

¹ООО «Газпромнефть-Энергосервис»,
г. Омск

²Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

³Российский государственный
университет нефти и газа
(национальный исследовательский
университет) имени И. М. Губкина,
г. Москва

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Рассмотрены вопросы внедрения цифровых подстанций на объектах электроэнергетики Российской Федерации. Осуществлен анализ существующих критериев оценки работоспособности и качества функционирования современных устройств релейной защиты и выполнена оценка их достаточности. Разработана математическая модель функционирования электротехнических комплексов релейной защиты в соответствии с положениями теории массового обслуживания, теории графов и математического аппарата цепей Маркова. Расчетное значение вероятности безотказной работы комплексов релейной защиты соответствует среднему значению этого показателя по данным многолетнего анализа и свидетельствует об адекватности математической модели. Предложенная математическая модель позволяет учесть влияние объемов и качества технического обслуживания на эффективность работы комплексов релейной защиты цифровых подстанций.

Ключевые слова: цифровая подстанция, МЭК-61850, релейная защита, техническое обслуживание по состоянию, цепи Маркова, теория графов.

Внедрение цифровых инструментов в промышленные системы электроснабжения является одной из приоритетных задач развития энергетики Российской Федерации [1, 2]. Особая роль при этом уделяется электротехническим комплексам релейной защиты и автоматики (РЗА), предназначенным для ликвидации повреждений и аварийных режимов, возникающих в электрооборудовании. Осуществляется переход от электромеханических комплексов РЗА к микропроцессорным (МП РЗА) [3]. Технология объединения комплексов МП РЗА в единую систему, осуществляющую обмен информацией в соответствии с требованиями стандарта МЭК-61850, получила название «Цифровая подстанция» (ЦПС) [4].

Важным фактором обеспечения эффективности и качества функционирования комплексов МП РЗА является система технического обслуживания (ТО) [5]. Переход к новым принципам реализации устройств РЗА требует пересмотра подходов к ТО

этих устройств. В связи с этим совершенствование системы ТО и определение показателей её эффективности являются актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка математической модели функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющей дополнительно учесть влияние объемов и качества технического обслуживания на эффективность работы защит.

Основным критерием качества функционирования устройств РЗА является количество правильных срабатываний (рис. 1). Неправильные срабатывания защит принято классифицировать на ложное (ЛС), излишнее (ИС), отказ (ОС) [6]. Отдельно выделяют неправильно допущенные срабатывания. По причинам, связанным с недостаточным качеством ТО, происходит порядка 18 % случаев неправильной работы защит [7]. Рассмотрим особенности внедрения ЦПС на примере систем электроснабжения промышленных предприятий.

