

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

С.И. Макашѐва, П.С. Пинчуков

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
г. Хабаровск, Россия*

Статья рассматривает вопросы повышения надежности цифровых подстанций с учетом проводимой в настоящее время политикой на интенсификацию цифровизации экономики, электроэнергетики и промышленности Российской Федерации. Для технологии цифровой подстанции произведен литературный анализ существующих директив и методического обеспечения вопросов расчета и оценки показателей надежности. На примере действующей подстанции Рудная, которая в настоящее время переводится в цифровую модификацию, составлены ее топологическая схема и схема замещения по надежности распределительного устройства 220 кВ. Произведена численная оценка вероятности безотказной работы основного оборудования РУ 220 кВ с учетом основных положений классической теории надежности. Выявлены узлы цифровой подстанции с низкими показателями по надежности, а также наиболее уязвимые элементы схем замещения ее узлов. Отмечен фактор негативного влияния на надежность цифровой подстанции наличия большого количества вторичных цепей при применении цифровых измерительных приборов и устройств сопряжения. Даны рекомендации по поддержанию требуемого уровня надежности электроснабжения.

Ключевые слова: цифровая подстанция, надежность, цифровой трансформатор тока, наработка на отказ, вероятность безотказной работы.

Введение

Цифровые технологии прочно вошли в жизнь современного человека, затронув практически все основные сферы его деятельности, не стало исключением и внедрение цифровизации на объектах электроэнергетики. Так, Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», пункт 11 [1], цифровая трансформация энергетической инфраструктуры указана как приоритетное направление развития страны, что подразумевает внедрение цифровых технологий и платформенных решений на объектах топливно-энергетического комплекса. Во исполнение задач, поставленных Президентом Российской Федерации и национальной программой «Цифровая экономика Российской Федерации», Министерством энергетики Российской Федерации совместно с предприятиями топливно-энергетического комплекса создан ведомственный проект «Цифровая энергетика» [2]. В этом проекте обозначены задачи снижения к 2024 году длительности перерывов электроснабжения, средней частоты технологических нарушений, аварийности на объектах электроэнергетики, что неразрывно связано с показателями надежности электроснабжения как отдельных потребителей или объектов электроэнергетики в частности, так и систем электроснабжения в целом.

Общеизвестно, что одним из ключевых элементов системы электроснабжения является электрическая подстанция (ПС) – электроустановка,

предназначенная для приема, преобразования напряжения в сети переменного тока и распределения электроэнергии в системах электроснабжения различных потребителей. Для таких традиционных подстанций, широко эксплуатируемых в настоящее время в Российской Федерации и мире, основой для обмена информации между блоками и элементами ПС служат результаты аналоговых измерений электрических величин посредством измерительных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН). Вопросы надежности подстанций этого типа достаточно хорошо изучены и в достаточной степени представлены в отечественной и зарубежной учебной и научной литературе [3–8], чего нельзя сказать о вопросах надежности новых, цифровых подстанций.

Цифровой подстанцией (ЦПС) принято называть электроустановку, где все информационные связи между блоками подстанции являются цифровыми, а получение информации ведется при помощи волоконно-оптических приборов – оптических измерительных трансформаторов тока (напряжения). В этом случае цифровыми каналами передачи данных являются вторичные цепи подстанции, что образует единую информационную сеть (сеть передачи данных). Иными словами, наличие информационного обмена между элементами программно-аппаратного комплекса подстанции посредством цифровых устройств и является определяющим признаком ЦПС [2, 10–13]. Развитие технологии ЦПС открывает возможности быстрого и прямого обмена информацией между устройствами подстанции, что в конечном итоге по-

зволяет отказаться от массы медных кабельных связей, повысить точность и быстроту передачи информации, а также добиться более компактного расположения отдельных блоков ЦПС. Широкое применение такой технологии наряду с постепенным сокращением числа ПС старого типа посредством перевода их на цифровые в будущем призвано существенно сократить расходы на проектирование энергетических объектов, ускорить пусконаладочные работы, облегчить эксплуатацию и обслуживание [12–15].

Вместе с тем, несмотря на вышеперечисленные достоинства технологии ЦПС, открытыми и актуальными на сегодняшний день остаются вопросы надежности ЦПС. При кажущемся обилии информации по вопросам цифровизации до настоящего времени в доступных информационных источниках отсутствуют примеры численной оценки показателей надежности, результаты сравнительного анализа конкретных показателей надежности электроснабжения потребителей при питании их от обычных и цифровых объектов электроэнергетики и т. п. Такая ситуация, на наш взгляд, является достаточно серьезным сдерживающим фактором для полноценной и всесторонней инженерной оценки возможностей цифровизации и её распространения в электроэнергетических системах.

Постановка цели и задач исследования

Принимая во внимание практическую значимость количественной оценки показателей надежности электроснабжения потребителей для обоих типов подстанций – цифровой и аналоговой, а также ранее выдвигаемые в [12–15, 17–19] предположения о снижении надежности ЦПС, связанное с увеличением количества элементов вторичных цепей ЦПС, введением в схемы ЦПС оптических измерительных ТТ и ТН и т. д., целью данной работы является повышение надежности ЦПС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи для цифровой подстанции:

- составить схемы замещения по надежности;
- произвести расчет и оценку показателей надежности;
- на основании результатов сравнительного анализа показателей надежности выявить «слабые места» подстанций;
- разработать необходимые меры по поддержанию требуемого уровня надежности электроснабжения потребителей.

Методы и объект исследования

Решение поставленных задач достигается путём комплексных аналитических исследований, которые опираются на базовые, традиционные положения теории надежности. Проводимый анализ надежности электроснабжения потребителей

основан на составлении и последующем расчете схем замещения по надежности путем представления топологии рассматриваемой электрической сети в виде последовательно-параллельных соединений [3–6]. При этом к решаемым задачам вычисления показателей надежности восстанавливаемых объектов систем электроснабжения применим положения теории Маркова и Пуассона о случайных процессах [3–8]. Объектом исследования является ПС 220 кВ, в частности – ее распределительное устройство напряжением 220 кВ.

