

Шульпин Андрей Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
телефон (4932) 26-99-21.
Shulpin Andrei Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Systems Department,
telephone (4932) 26-99-21.

УДК 621.316.925.2

Централизованная дифференциальная защита цифровой подстанции с применением метода двойной записи

А.Л. Куликов¹, В.Ю. Вуколов¹, А.А. Колесников²

¹ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

²ООО «НПП Микропроцессорные технологии», г. Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: inventor61@mail.ru, vvucolov@mail.ru, anton8094@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В электрических сетях продолжается переход от устаревших электромеханических реле к микропроцессорным устройствам релейной защиты и автоматики, однако сохраняется при этом традиционная децентрализованная архитектура построения. Альтернативный принцип построения системы релейной защиты и автоматики – централизованная система, которая может позволить снизить затраты как на оборудование, так и на эксплуатацию, а также повысить селективность защит. Перспективно применение централизованной дифференциальной защиты, характерными примерами организации которой являются метод дифференциальных колец и метод мульти-зональной дифференциальной защиты. Общим недостатком предлагаемых подходов с точки зрения эксплуатации современных электрических сетей является сложность их технической реализации. В связи с этим необходимо создание простой и высоконадежной централизованной дифференциальной защиты для цифровых подстанций.

Материалы и методы: Используются методы двойной записи и теории графов. Для оценки показателей надежности защиты использованы расчетные соотношения метода Марковских цепей.

Результаты: Предложен новый принцип организации централизованной дифференциальной защиты цифровых подстанций с применением метода двойной записи. Установлено, что разрабатываемая защита значительно превосходит по показателям надежности типовые технические решения.

Выводы: Предлагаемая защита имеет адаптацию к изменениям конфигурации при переключениях на подстанции. Разработанные технические решения позволяют выявлять повреждения трансформаторов тока и каналов связи, а также обладают высокими показателями надежности. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности реализации централизованной дифференциальной защиты с применением метода двойной записи для цифровых подстанций. Для внедрения централизованной дифференциальной защиты необходимо продолжить исследования в следующих направлениях: разработка микропроцессорного устройства централизованной дифференциальной защиты либо модификация и доработка существующих терминалов микропроцессорной защиты; выбор наиболее подходящего варианта коммуникаций с точки зрения надежности, экономичности и эксплуатационной пригодности; разработка типовых решений предлагаемой релейной защиты и автоматики.

Ключевые слова: цифровая подстанция, двойная запись, дифференциальная защита, зона защиты, контроль исправности линий связи, контроль исправности трансформаторов тока, матрицы, надежность релейной защиты, теория графов, централизованная защита.

Centralized differential protection of the digital substation with double entry method application

A.L. Kulikov¹, V.Ju. Vukolov¹, A.A. Kolesnikov²

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

²ООО «Scientific-Production Enterprise “Microprocessor technologies”», Novosibirsk, Russian Federation
E-mail: inventor61@mail.ru, vvucolov@mail.ru, anton8094@mail.ru

Abstract

Background: Despite the ongoing transition from obsolete electromechanical relays to microprocessor-based relay protection and automation devices (RPA) in electrical networks, the RPA system architecture remains decentralized. Another

principle of RPA system design is a centralized system, which can decrease both the equipment and the operating costs and improve selectivity of protection. The use of centralized differential protection (CDP) has good prospects. Its typical examples are the method of differential rings and the method of multi-zone differential protection. In terms of operating of modern electrical grids, a common drawback of the proposed approaches is the complexity of their technical implementation. The purpose of this study is to create a simple and highly reliable CDP system for digital substations (DSs).

Materials and methods: In this paper, we used the double-entry and graph theory methods. To assess the reliability of protection, we applied the method of Markov chains.

Results: A new principle of organization of CDP of DSs with the use of the double-entry method is proposed. It is established that the reliability of the developed protection significantly exceeds that of the standard technical solutions.

Conclusions: The proposed protection can be adjusted to the configuration changes in case of switchovers at substations. The developed technical solutions allow the identification of the faults in current transformers and communication paths and have very high reliability levels. The obtained results allow us to make a conclusion about the prospects of implementing differential protection using the double entry method at digital substations. CDP implementation requires additional research in the following areas: development of a microprocessor-based device for CDP, or modification and improvement of the existing terminals of microprocessor protection; selection of the most appropriate variant of communication, in terms of reliability, efficiency and operability; development of standard solutions for the proposed relay protection.

Key words: digital substations, double entry, differential protection, protection zone, communication line health monitoring, current transformer health monitoring, matrix, reliability of relay protection, graph theory, centralized protection.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.2.031-040

Введение. В электрических сетях всех классов напряжения продолжается переход от устаревших электромеханических реле к микропроцессорным устройствам релейной защиты и автоматики (РЗА), при этом сохраняется традиционная децентрализованная архитектура построения системы РЗА. При использовании децентрализованной системы РЗА на подстанции количество эксплуатируемых шкафов автоматики и защиты остается практически равным числу защитных шкафов при организации РЗА с электромеханическими реле. Не изменяется и число кабельных связей между шкафами и, как следствие, суммарное количество применяемого контрольного кабеля.