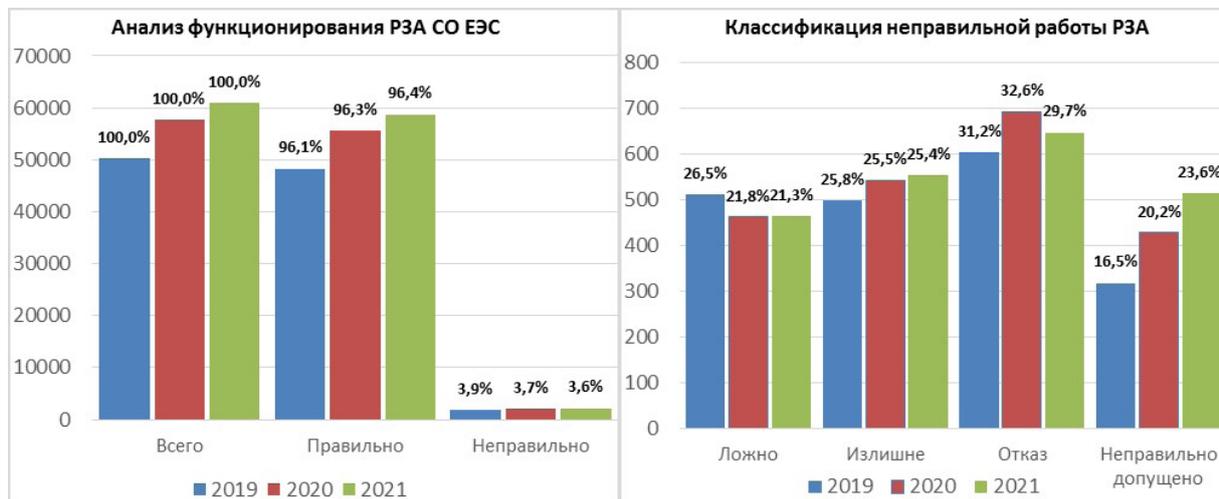


Рис. 1. Анализ функционирования устройств РЗА по данным СО ЕЭС

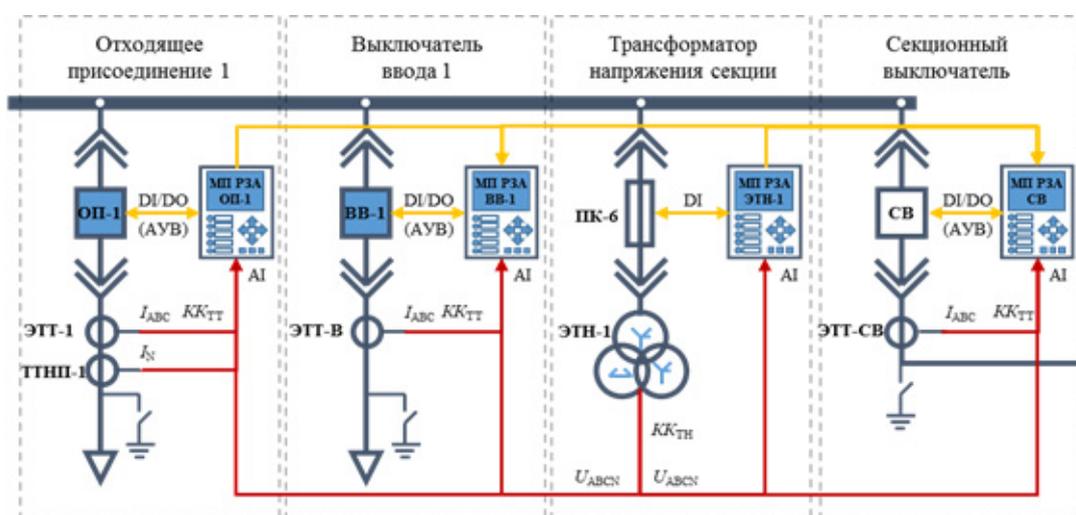


Рис. 2. Классическая МП РЗА промышленного предприятия

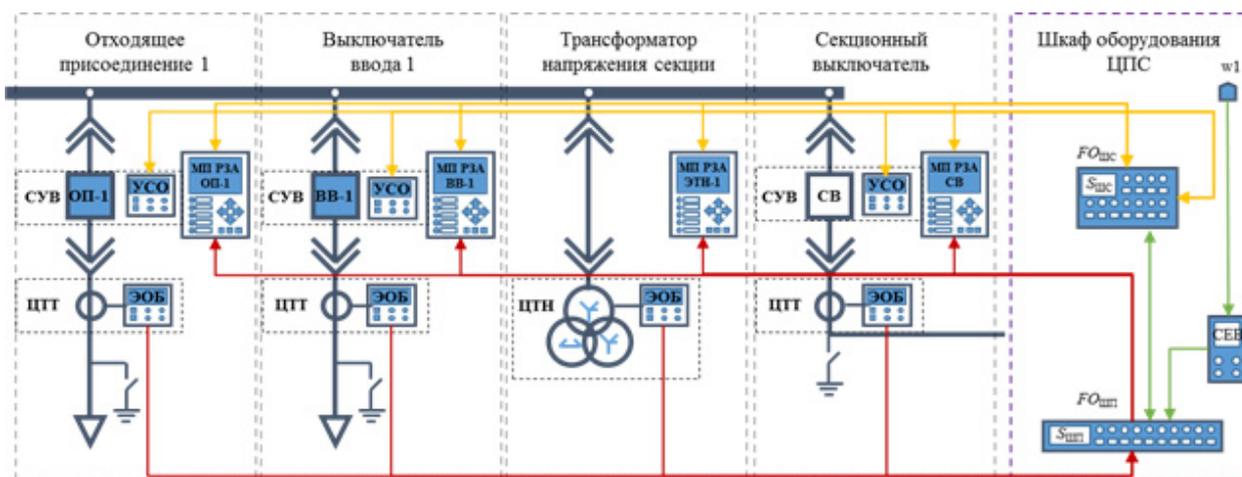


Рис. 3. МП РЗА ЦПС промышленного предприятия

На подстанциях промышленных предприятий типовые присоединения можно условно разделить на ввод (ВВ), секционный выключатель (СВ), трансформатор (ТН) напряжения и отходящее присоединение (ОП).

Рассмотрим эксплуатационные условия комплекса классической РЗА (рис. 2).

Устройство защиты ОП получает сведения о режиме электрической сети от своего трансформатора тока (ЭТТ) и трансформатора напряжения (ЭТН) секции шин по контрольным кабелям цепей тока и напряжения (КК). Получение данных о положении коммутационных аппаратов (КА) и горизонтальный обмен информацией между соседними

МП РЗА (оперативные блокировки, функции защит и пр.) осуществляется с помощью контрольных кабелей, дискретных входов и выходов (DI/DO). Сведения о состоянии МП РЗА передаются в системы телемеханики (ТМ).

При реализации ЦПС (рис. 3) устройство защиты ОП получает сведения о режиме электрической сети от цифрового трансформатора тока (ЦТТ) присоединения и от цифрового трансформатора (ЦТН) секции шин через резервированные каналы передачи данных, состоящие из оптических или медных интерфейсных кабелей ($FO_{\text{шп}}$) и коммутаторов шины процесса ($S_{\text{шп}}$). Все измерения синхронизируются с помощью резервированной системы единого времени (СЕВ), которая напрямую влияет на исправность защит. Получение данных о положении КА, горизонтальный обмен информацией между соседними устройствами МП РЗА ЦПС (оперативные блокировки, выдача команд работы защит и их функций защит и пр.) и передача сведений о состоянии комплекса МП РЗА ЦПС в системы верхнего уровня осуществляется через резервированные каналы передачи данных, состоящие из оптических или медных контрольных кабелей ($FO_{\text{шс}}$) и коммутаторов шины станции ($S_{\text{шс}}$).