Теоретическая часть

В соответствии с ГОСТ 27.002–2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения» под термином «надежность» понимается комплексное свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [20]. Надежность является свойством, которое в зависимости от назначения конкретного рассматриваемого объекта и условий его пребывания может включать готовность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств. В классической теории надёжности [3–8] для оценки надежности применяются количественные показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также комплексные показатели, характеризующие готовность и эффективность использования технических объектов (в частности, электроустановок).

Вероятность безотказной работы R – наиболее распространенный в мировой практике критерий для оценки надежности объекта [17, 21]. Этот критерий характеризует вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Принимая во внимание допущение о том, что распределение по времени количества отказов технических средств, входящих в электроэнергетические системы, происходит по экспоненциальному закону [3–6], вероятность безотказной работы объекта R определяется по выражению

$$R = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов, $1/\text{ч}$; t – заданный интервал времени, ч.

Вероятность отказа Q есть вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз на заданном интервале времени t . Вероятность отказа Q определяют по выражению

$$Q = 1 - R. \quad (2)$$

Наработка до отказа T есть наработка объекта, отсчитываемая от первого его использования (или от его восстановления) до отказа. Величина T , ч, определяется по выражению

$$T = \frac{1}{\lambda}. \quad (3)$$

Вероятность безотказной работы объекта $R(t)$ на заданном интервале времени t , соответствующая характеристикам завода-изготовителя, определяется по выражению

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \tag{4}$$

Вероятность безотказной работы блока $R_{\text{блока_пар}}$, состоящего из двух параллельно соединенных элементов 1 и 2, будет равна

$$R_{\text{блока_пар}} = 1 - Q_1 \cdot Q_2 = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t}) \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t}). \tag{5}$$

Вероятность безотказной работы блока

$R_{\text{блока_послед}}$, состоящего из двух последовательно соединенных элементов 1 и 2, будет равна

$$R_{\text{блока_послед}} = R_1 \cdot R_2 = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t}. \tag{6}$$

В классическом изложении теории надежности [3–6] для того чтобы рассчитать вероятность безотказной работы R объекта для интервала времени от момента включения до любого заданного момента времени t , необходимо:

- 1) составить схему замещения по надежности на основании исходной информации о топологии рассматриваемого объекта;
- 2) определить среднее время безотказной ра-

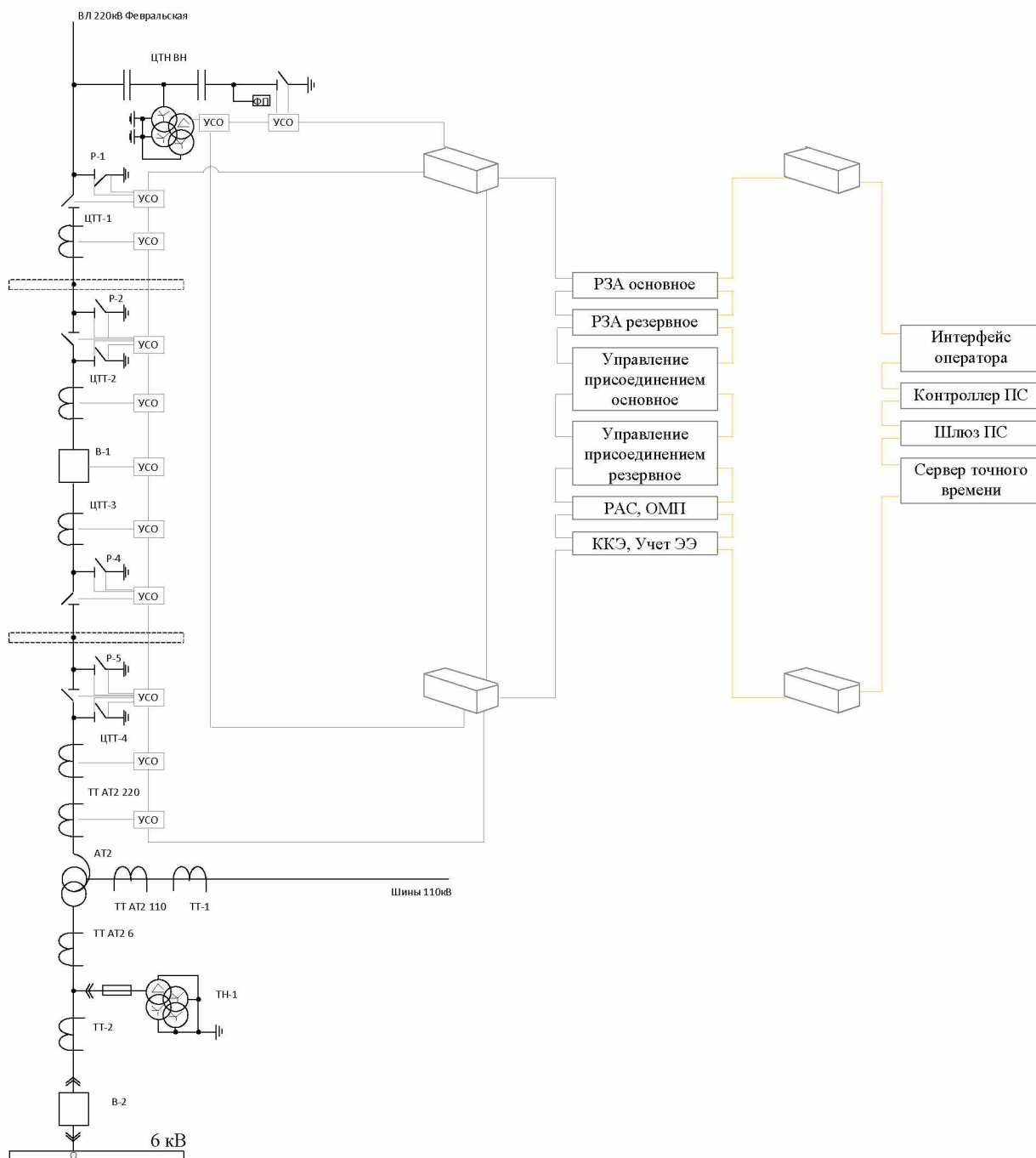


Рис. 1. Типовая схема главных электрических соединений ПС 200/110/6 кВ

боты T или постоянную интенсивность отказов λ по справочным (или опытным) данным для каждого элемента схемы замещения по надежности;

3) расчетным путем с использованием основных выражений (1)–(6) и поэтапного преобразования схемы замещения по надежности определить итоговую вероятность безотказной работы R объекта.

