых испытательных установок связано с подключениями в токовые цепи, что негативно сказывается на времени проверки оборудования, электробезопасности персонала и сводит на нет преимущества,

предоставляемые цифровизацией вторичных цепей электрических станций и подстанций. Кроме того, при дальнейшей модернизации вторичных цепей энергообъектов (например, при замене электромагнитных трансформаторов тока оптическими) проверка с помощью аналоговых испытательных установок станет невозможной. Таким образом, необходим способ быстрой проверки характеристик современных устройств РЗА, в предельном случае — автоматический. Рассмотренный в работе способ проверки электрических и временных характеристик токовой защиты силового трансформатора 35/6 кВ с помощью установки РЕТОМ-61850 повышает качество, оперативность и безопасность испытания устройств РЗА цифровых подстанций за счет исключения из схемы дополнительных устройств и подключения к интерфейсным разъемам ЛВС станции вместо работы в токовых цепях.

Библиографический список

1. О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года: указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204. Москва, 2018. 19 с.
2. Цифровая экономика Российской Федерации: государственная программа Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632-р. Москва, 2017. 88 с.
3. Головщиков В. О. Цифровая подстанция — основной элемент цифровой электроэнергетической системы // Современные технологии и научно-технический прогресс: материалы конф. 2019. Т. 1. С. 224–225.
4. Кондратьев Ю. В., Незевак В. Л., Эрбес В. В. Концепция развития цифровой тяговой подстанции // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта. 2018. С. 13–20.
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. С. 31–36.
6. 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.

Введ. 2011–01–01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-rmek-61850-7-3-2009> (дата обращения: 10.01.2021).

7. Типовая инструкция по организации и производству работ в устройствах релейной защиты и электроавтоматики электростанций и подстанций: СО 34.35.302-2006: утв. ОАО Инженерный центр ЕЭС: ввод в действие с 01.04.2006. Москва: СПО ОРГРЭС, 2006. URL: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/249422/ (дата обращения: 12.01.2021).

8. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты и электроавтоматики электрических сетей 0,4–35 кВ: РД 153-34.3-35.613-0. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: СПО ОРГРЭС, 2000. 73 с.

9. Об утверждении Правил технического обслуживания устройств и комплексов релейной защиты и автоматики и внесение изменений в требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики: Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 13.07.2020 № 555. Москва, 2020. 65 с.

10. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, автоматики, дистанционного управления и сигнализации на объектах электросетевого комплекса: СТО 34.01-4.1-005-2017: утв. распоряжением ПАО «Россети» от 19.09.2017 № 500р. URL: https://standartgost.ru/g/%D0%A1%D0%A2%D0%9E_34.01-4.1-005-2017 (дата обращения: 10.02.2021).

11. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС: СТО 56947007-29.240.10.299-2020: утв. приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 26.02.2020 № 68. URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.299-2020.pdf (дата обращения: 10.02.2021).

12. Научно производственное предприятие «Динамика». URL: <http://dynamics.com.ru/> (дата обращения: 10.02.2021).

13. Аношин А. О., Головин А. В. Стандарт МЭК 61850. Информационная модель устройства // Новости электротехники. 2012. № 5 (77). С. 14–18.

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

SPIN-код: 3865-0506

AuthorID (РИНЦ): 894651

ORCID: 0000-0002-9237-4469

AuthorID (SCOPUS): 57200447013

Адрес для переписки: simak_off94@mail.ru

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «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.

SPIN-код: 8609-7871

AuthorID (РИНЦ): 1068596

Адрес для переписки: skorohodov154@gmail.com

Для цитирования

Симаков А. В., Харламов В. В., Скороходов В. И. Проверка электрических и временных характеристик токовой защиты цифровых подстанций // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 46–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-46-51.

Статья поступила в редакцию 12.02.2021 г.

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