Альтернативный принцип построения системы РЗА – централизованная система, которая может позволить снизить затраты как на оборудование, так и на эксплуатацию, а также повысить селективность защит в распределительных сетях. Применение централизованной системы стало возможным за счет имеющейся в последние годы тенденции к усилению информационных связей между терминалами путем объединения их в локальную информационную сеть с применением протокола МЭК 61850 (GOOSE).

При организации централизованной системы РЗА происходит централизованный сбор информации с учетом резервирования каналов передачи данных. После принятия решения централизованным устройством защиты предполагается выдача команд управления на выключатели элементов электроэнергетической сети.

Несмотря на наличие большого числа разработок, связанных с развитием централизованной защиты с применением современных протоколов связи, основным направлением исследований является разработка общих принципов формирования структуры защиты, определение наиболее приемлемого оборудования и каналов связи. При этом внедрению

новых алгоритмов защиты современной цифровой подстанции (ЦПС) внимание практически не уделяется [1].

В качестве защит, обладающих одновременно высокими чувствительностью, быстродействием и селективностью, целесообразно использовать защиты, основанные на дифференциальном принципе (дифференциальные защиты). При использовании централизованного подхода для организации системы защиты целесообразен переход к централизованной дифференциальной защите (ЦДЗ).

Характерными примерами организации ЦДЗ являются метод дифференциальных колец [2], применяемый в корабельных сетях электроснабжения 13,8/4,16/0,48 кВ, и метод мульти-зональной дифференциальной защиты [3]. Также имеется опыт практической реализации дифференциальной защиты для многоконцевых линий, являющейся частным случаем ЦДЗ [4].

В соответствии с методом дифференциальных колец, сеть разбивается на несколько участков. Участок, образованный трансформаторами тока (ТТ) на границе защищаемой области, проверяется на наличие короткого замыкания (КЗ) в сети. В случае обнаружения КЗ происходит опрос дифференциальной защиты отдельных электроустановок и поврежденный элемент отключается.

При применении метода мультизональной дифференциальной защиты терминалы релейной защиты (РЗ) регистрируют значения токов и положения выключателей. Устанавливаемые локальные концентраторы собирают данные от терминалов на своих и смежных подстанциях. После того как концентратор получает всю информацию, требуемую для дифференциальной защиты, он принимает решение о необходимости отключения или блокирования защит и передает команды на концентратор смежной подстанции. При выяв-

лении неисправности ТТ зона защиты будет расширена до большей за счет использования данных, полученных от следующего ТТ.

Общим недостатком предлагаемых подходов с точки зрения эксплуатации современных электрических сетей является сложность их технической реализации.

Цель исследования – создание высоконадежной ЦДЗ для ЦПС. Применение централизованного подхода при организации системы защиты может существенно повысить надежность релейной защиты (РЗ) и системы управления [1].

Методы исследования. Предлагаемая защита основана на дифференциальном принципе в сочетании с методом двойной записи [5]. Двойная запись – способ регистрации хозяйственных операций бухгалтерского учета, при котором каждое изменение состояния средств фиксируется на двух счетах, обеспечивая общий баланс.

При реализации защиты применены теория графов и аппарат теории матриц. Для иллюстрации работы рассмотрим подстанцию 110/10 кВ, принципиальная схема которой изображена на рис. 1,а.

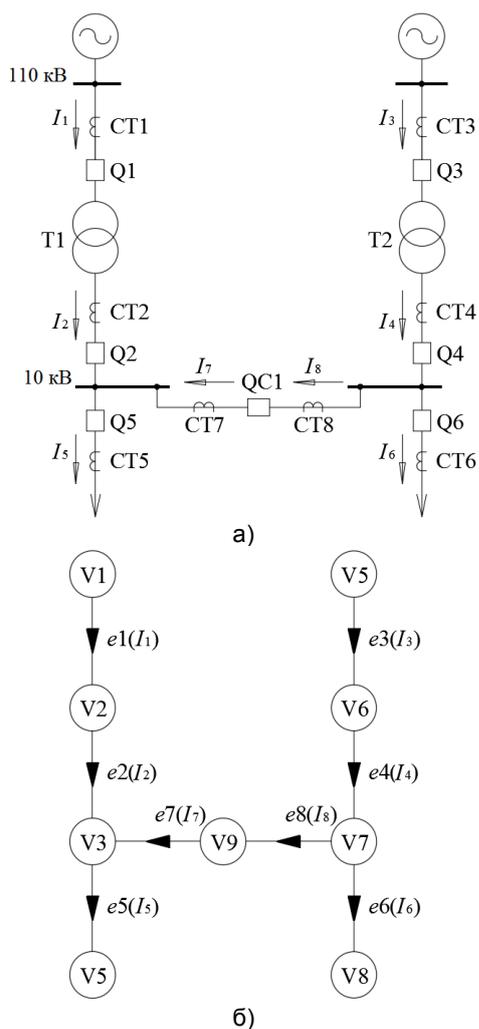


Рис. 1. Схема подстанции 110/10 кВ (а) и однонаправленный граф (б)