Топология схемы главных электрических соединений цифровой подстанции

На рис. 1 представлена типовая схема главных электрических соединений ПС 200/110/6 кВ, где все устройства ПС связаны между собой информационной сетью. Посредством этой информационной сети все сигналы, включая мгновенные значения токов и напряжений в контрольных точках, оцифровываются и передаются в виде цифрового потока по протоколу Sampled Values, регламентированного МЭК 61850-9-2 [22] при помощи устройств сопряжения с шиной процесса (УСП).

Для обмена сигналами между устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА), устройствами управления присоединения, регистраторами аварийных событий (РАС), устройствами определения места повреждения (ОМП), устройствами контроля качества электрической энергии (ККЭ) и устройствами учета электроэнергии (ЭЭ) в цифровом виде используется протокол GOOSE, также регламентированный стандартом МЭК 61850-8-1 [22].

Процессы, происходящие на ЦПС, контролируются удаленно: управление коммутационными аппаратами (КА) происходит либо с автоматизированного рабочего места (АРМ) оперативного персонала, либо с пункта диспетчерского управления, в чьем ведении находится тот или иной КА.

Таким образом, единая телекоммуникационная инфраструктура ЦПС, выполненная на базе современных технологий посредством цифрового обмена между интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ), позволяет осуществлять мониторинг всех процессов в непосредственной близости от источников информации, передавать значительные объемы данных во все подсистемы при помощи волоконно-оптических линий связи и сделать большинство функций, выполняемых на подстанции, виртуальными. При такой инфраструктуре ЦПС все измерительные устройства становятся источниками информации, а все встроенные интеллектуальные электронные устройства – её потребителями.

При составлении схемы замещения по надежности ЦПС по сравнению с расчетом традиционных ПС необходимо учесть значительно большее количество условий. К примеру, надежность выключателя ЦПС будет зависеть не только от заводских его характеристик, но и от характеристик УСП, параметров линии волоконно-оптической связи (ВОЛС), по которой происходит обмен дан-

ными, а также от надежности коммутаторов и терминалов РЗА. Помимо этого, необходимо будет учесть правильную работу интерфейса оператора.

Пример расчёта вероятности безотказной работы блока разъединителя 220 кВ цифровой подстанции

Произведем расчет вероятности безотказной работы разъединителя 220 кВ ЦПС, который обозначен на рис. 1 как Р-1 220 кВ.

Схема замещения по надежности распределительного устройства 220 кВ ЦПС представлена на рис. 2а. На ней приняты следующие обозначения: ЦТН, ЦТТ – цифровой трансформатор напряжения и тока соответственно; Р-1, Р-2, Р-3 – разъединители высоковольтные 220 кВ; В-1 – высоковольтный выключатель ЦПС. На рис. 2б представлена схема замещения по надежности блока разъединителя 220 кВ.

Надежность разъединителя зависит не только от заводских характеристик, но и от совокупности различных управляющих воздействий на него. Так, к примеру, возникновение отказа разъединителя может наступить вследствие отказа УСП, поэтому в схеме рис. 1 предусмотрено резервирование нагруженным дублированием схемы управления разъединителем, что повышает надежность всей схемы.

Зададимся расчетным периодом времени $t = 2190$ ч. Такая длительность обусловлена периодичностью технического обслуживания ИТ-оборудования на рассматриваемой подстанции Рудная. Согласно проектной документации техническое обслуживание для цифровых устройств на ЦПС Рудная должно производиться один раз в квартал, т. е. один раз в три месяца, что соответствует длительности времени 2190 ч. Далее, используя данные заводов-изготовителей электротехнической продукции, произведем расчет по формулам (1)–(4). Вероятность безотказной работы разъединителя Р-1 220 кВ, R_{P-1} , по формуле (4) составит

$$R_{P-1} = e^{-0,76 \cdot 10^{-5} \cdot 2190} = 0,983.$$

Аналогичным образом произведем расчет для других блоков рис. 2 и представим показатели надежности элементов ЦПС в виде табл. 1.

Из результатов расчета, приведенных в табл. 1 и на схеме рис. 2б, следует, что вероятность безотказной работы, равную 0,983, имеют 2 элемента схемы замещения по надежности: разъединитель Р-1 и УСП. Остальные 8 элементов в последовательно соединенной схеме замещения имеют вероятность безотказной работы, равную 0,999. Таким образом, сворачивая схему последовательного соединения, получаем вероятность безотказной работы для блока разъединителя Р-1 ЦПС, равную

$$R_{P-1} = 0,983 \cdot 0,983 \cdot 0,999^8 = 0,959.$$

Поскольку схема взаимодействия между разъединителем и вторичными цепями одинакова для