Отличительной чертой современных комплексов РЗА является развитая система диагностики, обеспечивающая частую проверку исправности защит [8]. Для построения математической модели функционирования устройств РЗА с частными проверками исправности применяется математический аппарат цепей Маркова [6, 8].

Метод цепей Маркова применим для оценки надежности системы, когда для нее определено пространство состояний. Пространство состояний включает в себя множество состояний и множество возможных переходов, причем оба множества характеризуются жестко заданными исходными параметрами. Визуально пространство состояний может быть представлено в виде графа (рис. 4).

Объект может находиться в состоянии P_i в момент времени $t + \Delta t$ в случае:

— если в момент времени t он находился в состоянии P_i и за время Δt не осуществил переход в другое состояние;

— если в момент времени t он находился не в состоянии P_i за время Δt перешел в него из другого состояния.

Вероятности обоих событий описываются выражениями:

$$P_i(t) \left(1 - \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \Delta t \right). \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m P_j(t) \lambda_{ji} \Delta t. \quad (2)$$

На основании (1) и (2) вероятность нахождения устройства в состоянии i в момент $t + \Delta t$:

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t) \left(1 - \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \Delta t \right) + \sum_{j=1}^m P_j(t) \lambda_{ji} \Delta t. \quad (3)$$

Разделив уравнение (3) на Δt , получим:

$$\frac{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)}{\Delta t} = -P_i(t) \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} + \sum_{j=1}^m P_j(t) \lambda_{ji}. \quad (4)$$