Структура всей схемы отображается однонаправленным графом (рис. 1,б) с дугами, представляющими высоковольтные аппараты, и вершинами, соответствующими защищаемым элементам – шинам, трансформаторам. Далее каждая вершина графа представляется специальной матрицей токов, строки которой представляют собой вершины графа, столбцы – разделение дуг, смежных данной вершине, на направленные к ней и направленные от нее. Для рассматриваемого примера матрицы токов будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 MV1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV2 &= \begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 MV3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_5 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_7 & 0 \end{bmatrix} & MV4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_7 & 0 \end{bmatrix} \\
 MV5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_3 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 MV7 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_4 & 0 \\ 0 & I_6 \\ 0 & I_8 \end{bmatrix} & MV8 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_6 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$MV9 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_7 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_8 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

При поиске места повреждения защита производит сравнение токов по дифференциальному принципу на отдельных участках и выявляет потенциально поврежденный элемент. Для всех вершин графа со степенью >1 составляются уравнения в матричной форме для суммы токов в узлах.

Далее определяется, вызвано ли срабатывание пускового органа КЗ на рассматриваемом участке либо имеет место неисправность ТТ или линий связи (ЛС). Наличие неисправности определяется с помощью метода двойной записи. Так как каждая дуга графа отражается с одинаковым весом (значением тока) в матрицах дважды: 1) как дуга, связанная с вершиной и направленная к ней, одной матрицы, и 2) как дуга, связанная с вершиной и направленная от нее, другой матрицы, то при неисправности сумма входящих и исходящих токов в двух матрицах нарушается, но суммарный дифференциальный ток для всей сети остается равным нулю. В случае соблюдения условия наличия КЗ и сохранения суммы токов для всей сети равной нулю определяется неисправность ТТ или ЛС.

Признаки функционирования дифференциальной защиты при различных соотношениях токов и различных результатах выполнения матричных операций для рассматриваемой схемы показаны в табл. 1. Переменные SMV , полученные в результате матричных операций, определяют условия наличия КЗ в зоне защиты. Переменная SUM определяет суммарный дифференциальный ток подстанции.

Выявление повреждения ТТ отдельного присоединения можно осуществить путем дополнительной технической диагностики или автоматически путем формирования результирующих токов, характеризующих их исправность. Например, путем введения дополнительных условий к указанным в табл. 1, представленных добавочными матрицами токов.

Например, для рассматриваемой схемы, принимая, что фидер выключателя Q5 представляет собой присоединение силового двухобмоточного трансформатора, для включения его в зону защиты ЦДЗ необходимо подключиться к обмоткам ТТ низшего напряжения трансформатора. В соответствии с принципом работы защиты, трансформатор представля-

ется дополнительной матрицей токов $MV10$. Соответственно, при изменении структуры схемы изменится размерность всех матриц с 9×2 на 10×2 , а также описание матрицы $MV4$, степень которой станет равной 2.

Преимуществом предлагаемого метода построения ЦДЗ является гибкость системы РЗ при переключениях на подстанции благодаря тому, что итоговые матрицы формируются автоматически, в отличие от рассматриваемых выше защит, где для каждой конфигурации необходимо задавать специальные алгоритмы работы.

Таблица 1. Результаты матричных операций и признаки функционирования защиты

Результирующее значение матричной операции						Признаки функционирования дифференциальной защиты
SMV_2	SMV_3	SMV_6	SMV_7	SMV_9	SUM	
0	0	0	0	0	0	Ток короткого замыкания отсутствует, ТТ исправны
≠0	0	0	0	0	≠0	Ток короткого замыкания на элементе, соответствующем вершине V2 (повреждение на трансформаторе T1)
0	≠0	0	0	0	≠0	Ток короткого замыкания на элементе, соответствующем вершине V3 (повреждение на 1 секции 10 кВ)
0	0	≠0	0	0	≠0	Ток короткого замыкания на элементе, соответствующем вершине V6 (повреждение на трансформаторе T2)
0	0	0	≠0	0	≠0	Ток короткого замыкания на элементе, соответствующем вершине V7 (повреждение на 2 секции 10 кВ)
0	0	0	0	≠0	≠0	Ток короткого замыкания на элементе, соответствующем вершине V9 (повреждение на СВ 10 кВ)
≠0	≠0	0	0	0	0	Неисправен ТТ ТА4 общий для V2 и V3 (дуга e_2 графа)
0	≠0	0	0	≠0	0	Неисправен ТТ ТА5 общий для V3 и V9 (дуга e_7 графа)
0	0	≠0	≠0	0	0	Неисправен ТТ ТА1 общий для V6 и V7 (дуга e_4 графа)
0	0	0	≠0	≠0	0	Неисправен ТТ ТА2 общий для V7 и V9 (дуга e_8 графа)

Количественная оценка надежности предлагаемой защиты. Для количественной оценки преимущества предлагаемого технического решения с точки зрения надежности воспользуемся методом Марковских цепей. Этот метод часто применяется для описания процессов отказов и восстановлений с простейшими потоками и является наиболее приемлемым для расчета надежности систем релейной защиты [6, 7]. Применим математическую модель функционирования РЗ, представленную в [7]. Статистическое распределение прием экспоненциальным.