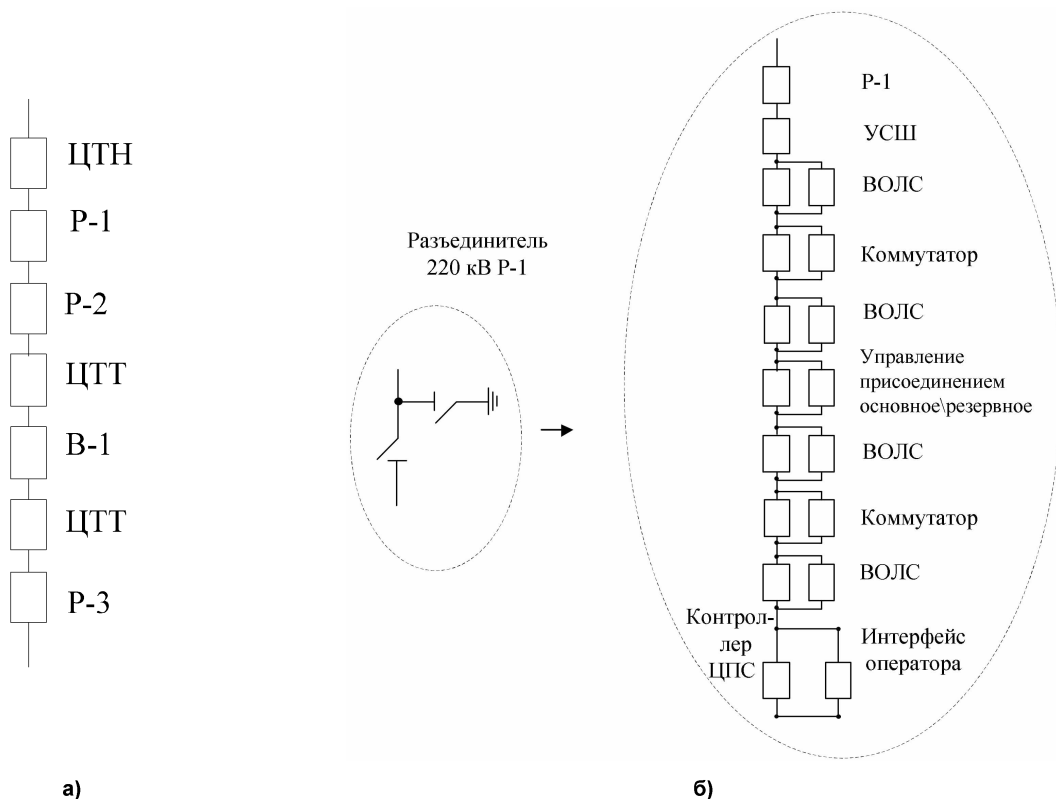


Рис. 2. Схемы замещения по надежности ЦПС: а – распределительное устройство 220 кВ; б – блок разъединителя 220 кВ

Таблица 1

Расчет показателей надежности разъединителя блока Р-1 220 кВ

Обозначение блока на рис. 2б	Наименование оборудования, производитель	Время наработки на отказ T , ч	Интенсивность отказов λ , 1/ч	Вероятность безотказной работы R
Р-1	Разъединитель (SDF245pII*–100УХЛ + 2E/3MD50, ABB)	131 400	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$R_{P-1} = e^{-0,76 \cdot 10^{-5} \cdot 2190} = 0,983$
УСШ	Терминал (БЭ2704v700, ЭКРА)	125 000	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$R_{УСШ} = e^{-0,8 \cdot 10^{-5} \cdot 2190} = 0,983$
Коммутатор	Коммутатор (RedBox RED25, Hirschmann)	345 000	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$R_{\text{блоккоммут1}} = 1 - (1 - e^{-2,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2190}) \times (1 - e^{-2,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2190}) = 0,999$
ВОЛС	$L_1 = 15$ м	—	$3,88 \cdot 10^{-7}$	$\lambda_{\text{ВОЛС1}} = 0,15 \cdot 3,88 \cdot 10^{-7} = 0,582 \cdot 10^{-7}$
	$L_2 = 20$ м			$\lambda_{\text{ВОЛС2}} = 0,2 \cdot 3,88 \cdot 10^{-7} = 0,776 \cdot 10^{-7}$
	Блок ВОЛС целиком			$R_{\text{блокВОЛС1}} = 1 - (1 - e^{-0,582 \cdot 10^{-7} \cdot 2190}) \times (1 - e^{-0,776 \cdot 10^{-7} \cdot 2190}) = 0,999$
Блок управления	АРМ (итерфейс) оператора	100 000	10^{-5}	$R_{\text{блокупр пр}} = 1 - (1 - e^{-10^{-5} \cdot 2190}) \times (1 - e^{-10^{-5} \cdot 2190}) = 0,999$
	Контроллер ПС (SPRECON-E-C, Sprecher Auto-mation GmbH)	100 000	10^{-5}	

разъединителей, обозначенных на рис. 1 и 2а как Р-2 и Р-3, то и полная вероятность безотказной работы для этих разъединителей Р-2, Р-3 будет равна величине, рассчитанной для Р-1, т. е. составит величину 0,959.

Пример расчёта вероятности безотказной работы блока выключателя 220 кВ цифровой подстанции

Произведем расчет вероятности безотказной работы выключателя 220 кВ ЦПС, который обозначен на рис. 1 и 2а как В-1 220 кВ. На схеме замещения по надежности (рис. 3) изображены элементы вторичной схемы, оказывающие влияние на полную вероятность безотказной работы силового выключателя.

Как можно заметить, схемы замещения по надежности для разъединителя и для выключателя 220 кВ (см. рис. 2б, и рис. 3) схожи: здесь расположены также 10 последовательно соединенных блоков, 8 из которых состоят из двух параллельно соединенных элементов. При расчете вероятности безотказной работы блока выключателя марки ЗАР1 ДТ-245, производства АВВ, согласно данным завода-изготовителя время наработки на отказ составляет $T_{В-1} = 131\,400$ ч, а интенсивность отказов $\lambda_{В-1} = 0,76 \cdot 10^{-5}$ 1/ч [23].