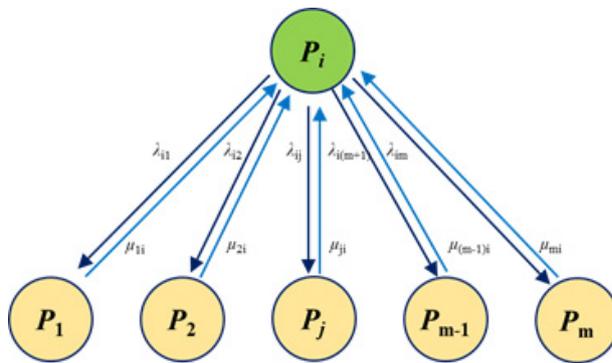


Рис. 4. Граф состояний и переходов системы

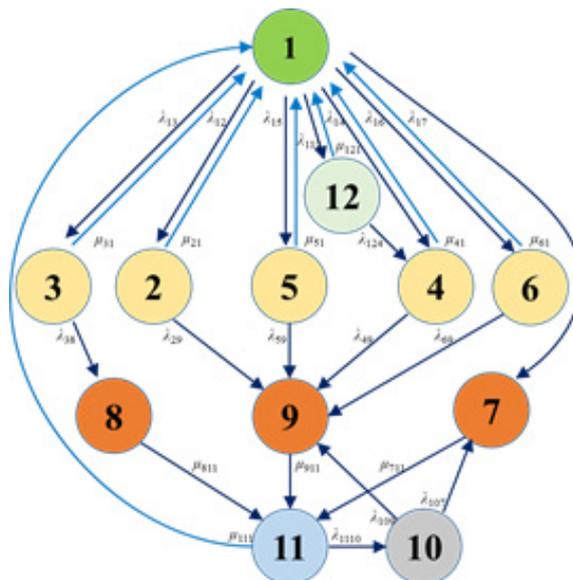


Рис. 5. Граф состояний и переходов комплекса МП РЗА

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -P_i(t) \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} + \sum_{j=1}^m P_j(t) \lambda_{ji}. \quad (5)$$

Система уравнений, описывающая каждое состояние объекта, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = \sum_{j \neq 1}^m P_j(t) \lambda_{j1} - P_1(t) \sum_{j \neq 1}^m \lambda_{1j} \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \sum_{j \neq 2}^m P_j(t) \lambda_{j2} - P_2(t) \sum_{j \neq 2}^m \lambda_{2j} \\ \dots \\ \frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j \neq i}^m P_j(t) \lambda_{ji} - P_i(t) \sum_{j \neq i}^m \lambda_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

Кроме уравнений (6) существует также «нормирующее» выражение, смысл которого заключается в том, что исследуемая система непременно находится в одном из состояний:

$$P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_m(t) = 1. \quad (7)$$

Система уравнений может быть представлена в матричной форме:

$$d\bar{P} = L^T \cdot \bar{P}. \quad (8)$$

Элементы главной диагонали матрицы определяются как:

$$L_{ii} = -\sum_{j=1}^m L_{ij}. \quad (9)$$

Вследствие зависимости (9) матрица имеет вырожденный характер (определитель равен нулю). Для решения матрицы выполняется замена одного из уравнений системы (6) на нормирующее уравнение (7). Итоговое выражение имеет вид

$$d\bar{P} = (L_n^T)^{-1} \cdot \bar{P}. \quad (10)$$

На рис. 5 представлен граф состояний комплекса МП РЗА. Из исправного состояния 1 комплекс может осуществить прямой переход в одно из неисправных состояний (2-6). При наложении любого из неисправных состояний на аварийный режим произойдет отказ в функционировании защиты (7-9). Состояние 11 соответствует процессу восстановления исправности, из которого возможен переход в исправное состояние 1 или в неопределенное состояние 10.