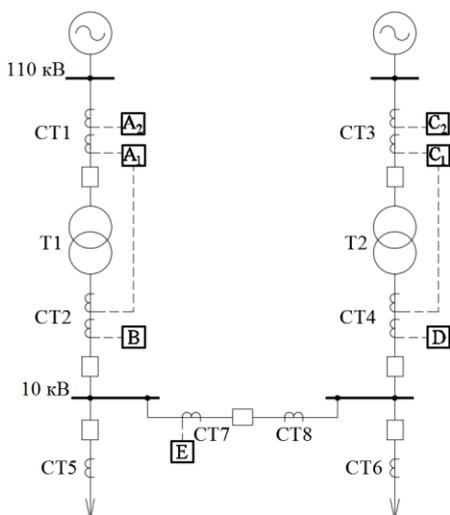
Для РЗ различают надежность срабатывания и надежность несрабатывания [8]. С учетом особенностей анализируемой дифференциальной защиты расчеты будем вести для двух групп отказов в функционировании:

1) ложные срабатывания (при отсутствии КЗ на защищаемом объекте – режим дежурства);

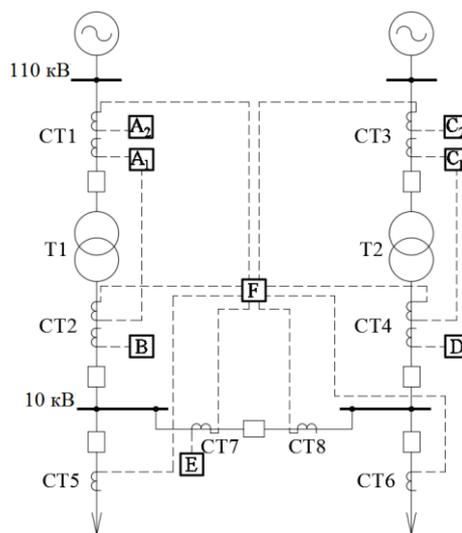
2) отказы в срабатывании (при повреждениях на защищаемом объекте).

Данный подход применяется в ряде работ, например в [9].

На рис. 2 представлены два варианта организации системы РЗ: а) с применением дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ) – A_1, C_1 , максимальной токовой защиты трансформатора (МТЗ ВН) – A_2, C_2 и МТЗ вводов 10 кВ – В, D, секционного выключателя (СВ) 10 кВ – Е; б) с применением общей системы, состоящей из распределенных защит и ЦДЗ – F. При применении ЦДЗ для повышения надежности вводится схема с голосованием: отключающий сигнал формируется при срабатывании двух защит из трех: ДЗТ, МТЗ ВН и ЦДЗ – для защиты трансформатора; МТЗ ВН, МТЗ – ввода 10 кВ и ЦДЗ – в случае защиты секции шин.



а)



б)

Рис. 2. Схема участка сети с распределением защит по трансформаторам тока: а – классическая схема; б – система с применением ЦДЗ

Произведем расчет показателей надежности для обоих случаев. В качестве примера для уменьшения количества вычислений расчет будем вести только для защит трансформатора Т1.

Исходные данные для расчетов, полученные на основании [7, 10], а также данных заводов-изготовителей устройств РЗ, указаны в табл. 2.

Таблица 2. Исходные данные для расчета показателей надежности

Параметр	Обозначение	Значение
Средняя наработка на отказ шкафа защиты (час)	$T_{o.ср.}$	100000
Среднее время восстановления работоспособного состояния шкафа защиты (час)	$T_{в.ср.}$	2
Время ожидания обслуживания (час)	$T_{o.o.}$	2
Интенсивность ложных срабатываний шкафа защиты (1/год)	$\lambda_{ЛА1}, \lambda_{ЛА2}, \lambda_{LF}$	0,0307
Интенсивностью отказов в срабатывании шкафа защиты (1/год)	$\lambda_{OA1}, \lambda_{OA2}, \lambda_{OF}$	0,0876
Средняя наработка на отказ ТТ (час)	$T_{o.ср.СТ}$	400000
Интенсивность отказов ТТ, включая вторичные цепи (1/год)	$\lambda_{СТ1}, \lambda_{СТ2}$	0,0429

Режим дежурства. На рис. 3 приведены графы состояний и переходов в режиме дежурства. Здесь: E_n – исправное состояние системы РЗ; $A_1, A_2, F_1, CT1_1, CT4_1$ – состояния системы РЗ при наличии дефектов, способных привести к ложному срабатыванию устройств РЗ А, В или F; A_1A_2, A_1F_1, A_2F_1 – состояния с дефектами одновременно в двух блоках РЗ;

μ_1, μ_2 – интенсивности восстановления устройств РЗ и ТТ соответственно.

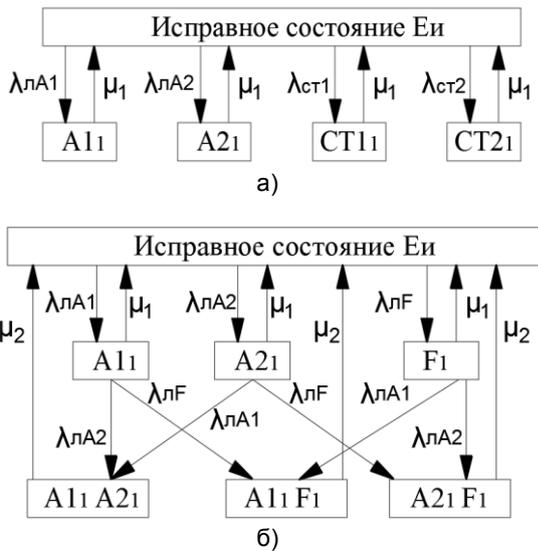


Рис. 3. Графы состояний и переходов для режима дежурства: а – классическая схема; б – система с применением ЦДЗ

Преобразуем графы (рис. 3) к виду, изображенному на рис. 4, где E_1 – состояние системы РЗ при наличии повреждения в одном из устройств, E_2 – состояние системы РЗ при наличии повреждения в двух устройствах.