Вероятность безотказной работы выключателя на интервале времени 2190 ч составит

$$R_{В-1} = e^{-0,76 \cdot 10^{-5} \cdot 2190} = 0,983.$$

В состав блока автоматики управления выключателем В-1, обозначенного на рис. 3 как АУВ, входят терминал РЗ ДЗЛ+КСЗ (марка ШЭ2607 09, завод-изготовитель ЭКРА) и терминал РЗА КСЗ+АУВ (марки ШЭ2607 016 этого же производителя). Для каждого из этих терминалов время наработки на отказ составляет $T_{\text{терминал}} = 125\,000$ ч, а интенсивность отказов $\lambda_{\text{терминал}} = 0,8 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Вероятность безотказной работы блока РЗА на интервале времени 2190 ч составит

$$R_{\text{блок РЗА}} = 1 - (1 - e^{-0,8 \cdot 10^{-5} \cdot 2190}) \times$$

$$\times (1 - e^{-0,8 \cdot 10^{-5} \cdot 2190}) = 0,999.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы для блока выключателя В-1 ЦПС, составит по аналогии с разъединителем Р-1 ЦПС:

$$R_{В-1} = 0,983 \cdot 0,983 \cdot 0,999^8 = 0,959.$$

Пример расчёта вероятности безотказной работы блока цифровых трансформаторов тока и напряжения цифровой подстанции

Примем в расчет характеристики цифровых трансформаторов производства компании Профотек: ЦТТ марки ТТЭО-220, ЦТН марки ДНЕЭ-220. Для обоих трансформаторов показатели по надежности имеют одинаковые значения: время наработки на отказ составляет $T_{\text{ЦТТ}} = T_{\text{ЦТН}} = 120\,000$ ч, а интенсивность отказов $\lambda_{\text{ЦТТ}} = \lambda_{\text{ЦТН}} = 0,83 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

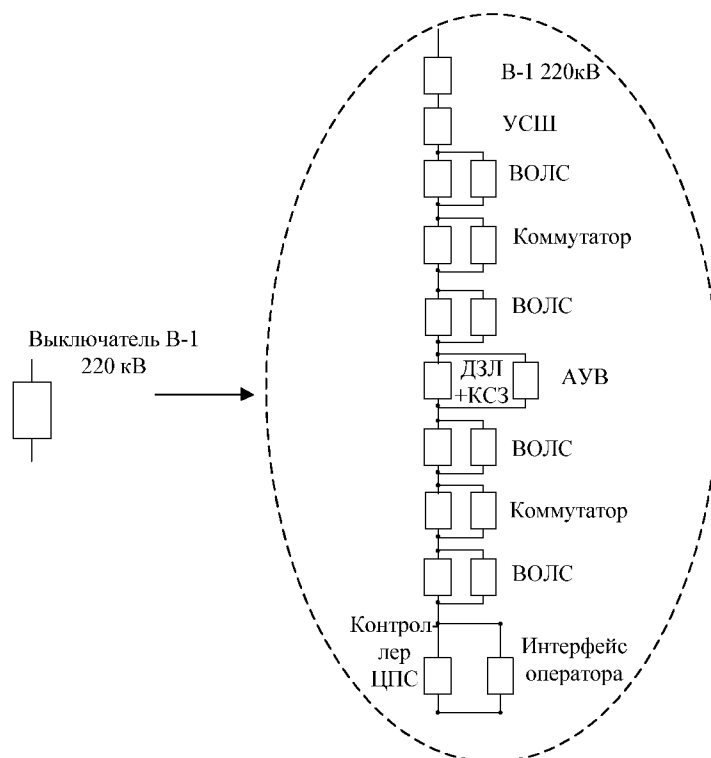


Рис. 3. Схема замещения по надежности ЦПС блока выключателя 220 кВ

Таблица 2

Результаты расчета вероятности безотказной работы РУ 220 кВ ЦПС

Вероятность безотказной работы элемента R_i	Оборудование			
	Разъединитель Р 220 кВ	Выключатель В 220 кВ	ЦТН 220 кВ	ЦТТ 220 кВ
$R_{\text{объекта}}$	0,983	0,983	0,981	0,981
$R_{\text{УСП}}$	0,983	0,983	–	–
$R_{\text{БОЛС}}$	0,999	0,999	–	–
$R_{\text{блок РЗА}}$	0,999	0,999	–	–
$R_{\text{блок коммут}}$	0,999	0,999	–	–
$R_{\text{блок УНР}}$	0,999	0,999	–	–
Результирующее значение	0,959	0,959	0,981	0,981

Вероятность безотказной работы ЦТТ и ЦТН на рассматриваемом интервале времени 2190 ч будет равна

$$R_{\text{ЦТН-220}} = R_{\text{ЦТТ-220}} = e^{-0,83 \cdot 10^{-5} \cdot 2190} = 0,981.$$

После расчета отдельных элементов схемы замещения по надежности ЦПС, представленной на рис. 2а, можно переходить к расчету результирующего значения для распределительного устройства 220 кВ.

Расчет вероятности безотказной работы распределительного устройства 220 кВ цифровой подстанции

Сведем рассчитанные значения по отдельным блокам ЦПС в табл. 2.

На схеме замещения по надежности, приведенной на рис. 2а, семь элементов следуют друг за другом и образуют многоэлементную цепочку, где каждый элемент вносит свою долю отказов в снижение общей надежности системы. Для такой схемы отказ одного элемента приводит к отказу всей системы в целом. Определим вероятность безотказной работы РУ 220 кВ ЦПС для последовательно соединенных элементов по аналогии с формулой (6):

$$R_{\text{РУ 220кВ}} = R_{\text{ЦТН}} \cdot R_{\text{Р-1}} \cdot R_{\text{Р-2}} \cdot R_{\text{ЦТТ}} \cdot R_{\text{В-1}} \times \\ \times R_{\text{ЦТТ}} \cdot R_{\text{Р-3}} = 0,959^4 \cdot 0,981^3 = 0,798512.$$

Результирующая величина вероятности безотказной работы R объекта в соответствии с [24] должна стремиться к значению, равному 0,996. В этом случае надежность объекта считается достаточно высокой. Как показали результаты произведенного расчета, значение вероятности безотказной работы распределительного устройства 220 кВ ЦПС, равное 0,798512, значительно меньше рекомендуемых по [24] значений и ниже, чем аналогичный показатель для традиционных, не цифровых подстанций [3–8, 25–28].