Состояниям 2, 4 и 6 соответствуют диагностируемые неисправности, приводящие к ИС, ОС и ЛС соответственно. При переходе в состояние 2 и 6 работа защит блокируется, и переход в состояния 8 (излишнее срабатывание) и 7 (ложное срабатывание) невозможен, но при возникновении заявки на срабатывание система перейдет в состояние 9 (отказ в функционировании).

Переход в состояние 7 возможен из исправного состояния 1 напрямую.

Особенностью применения технологии ЦПС является наличие состояния 12, соответствующего работоспособному состоянию (в случае диагностируемого отказа одного из резервируемых элементов системы) [9, 10].

Элементы комплексов РЗА подвергаются многократному воздействию в рамках регламентированных операций ТО. Многократность воздействия является одним из факторов, обеспечивающих комплексное диагностирование защит и выявление дефектов. На рис. 6 представлен анализ воздействия на элементы комплексов РЗА, объединенных в функциональные группы, в рамках регламентированных объемов ТО. Отмечается существенное снижение количества воздействий на элементы комплексов МП РЗА ЦПС. Это обусловлено недостаточным учетом специфики функционирования таких комплексов существующими нормативными актами и неприменимостью ряда регламентированных воздействий для проверки элементов МП РЗА ЦПС.

Для относительной оценки изменения многократности проверок введем понятие средний показатель воздействия, определяемый как:

$$R_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (11)$$

где R_i — регламентированное воздействие на функциональную группу комплекса РЗА; n — количество функциональных групп.

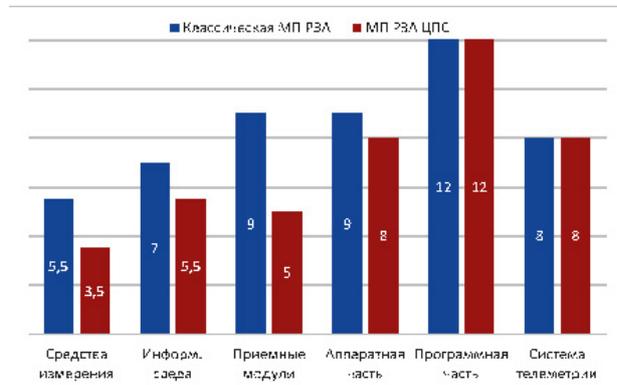


Рис. 6. Воздействие на функциональные группы комплексов РЗА при ТО

Процесс ТО устройств защиты можно представить как работу системы «Человек — машина» (СЧМ) [11]. Для оценки влияния качества ТО введено понятие коэффициента полноты проверок (КПП), который показывает, с какой вероятностью после выполнения ТО комплекс МП РЗА окажется в исправном состоянии:

$$K_{пп} = \exp\left[-\sum_{j=1}^r \lambda_j T_j k_j\right] \cdot \frac{R_{cp}}{R_{cp,n}} \cdot \left(1 - \sum_{s=1}^n q_n\right), \quad (12)$$

где T_j — среднее время выполнения операций j -го вида; λ_j — интенсивность ошибок персонала в рамках ТО, где k_j — число выполненных операций j -го вида; $R_{cp,n}$ — эталонный средний показатель воздействия; q_n — вероятность отказа компонентов, не подвергнутых воздействию в ходе ТО.

Интенсивность ошибок персонала в рамках ТО можно с достаточной точностью определить по данным анализа функционирования устройств РЗА как среднее количество в функционировании по причине некачественного ТО, отнесенное к общему количеству срабатывания защит:

$$\lambda_j = \frac{n_{нс,ср} \cdot \Delta_{то}}{n_{общ,ср}}, \quad (13)$$

где $n_{нс,ср}$ — среднее количество неправильных срабатываний, $n_{общ,ср}$ — среднее количество всех срабатываний, $\Delta_{то}$ — относительное количество неправильных срабатываний по причине некачественного ТО.