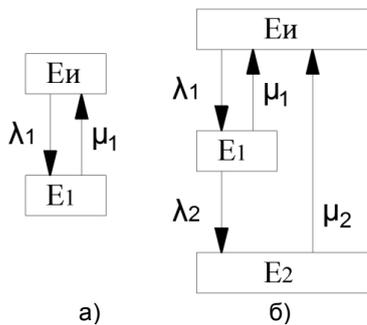


Рис. 4. Преобразованные графы состояний и переходов для режима дежурства: а – классическая схема; б – система с применением ЦДЗ

Расчет для классической системы РЗ. Определим вероятность $P_1(t)$ попадания системы в состояние E_1 , являющееся аварийным, для произвольного момента времени t . Составим систему дифференциальных уравнений, описывающих граф, где $P_{и}(t)$ – вероятность нахождения системы в исправном состоянии $E_{и}$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_{и}(t)}{dt} &= -\lambda_1 P_{и}(t) + P_1(t) \mu_1, \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_1 P_{и}(t) - P_1(t) \mu_1. \end{aligned} \right\} (1)$$

Нормирующее выражение, смысл которого заключается в том, что исследуемая система находится в состоянии либо $E_{и}$, либо E_1 , составляющих полную группу событий, имеет вид $P_{и}(t) + P_1(t) = 1$.

Так как в начальный момент эксплуатации системы при $t = 0$ система находится в работоспособном состоянии, то $P_{и}(0) = 1, P_1(0) = 0$.

В результате решения системы дифференциальных уравнений функция неготовности имеет вид

$$q(t) = P_1(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot (1 - \exp -(\lambda_1 + \mu_1) t).$$

Произведем оценку показателей безотказности систем РЗ. Граф для расчета будет выглядеть аналогично графу на рис. 4,а, но с тем отличием, что в нем будет отсутствовать возможность перехода из состояния E_1 в состояние $E_{и}$, т. е. исключено восстановление с интенсивностью μ_1 . Такое обстоятельство связано с тем, что при отказе системы (попадании ее в поглощающее состояние E_1) эксперимент прекращается – система не может выйти из данного состояния.

В связи с отсутствием восстановления, вместо системы дифференциальных уравнений (1) результатом будет выражение для вероятности безотказной работы (ВБР) при экспоненциальном законе распределения:

$$R(t) = P_{и}(t) = \exp -(\lambda_1 t). \quad (2)$$

Расчет для системы РЗ с ЦДЗ. Определим вероятность попадания системы в состояние E_2 . Система дифференциальных уравнений, описывающих граф, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_{и}(t)}{dt} &= -\lambda_1 P_{и}(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_1 P_{и}(t) - (\lambda_2 + \mu_1) P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_2 P_1(t) - \mu_2 P_2(t). \end{aligned} \right\} (3)$$

Решая систему уравнений (3), получаем функцию неготовности

$$q(t) = P_2(t) \approx 1,16 \cdot 10^{-9}.$$

Граф для расчета показателей безотказности будет выглядеть аналогично графу, изображенному на рис. 4,б, но с тем отличием, что в нем будет отсутствовать возможность перехода из состояния E_2 в состояние $E_{и}$.

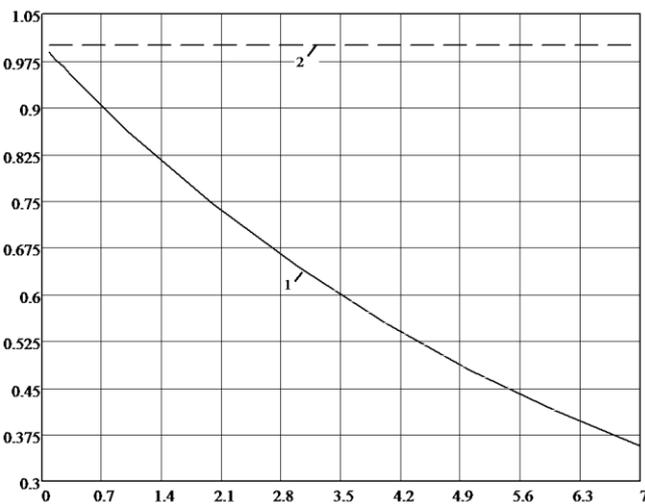
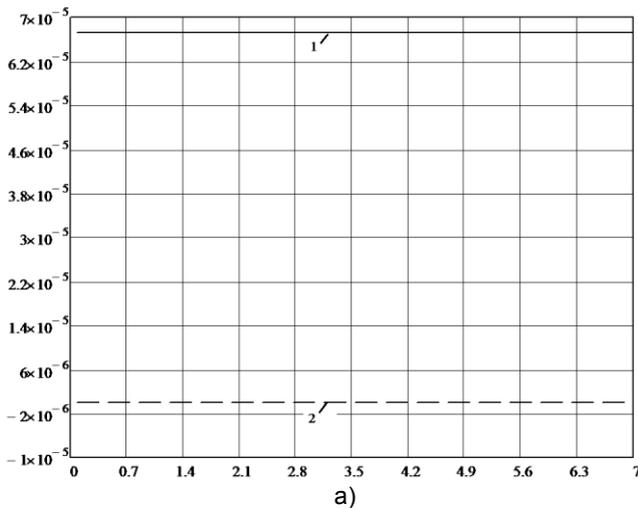
Система дифференциальных уравнений, описывающих граф, определяется выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_{и}(t)}{dt} &= -\lambda_1 P_{и}(t) + \mu_1 P_1(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_1 P_{и}(t) - (\lambda_2 + \mu_1) P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_2 P_1(t). \end{aligned} \right\} (4)$$