Полученное расчетным путем низкое значение вероятности безотказной работы РУ 220 кВ цифровой подстанции объясняется следующими факторами:

– большое количество элементов вторичных цепей ЦПС;

– наличие элементов схемы со сравнительно низкими характеристиками по надежности: цифровые измерительные трансформаторы, устройства сопряжения с шиной процесса;

– наличие в схеме замещения по надежности рассматриваемого объекта нерезервируемых элементов (устройство сопряжения с шиной процесса, силовое оборудование, цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения).

Повышения показателей надёжности ЦПС можно добиться при помощи устранения слабых мест в схеме цифровой подстанции, путем резервирования элементов, подверженных риску отказа. Также к повышению надежности в будущем может привести усиление производителями продукции аппаратной части электроустановок, так как активные темпы развития цифровизации электроэнергетических объектов и накапливаемый опыт эксплуатации цифровой аппаратуры на объектах электроэнергетического комплекса будут диктовать производителям более высокие требования по надежности поставляемого оборудования. Вместе с тем проводящаяся в настоящее время в отрасли политика перехода на обслуживание по фактическому техническому состоянию оборудования также способствует некоторому снижению вероятности отказа, так как будет способствовать увеличению межремонтного интервала и исключению ненужных манипуляций с оборудованием [12, 15, 29, 30].

Заключение

На основании действующего распределительного устройства РУ 220 кВ модернизируемой ПС 220 кВ Рудная составлена топологическая схема в цифровой ее модификации в соответствии с концепцией цифровой подстанции. При рассмотрении разработанной топологической схемы выявлено негативное влияние на показатели надежности подстанции наличия большого количества вторичных цепей. На основании данных заводов-изготовителей электротехнической продукции для ЦПС составлена схема замещения по надежности в виде последовательно-параллельных соединений элементов.

Выполнен расчет вероятности безотказной работы распределительного устройства РУ 220 кВ, значение которой составило $R_{РУ\ 220кВ} = 0,798512$, что ниже уровня, рекомендуемого Федеральной сетевой компанией Российской Федерации, равно-го $R_{ФСК_ЕЭС} = 0,996$.

Стоит отметить, что в схеме замещения по надежности цифровой подстанции выполняется резервирование коммуникационных элементов, например, оптическое кольцо передачи данных для протоколов SV и GOOSE, но наряду с этим ряд элементов, находящихся в зоне риска, резервом не обладает – к примеру, устройство сопряжения с шиной процесса, что, несомненно, является уязвимым местом такой модификации ЦПС.

В целях повышения надежности цифровых подстанций предлагается применение резервирования для одиночных элементов, подверженных риску отказа, усиление требований к показателям надежности оборудования (среднее время наработки на отказ, интенсивность отказов), которое закладывается заводами-изготовителями электро-технической и радиоэлектронной продукции. Относительно низкие показатели надежности ЦПС, выявленные в результате проведенных исследований, могут стать негативным фактором, который сдерживает развитие технологии ЦПС, поэтому необходимо принимать их во внимание еще на стадии проектирования системы. Повышение надежности ЦПС и устранение этого барьера позволит более полно ощутить преимущества от перехода на цифровые технологии в электроэнергетике: повысить уровень автоматизации, сократить расходы на проектирование, пуско-наладочные работы, эксплуатацию и обслуживание энергетических объектов.

Литература

1. Министерство энергетики Российской Федерации. Официальный сайт. – <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/11246/84473> (дата обращения: 17.07.2019).
2. Министерство энергетики Российской Федерации. Официальный сайт. Ведомственный проект «Цифровая энергетика» – <https://minenergo.gov.ru/node/14559> (дата обращения: 17.07.2019).
3. Гук, Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю.Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
4. Шалин, А.И. Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем / А.И. Шалин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.
5. Китушин, В.Г. Надёжность энергетических систем / В.Г. Китушин. – М.: Высш. шк., 1984. – 256 с.
6. Allan, R.N. Reliability Evaluation of Power Systems / R.N. Allan, R. Billinton. – New York and London: Plenum Press, 1996. – 514 p.
7. Iqbal, F. Power Systems Reliability- A Bibliographical Survey / F. Iqbal, A.S. Siddiqui, T. Deb et al. // Smart Science. – 2018. – Vol. 6, iss. 1. – P. 80–93. DOI: 10.1080/23080477.2017.1407985
8. Efron, B. Computer Age Statistical Inference: Algorithms, Evidence, and Data Science / B. Efron, T. Hastie. – Cambridge: Cambridge University Press, 2016. – 495 p. DOI: 10.1017/cbo9781316576533
9. Чичёв, С.И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий / С.И. Чичёв, В.Ф. Калинин, Е.И. Глинкин. – М.: Издат. дом «Спектр», 2014. – 228 с.
10. Горелик, Т.Г. Цифровая подстанция. Подходы к реализации / Т.Г. Горелик, О.В. Кириенко // Энергетик. – 2013. – № 2. – С. 15–17.
11. Tutorial on Networking for Digital Substations / R. Hunt, M. Zapella, C. Pimentel, G. Silvano // 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). – USA. TX. College Station, 2019. – P. 1–15. DOI: 10.1109/CPRE.2019.8765874
12. Цифровые подстанции. Опыт реализации / В.Н. Курьянов, Л.Р. Куц, Н.Р. Горбунова и др. // Наука, образование и культура. – 2018. – № 3 (27). – С. 9–12.
13. Горожанкин, П.А. Цифровая подстанция: назад в будущее / П.А. Горожанкин // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 3 (28). – С. 60–62.
14. Горелик, Т.Г. Подходы к повышению структурной надежности систем релейной защиты / Т.Г. Горелик, П.В. Кабанов, О.В. Кириенко // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2014. – № 1 (70). – С. 56–63.
15. Гвоздев, Д.Б. Применение технологии «Цифровая подстанция» на существующих объектах компания «Россети Московский регион» / Д.Б. Гвоздев, М.А. Грибков, А.А. Сахаров // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № 3 (54). – С. 54–59.
16. Ледин, С. Будущее цифровых подстанций в России / С. Ледин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2015. – № 3 (68). – С. 64–65.
17. Methodology for Reliability Indices Determination in Electric Power Substation / J.D. Barbosa, R. Santos, J.F. Romero et al. // IEEE Latin America Transactions. – 2018. – No. 16. – P. 1959–1968. DOI: 10.1109/TLA.2018.8447363.
18. Liu, N. Reliability Evaluation of a Substation Automation System Communication Network Based on IEC 61850 / N. Liu, M. Panteli, P.A. Crossley // 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014). – 2014. – P. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2014.0057
19. Zhang, Y. An Integrative Approach to Reliability Analysis of an IEC 61850 Digital Substation / Y. Zhang, A. Sprintson, C. Singh // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA. – 2012. – P. 1–8. DOI: 10.1109/PESGM.2012.6345699
20. ГОСТ Р 27.002–2015. Надёжность в тех-