Таким образом, переход в исправное состояние с учетом полноты ТО определяется как:

$$\mu_n = K_{пп} \sum_{j=1}^n \mu_{ji}. \quad (14)$$

В свою очередь, возможность перехода комплекса МП РЗА в неопределенное состояние, способное привести к неправильной работе, определяется как:

$$\mu_n = (1 - K_{пп}) \sum_{j=1}^n \mu_{ji}. \quad (15)$$

Изменения структуры функционирования МП РЗА, вызванные внедрением технологии ЦПС, в настоящий момент не учтены в достаточной мере [12]. Таким образом, при выполнении ряда операций ТО выявление оператором дефекта комплекса МП РЗА

Параметры отказов комплекса РЗА [13]

Элемент отказа	Наработка на отказ, ч
Электромагнитный трансформатор тока/напряжения (ЭТТ/ЭТН)	400000
Контрольные кабели медные (КК), на 1 км	3170000
Цифровой трансформатор тока/напряжения (ЦТТ)	160000
Оптические (FO) или медные (FTP) кабели	2575000
Сетевая карта (NIC) и входной разъем (SFP)	3260000
Аппаратная часть МП РЗА (HW)	125000
Программная часть МП РЗА (SW)	25000
Система единого времени (СЕВ)	110000
Коммутаторы (Switch)	345000
Вакуумный выключатель (В-6)	8760000

невозможно, что приводит к снижению качества функционирования устройств МП РЗА.

Определим численные показатели качества функционирования устройств МП РЗА исходя

из справочных и каталожных данных о наработке на отказ элементов системы (табл. 1).

Матрица интенсивностей переходов между состояниями МП РЗА имеет вид:

$$L = \begin{pmatrix} L_1 & \lambda_{12} & \lambda_{17} & \lambda_{14} & \lambda_{15} & \lambda_{16} & \lambda_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{112} \\ \mu_{21} & L_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{29} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{31} & 0 & L_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{38} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{41} & 0 & 0 & L_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{49} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{51} & 0 & 0 & 0 & L_5 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{59} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & L_6 & 0 & 0 & \lambda_{69} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_7 & 0 & 0 & 0 & \mu_{711} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_8 & 0 & 0 & \mu_{811} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_9 & 0 & \mu_{911} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{107} & 0 & \mu_{109} & L_{10} & 0 & 0 \\ \mu_{111} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{1110} & L_{11} & 0 \\ \mu_{121} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{12} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Таблица 2

Стационарные состояния комплексов РЗА

Состояние	Обозначение	МП РЗА классической подстанции	МП РЗА цифровой подстанции	МП РЗА цифровой подстанции при $R_{cp}/R_{cp.н} = 1$
Исправное	P_1	0,956	0,959	0,972
Работоспособное (ЦПС)	P_{12}	0	$1,538 \cdot 10^{-4}$	$1,561 \cdot 10^{-4}$
Излишнее наблюдаемое	P_2	$1,145 \cdot 10^{-4}$	$0,958 \cdot 10^{-4}$	$0,964 \cdot 10^{-4}$
Излишнее ненаблюдаемое	P_3	0,013	0,011	0,011
Отказ наблюдаемое	P_4	$1,584 \cdot 10^{-4}$	$1,149 \cdot 10^{-4}$	$1,157 \cdot 10^{-4}$
Отказ ненаблюдаемое	P_5	0,019	0,014	0,014
Ложное наблюдаемое	P_6	$1,144 \cdot 10^{-4}$	$0,957 \cdot 10^{-4}$	$0,963 \cdot 10^{-4}$
Неопределенное	P_{10}	$1,331 \cdot 10^{-4}$	$8,906 \cdot 10^{-4}$	$2,482 \cdot 10^{-4}$
Восстановление	P_{11}	$3,113 \cdot 10^{-4}$	$1,384 \cdot 10^{-4}$	$1,061 \cdot 10^{-4}$
Ложное срабатывание	P_7	$0,928 \cdot 10^{-4}$	$0,786 \cdot 10^{-4}$	$0,781 \cdot 10^{-4}$
Излишнее срабатывание	P_8	$1,379 \cdot 10^{-4}$	$1,689 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$
Отказ в срабатывании	P_9	$1,782 \cdot 10^{-4}$	$1,821 \cdot 10^{-4}$	$1,319 \cdot 10^{-4}$

Результаты расчетов стационарных значений вероятности безотказной работы представлены в табл. 2.