Решая систему уравнений (4), получаем искомую вероятность безотказной работы:

$$R(t) = 1 - P_2(t) = -1,17 \cdot 10^{-9} e^{-2190t} + e^{-2,6 \cdot 10^{-6} t}.$$

На рис. 5 построены зависимости функции неготовности систем РЗ и функции ВБР от среднего времени между проверками.



б)

Рис. 5. Функции неготовности системы РЗ (а) и функции ВБР систем РЗ (б): 1 – классическое построение системы РЗ; 2 – система с применением ЦДЗ

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что функции неготовности представляют собой прямые, значения которых близки к нулю. Это объясняется тем, что для рассматриваемого случая процесс восстановления можно считать мгновенным. Также благодаря мгновенному восстановлению, ВБР системы с применением ЦДЗ имеет достаточно высокие значения на всем рассматриваемом временном промежутке, по сравнению с классическим построением системы РЗ. Для наглядности изменения функции ВБР график рис. 5,б построен в более крупном масштабе (рис. 6).

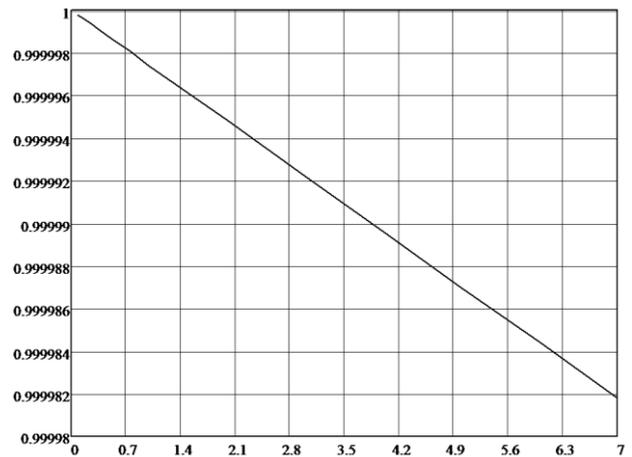
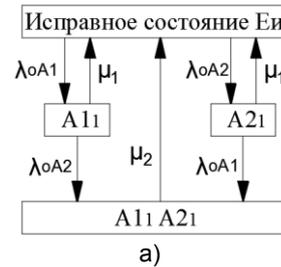
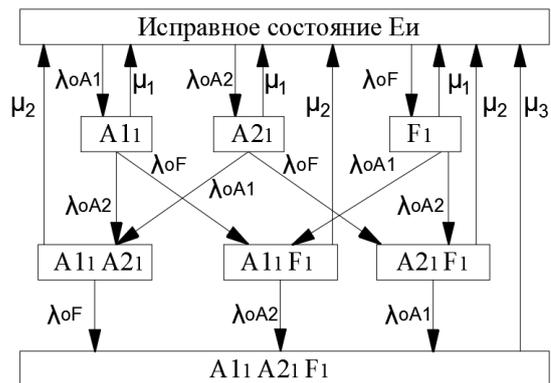


Рис. 6. Функция ВБР системы с применением ЦДЗ в увеличенном масштабе

Режим повреждений на защищаемом объекте. На рис. 7 приведены графы состояний и переходов в режиме повреждения на трансформаторе. Здесь: E_i – исправное состояние системы РЗ; A_{11}, A_{21}, F_1 – состояния системы РЗ при наличии дефектов, способных привести к отказу в срабатывании блока РЗ; $A_{11}A_{21}, A_{11}F_1, A_{21}F_1$ – состояния с дефектами одновременно в двух блоках РЗ; μ_1, μ_2 – интенсивности восстановления.



а)



б)

Рис. 7. Графы состояний и переходов для режима повреждения на защищаемом объекте: а – классическая схема; б – система с применением ЦДЗ

Преобразуем графы (рис. 7) к виду, изображенному на рис. 8. Так как повреждения ТТ и их вторичных кабелей не способны привести к отказу в срабатывании защиты, то они не входят в расчетную схему.