нике. Термины и определения (СЧТ). – Введ. 2017–03–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

21. Ali, A. *Failure Analysis and Prevention* / A. Ali. – Books on Demand, 2017. – 216 p.

22. *Webstore International Electrotechnical Commission IEC 61850:2019 SER. Series: Communication Networks and Systems for Power Utility Automation – ALL PARTS.* – <https://webstore.iec.ch/publication/6028> (дата обращения: 20.07.2019).

23. ABB Asia Brown Boveri Ltd CH. – <https://new.abb.com/> (дата обращения: 20.07.2019).

24. Методика оценки схемно-технической надежности технологических электрических сетей ОАО «РЖД» и электрических сетей внешнего электроснабжения для синхронизации инвестиционных программ ОАО «РЖД», ОАО «ФСК ЕЭС» и «Холдинг МРСК» // Отчет ЗАО ПФК «Скат». – М., 2012. – 108 с.

25. Sangno, R. *Reliability Evaluation of a 132/33 kV HV Substation* / R. Sangno, P.D. Singh, R. Pudu // *International Journal on Current Science & Technology.* – 2016. – Vol. 04. – https://www.researchgate.net/publication/324013357_Reliability_Evaluation_of_a_13233_kV_HV_Substation (дата обращения: 17.07.2019).

26. Pinchukov, P. *Improving Methods for Relia-*

bility Assessment of Electric Power Systems / P. Pinchukov, S. Makasheva // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2018. – Vol. 692. – P. 162–169. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_17

27. *Application of Multi-Agent System for Calculation of Reliability Indexes of Pacts for Digital Substation* / A.A. Voloshin, E.A. Voloshin, N.P. Gracheva, D.O. Blagorazumov // *International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA).* – 2018. – P. 1–11. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/8537224/authors> (дата обращения: 17.07.2019). DOI: 10.1109/rpa.2018.8537224

28. *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices – Redline, in IEEE Std. 1366-2012 (Revision of IEEE Std 1366-2003).* – 2012, pp. 1–92. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6329910&isnumber=6329909> (дата обращения: 20.07.2019).

29. Овсейчук, В.А. Нормирование надежности и качества электроснабжения потребителей / В.А. Овсейчук, В.А. Непомнящий // *Иноватика и экспертиза: науч. тр.* – 2016. – № 1 (16). – С. 175–185.

30. Makasheva, S. *Expanding the Functionality of Automated Monitoring Systems for Traction Substations* / S. Makasheva, P. Pinchukov // *MATEC Web of Conferences.* – 2018. – P. 01014.

Макашѐва Светлана Игоревна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; smakasheva@gmail.com.

Пинчук Павел Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Системы электроснабжения», директор Электроэнергетического института, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; pinchukov-pavel@mail.ru.

Поступила в редакцию 12 августа 2019 г.

DOI: 10.14529/power190405

DIGITAL SUBSTATION RELIABILITY EVALUATION

S.I. Makasheva, smakasheva@gmail.com,

P.S. Pinchukov, pinchukov-pavel@mail.ru

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation

The paper considers the means of boosting the reliability of digital substations, taking into account the intensifying digitalization of the Russian Federation economy, power supply and industry. The paper analyses the existing directives and methodology in sphere of calculating and evaluating the reliability indicators for digital substational technology. The topological scheme and the reliability equivalent circuit of substation switchgear 220 kV are compiled as an example for the Rudnaya Substation, located in the Far East of Russia and currently being converted to its digital version. A numerical estimation of the survival function for the main equipment of the 220 kV switchgear is given based the classical theory of reliability. The digital substation blocks with low reliability indicators are identified. The large number of secondary circuits which using for digital measuring and connecting interface devices are revealed as a negative factor for the reliability indexes. The means for required reliability level maintaining for the digital substation are considered.

Keywords: digital substation, reliability, digital current transformer, mean time between failures, survival function.