Расчетное значение вероятности безотказной работы комплекса классической МП РЗА составило 95,6 %, что совпадает в пределах погрешности со средним значением этого показателя по данным многолетнего анализа и свидетельствует об адекватности предложенной математической модели. Разработанная математическая модель может быть применена для оценки эффективности функционирования комплексов РЗА при изменении объемов и качества ТО, в том числе для оценки рисков при реализации проектов по созданию ЦПС.

Анализ результатов расчета свидетельствует о том, что эффективность функционирования устройств защиты в случае применения технологии ЦПС повышается и составляет 95,9 %, даже несмотря на снижение полноты проверок современных устройств защиты в связи с несовершенством существующей методики ТО. Такой результат обусловлен в первую очередь диагностируемыми устройствами ЦПС и резервированием элементов схемы защит. Пересмотр регламентированных объемов существующей системы ТО может обеспечить полноту проверок защит, сопоставимую с классической МП РЗА (условие $R_{\text{ср}}/R_{\text{ср.н}} = 1$). В результате эффективность функционирования защит ЦПС может быть обеспечена на уровне 97,2 %.

Библиографический список

1. О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204. Москва, 2018. 19 с.
2. Цифровая экономика Российской Федерации: государственная программа Российской Федерации от 28.07.2017 г. № 1632-р. Москва, 2017. 88 с.
3. Долежилек Д. Опыт разработки, создания, тестирования и поддержки цифрового вторичного оборудования для систем РЗА // Релейщик. 2018. № 2. С. 44–61.
4. 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-tek-61850-7-3-2009> (дата обращения: 10.12.2022).
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. Шалин А. И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 384 с. ISBN 5-7782-0374-8.
7. Алекин Д. Ю., Яговкин Г. Н. Анализ причин ошибочных действий оперативного персонала при переключении в процессе эксплуатации электроустановок // Безопасность и охрана труда. 2017. № 2. С. 76–79.
8. Кокорин Е. Л., Дмитриев С. А. Оценка работоспособности устройств релейной защиты и автоматики на основе графовой вероятностной модели // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2017. Т. 1. С. 404–407.
9. Дубров В. И., Оганян Р. Г., Шайхутдинов Д. В. [и др.]. Методы и подходы определения технического состояния циф-

ровых электроподстанций // Фундаментальные исследования. 2016. № 9-1. С. 16–20.

10. Шалимов А. С. Схемы испытаний устройств релейной защиты и автоматики на основе стандарта IEC 61850 // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 3. С. 34–36.

11. Акимова Г. П., Соловьев А. В., Пашкина Е. В. Методологический подход к определению влияния человеческого фактора на работоспособность информационных систем // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2007. Т. 29. С. 102–112.

12. Паздерин А. В., Мурзин П. В., Одинаев И. Н., Бобкалонов Ф. З. Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4 (45). С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11.

13. Долежилек Д. Опыт разработки, создания, тестирования и поддержки цифрового вторичного оборудования для систем РЗА // Релейщик. 2018. № 2. С. 44–61.

14. Царёв Н. В., Пинчуков П. С. Особенности расчета показателей надежности цифровых устройств релейной защиты и автоматики // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 4. С. 83–87.

СИМАКОВ Александр Владимирович, ведущий инженер ООО «Газпромнефть-Энергосервис», г. Омск; аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

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, г. Омск.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: hvv-omgups@mail.ru

ЧЕРНЕВ Максим Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Теоретическая электротехника и электрификация нефтяной и газовой промышленности» Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И. М. Губкина, г. Москва.

SPIN-код: 5260-8301

AuthorID (РИНЦ): 924161

Адрес для переписки: makschernev@gmail.com

Для цитирования

Симаков А. В., Харламов В. В., Чернев М. Ю. Разработка математической модели функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 93–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-93-98.

Статья поступила в редакцию 09.01.2023 г.

© А. В. Симаков, В. В. Харламов, М. Ю. Чернев