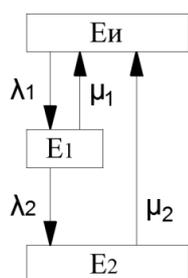


Рис. 8. Преобразованный граф состояний и переходов для режима повреждений на защищаемом объекте

Система дифференциальных уравнений, описывающих граф (рис. 8), будет аналогичной (3), а система дифференциальных уравнений, описывающих граф для вероятности безотказной работы, будет аналогичной (4).

Решая систему уравнений (3), получаем функцию неготовности для классической схемы:

$$q(t) = P_2(t) = -0,625 \cdot e^{-0,279 \cdot t} + 0,476 \cdot e^{-0,367 \cdot t} + 0,149 \cdot e^{-0,0013 \cdot t}.$$

Функция неготовности для системы РЗ с ЦДЗ определяется соотношением

$$q(t) = P_2(t) = 1,308 \cdot e^{-0,4 \cdot t} - 1,676 \cdot e^{-0,312 \cdot t} + 0,369.$$

Решая систему уравнений (4), определяем вероятность безотказной работы для классической схемы:

$$R(t) = 1 - P_2(t) = 0,005 - 0,0964 \cdot e^{-0,418 \cdot t} + 1,095 \cdot e^{-0,037 \cdot t}.$$

При этом вероятность безотказной работы для системы РЗ с ЦДЗ составляет

$$R(t) = 1 - P_2(t) = 1,251 \cdot e^{-0,096 \cdot t} - 0,251 \cdot e^{-0,479 \cdot t}.$$

На рис. 9 изображены зависимости функции неготовности систем РЗ и функции вероятности безотказной работы от среднего времени между проверками.

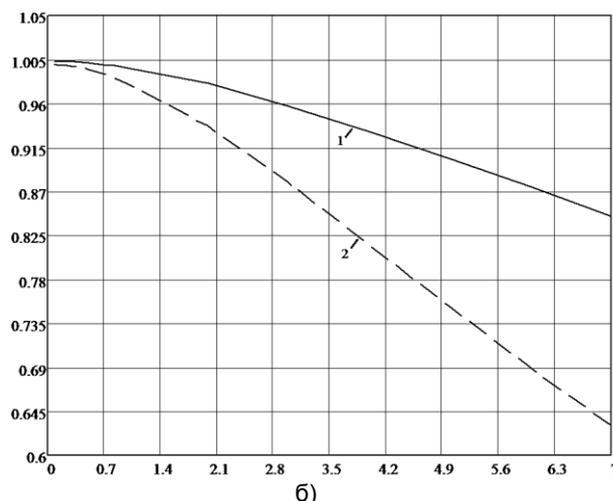
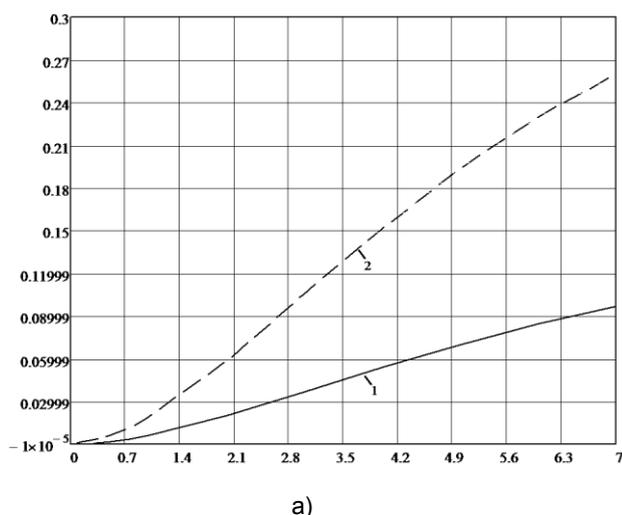


Рис. 9. Функции неготовности (а) и функции ВБР (б) РЗ: 1 – классическое построение системы РЗ; 2 – система с применением ЦДЗ

Результаты. В зависимости от соотношения токов, а также результатов выполнения операций над матрицами токов можно реализовать надежное функционирование централизованной дифференциальной защиты ЦПС. При этом обеспечивается не только действие защиты при повреждениях на каждом участке, но и исключаются ее излишние действия при повреждениях трансформаторов тока или линий связи.

Анализ численных результатов расчетов показателей надежности РЗ трансформатора (рис. 5, 9) показывает:

- разработанная защита ЦПС с применением метода двойной записи в состоянии дежурства значительно превосходит по показателям надежности типовое техническое решение;

- показатели надежности защиты ЦПС с применением метода двойной записи в аварийной ситуации ниже, чем для типового технического решения. Это связано с тем, что расчет производился лишь для части системы релейной защиты подстанции – защиты трансформатора. При применении предлагаемой методики для практического расчета показателей надежности для централизованной релейной защиты подстанций в целом данные соотношения должны измениться в сторону увеличения показателей надежности централизованной защиты;

- полученные расчетные соотношения могут быть использованы в составе методики практического расчета показателей надежности централизованной релейной защиты цифровых подстанций.

Выводы. Предложенный новый принцип организации централизованной дифференциальной защиты цифровой подстанции с применением метода двойной записи позволяет адаптировать предлагаемую защиту к измене-

ниям конфигурации при переключениях на подстанции.

Разработанные технические решения позволяют выявлять повреждения трансформаторов тока и каналов связи, а также обладают высокими показателями надежности.