References

1. *Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii. Ofitsial'nyy sayt* [Ministry of Energy of Russian Federation. Webstore]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/11246/84473> (accessed 17.07.2019).
2. *Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii. Ofitsial'nyy sayt. Vedomstvennyy proekt "Tsifrovaya energetika"*. [Ministry of Energy of Russian Federation. Webstore]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/14559> (accessed 17.07.2019).
3. Guk Yu.B. *Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike* [Reliability Theory in the Electric Power Industry]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 208 p.
4. Shalin A.I. *Nadezhnost' i diagnostika releynoy zashchity energosistem* [Reliability and Diagnostics of Relay Protection of Power Systems]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2002. 384 p.
5. Kitushin V.G. *Nadezhnost' energeticheskikh sistem* [Reliability of Energy Systems]. Moscow, Vyssh. Shk. Publ., 1984. 256 p.
6. Allan R.N., Billinton R. *Reliability Evaluation of Power Systems*. New York and London, Plenum Press Publ., 1996. 514 p.
7. Iqbal, Siddiqui A.S., Deb T., Khan M.T., Rana A.S. Power Systems F. Reliability- A Bibliographical Survey. *Smart Science*, 2018, vol. 6, iss. 1, pp. 80–93. DOI: 10.1080/23080477.2017.1407985
8. Efron B., Hastie T. *Computer Age Statistical Inference: Algorithms, Evidence, and Data Science*. Cambridge, Cambridge University Press, 2016. 495 p. DOI: 10.1017/cbo9781316576533
9. Chichev S.I. *Metodologiya proektirovaniya tsifrovoy podstantsii v formate novykh tekhnologiy* [Digital Substation Design Methodology in the Format of New Technologies]. Moscow, Spektr Publ., 2014. 228 p.
10. Gorelik T.G., Kirienko O.V. *Tsifrovaya podstantsiya. Podkhody k realizatsii* [Digital Substation. Implementation Approaches]. *Power Engineer Journal*, 2013, no. 2, pp. 15–17. (in Russ.)
11. Hunt R., Zapella M., Pimentel C., Silvano G. [Tutorial on Networking for Digital Substations]. *72nd Conference for Protective Relay Engineers [CPRE]*, 2019. pp. 1–15. DOI: 10.1109/CPRE.2019.8765874
12. Kur'yanov V.N., Kushch L.R., Gorbunova N.R., Bondarev I.V., Tsypik V.V. *Tsifrovye podstantsii. Opyt realizatsii* [Digital Substations. Implementation Experience]. *Science, Education and Culture Journal*, 2018, no. 3 (27), pp. 9–12. (in Russ.)
13. Gorozhankin P.A. *Tsifrovaya podstantsiya: nazad v budushchee* [Digital Substation: Back to the Future]. *Relay Protection and Automation*, 2017, no. 3 (28), pp. 60–62. (in Russ.)
14. Gorelik T.G., Kabanov P.V., Kirienko O.V. *Podkhody k povysheniyu strukturnoy nadezhnosti sistem releynoy zashchity* [Approaches to Improving the Structural Reliability of Relay Protection Systems]. *Izvestiya NTTs Edinoy energeticheskoy sistemy*, 2014, no. 1 (70), pp. 56–63. (in Russ.)
15. Gvozdev D.B., Gribov M.A., Sakharov A.A. [Application of the “Digital Substation Technology” on the Existing objects of “Rosseti Moscow Region” Company]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye* [Electricity Transmission and Distribution], 2019, no. 3 (54), pp. 54–59. (in Russ.)
16. Ledin S. [The Future of Digital Substations in Russia]. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*. [Automation and IT in the Energy Sector], 2015, no. 3 (68), pp. 64–65. (in Russ.)
17. 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
18. 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
19. Zhang Y., Sprintson A., Singh C. An Integrative Approach to Reliability Analysis of an IEC 61850 Digital Substation. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–8. DOI: 10.1109/PESGM.2012.6345699
20. GOST R 27.002–2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya (SSNT)*. [Reliability in Technology. Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 24 p.
21. Ali A. *Failure Analysis and Prevention*. Books on Demand Publ., 2017. 216 p.
22. [Webstore International Electrotechnical Commission IEC 61850:2019 SER. Series: Communication Networks and Systems for Power Utility Automation – ALL PARTS]. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6028> (accessed 20.07.2019).
23. *ABB Asia Brown Boveri Ltd CH*. Available at: <https://new.abb.com/> (accessed 20.07.2019).
24. *Metodika otsenki skhemno-tekhnicheskoy nadezhnosti tekhnologicheskikh elektricheskikh setey OAO "RZhD" i elektricheskikh setey vneshnego elektrosnabzheniya dlya sinkhronizatsii investitsionnykh programm OAO "RZhD", OAO "FSK EES" i "Kholding MRSK". Otchet ZAO PFK "Skat"*. Moscow, 2012. 108 p.
25. Sangno R. Singh P.D., Pudu R. Reliability Evaluation of a 132/33 kV HV Substation. *International Journal*

on *Current Science & Technology*, 2016, vol. 04. Available at: https://www.researchgate.net/publication/324013357_Reliability_Evaluation_of_a_13233_kV_HV_Substation (accessed 20.07.2019).

26. Pinchukov P., Makasheva S. Improving Methods for Reliability Assessment of Electric Power Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 692, pp. 162–169. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_17

27. Voloshin A.A., Voloshin E.A., Gracheva N.P., Blagorazumov D.O. Application of Multi-Agent System for Calculation of Reliability Indexes of Pacts for Digital Substation. *International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA)*, 2018, pp. 1–11. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8537224/authors> (accessed 20.07.2019). DOI: 10.1109/rpa.2018.8537224

28. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices – Redline, in IEEE Std. 1366-2012 (Revision of IEEE Std. 1366-2003), 2012. pp. 1–92. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6329910&isnumber=6329909> (accessed 20.07.2019).

29. Ovseychuk V.A., Nepomnyashchiy V.A. [Rationing the Reliability and Quality of Power Supply to Consumers]. *Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy* [Innovation and Expertise: Scientific Papers], 2016, no. 1 (16), pp. 175–185. (in Russ.)

30. Makasheva S., Pinchukov P. Expanding the Functionality of Automated Monitoring Systems for Traction Substations. *MATEC Web of Conferences*, 2018, p. 01014. DOI: 10.1051/mateconf/201823901014

Received 12 August 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Макашѐва, С.И. Расчет показателей надежности цифровой подстанции / С.И. Макашѐва, П.С. Пинчуков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 41–51. DOI: 10.14529/power190405

FOR CITATION

Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Digital Substation Reliability Evaluation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 41–51. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190405