Для внедрения защиты на первом этапе необходимо предусматривать комбинированное решение – смешанные системы РЗА, где централизованная дифференциальная защита эксплуатируется параллельно с существующими устройствами.

Список литературы

1. **Das R., Kanabar M.** Centralized Substation Protection and Control – Report of Working Group K15 of the Substation Protection Subcommittee WG K15 Report, December, 2015.

2. **Tang J., McLaren P.G.** A wide area differential backup protection scheme for Shipboard application // IEEE Trans. Power Del. – 2006, Jul. – Vol. 21, no. 3.

3. **Guo H., Kangvansaichol K., Crossley P.** Enhanced characteristics of multi-zone current differential protection for transmission network. Actual trends in development of power system protection and automation. – Yekaterinburg, 03.06–07.06, 2013.

4. **Gajić Z., Brnčić I., Einarsson T., Ludqvist B.** Practical experience from multiterminal line differential protection installations. Relay protection and substation automation of modern power systems // Materials of international conference. – Cheboksary, 2007.

5. **Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Колесников А.А.** Централизованная дифференциальная защита распределительных сельских сетей 6–35 кВ с применением метода двойной записи // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 2(69). – С. 71–81.

6. **Smeets B.H., Bollen M.H.J.** Stochastic modelling of protection systems: comparison of four mathematical techniques // EUT report. E, Fac. of Electrical Engineering. Vol. 95-E-291. – Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1995. – 67 p.

7. **Шалин А.И.** Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 549 с.

8. **Смирнов Э.П.** Подход к расчету надежности устройств релейной защиты // Электричество. – 1965. – № 9. – С. 44–49.

9. **Khurram A., Ali H., Tariq A., Hasan O.** Reliability Analysis of Protective Relays in Power Distribution Systems // 18th International Workshop on. Formal Meth-

ods for Industrial Critical Systems (FMICS-2013), Springer LNCS 8187. – Madrid, Spain, 2013. – P. 169–183.

10. **Гук Ю.Б.** Теория надежности в электроэнергетике. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. – 208 с.

References

1. Das, R., Kanabar, M. Centralized Substation Protection and Control – Report of Working Group K15 of the Substation Protection Subcommittee WG K15 Report, December, 2015.

2. Tang, J., McLaren, P.G. A wide area differential backup protection scheme for Shipboard application. IEEE Trans. Power Del., Jul. 2006, vol. 21, no. 3.

3. Guo, H., Kangvansaichol, K., Crossley, P. Enhanced characteristics of multi-zone current differential protection for transmission network. Actual trends in development of power system protection and automation. Yekaterinburg, 03.06–07.06, 2013.

4. Gajić, Z., Brnčić, I., Einarsson, T., Ludqvist, B. Practical experience from multiterminal line differential protection installations. Relay protection and substation automation of modern power systems. Materials of international conference. Cheboksary, 2007.

5. Kulikov, A.L., Vukolov, V.Yu., Kolesnikov, A.A. Tsentralizovannaya differentsial'naya zashchita raspredelitel'nykh sel'skikh setey 6–35 kV s primeneniem metoda dvoynoy zapisi [Centralized differential protection of rural 6–35 kV distribution networks with the application of the double entry method]. Vestnik NGIEI, 2017, no. 2(69), pp. 71–81.

6. Smeets, B.H., Bollen, M.H.J. Stochastic modelling of protection systems: comparison of four mathematical techniques. EUT report. E, Fac. of Electrical Engineering; Vol. 95-E-291. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1995. 67 p.

7. Shalin, A.I. Nadezhnost' i diagnostika releynoy zashchity energosistem [Reliability and diagnostics of relay protection of power systems]. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 2002. 549 p.

8. Smirnov, E.P. Podkhod k raschetu nadezhnosti ustroystv releynoy zashchity [An approach to calculating the reliability of relay protection]. Elektrichestvo, 1965, no. 9, pp. 44–49.

9. Khurram, A., Ali, H., Tariq, A., Hasan, O. Reliability Analysis of Protective Relays in Power Distribution Systems. 18th International Workshop on. Formal Methods for Industrial Critical Systems (FMICS-2013), Springer LNCS 8187. Madrid, Spain, pp. 169–183.

10. Guk, Yu.B. Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike [Theory of reliability in power industry]. Leningrad, Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie, 1990. 208 p.

Куликов Александр Леонидович,

ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева»,
доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,
e-mail: inventor61@mail.ru

Kulikov Aleksandr Leonidovich,

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of the Department of Electrical Power Engineering,
Electric Supply and Power Electronics,
e-mail: inventor61@mail.ru

Вуколов Владимир Юрьевич,

ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,
e-mail: vvukolov@mail.ru

Vukolov Vladimir Yuryevich,
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electric Supply and Power Electronics,
e-mail: vvucolov@mail.ru

Колесников Антон Александрович,
ООО «НПП Микропроцессорные технологии» (г. Новосибирск),
ведущий инженер-проектировщик,
e-mail: anton8094@mail.ru
Kolesnikov Anton Aleksandrovich,
ООО «Scientific-Production Enterprise Microprocessor technologies» (Novosibirsk),
Chief Design Engineer,
e-mail: anton8094@mail.ru