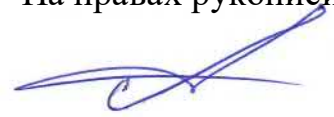


На правах рукописи



Андреев Антон Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ЛОКАЛИЗАЦИИ  
ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 10 КВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГОРОДСКИХ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ») на кафедре «Электроснабжение и электротехника».

**Научный руководитель:**

**Вахнина Вера Васильевна**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»

**Официальные оппоненты:**

**Лачугин Владимир Фёдорович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, профессор кафедры «Релейная защита и автоматизация энергосистем»

**Ведерников Александр Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, заведующий кафедрой «Электрические станции»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

Защита состоится 16 января 2024 года в 10 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.377.06, при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ауд. № 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d24237706.samgtu.ru/node/2>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.377.06  
кандидат технических наук,  
доцент



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** На сегодняшний день более половины всей вырабатываемой электроэнергии распределяется посредством кабельных линий 6-10 кВ. Их массовость, а также другие технологические причины приводят к тому, что кабельные линии являются наиболее повреждаемыми элементами электрической сети. В сравнении с воздушными линиями кабели обладают высокой надежностью, электробезопасностью и эстетичностью. Данные преимущества особенно актуальны для электротехнических комплексов (ЭТК) городских электрических сетей, так как они осуществляют электроснабжение всех элементов инфраструктуры города. В то же время технологические отказы кабелей могут привести к нарушению деятельности жизненно важных элементов городского электрохозяйства. Так как предупредить основную часть повреждений практически нереально, то аварийные отключения – это явление, носящее вероятностный характер.

Электроснабжение основной части потребителей мегаполисов осуществляется в соответствии со второй и третьей категорий надежности электроснабжения, поэтому возникновение повреждения в кабельной линии 10 кВ приведет либо к частичному, либо к полному отключению абонентов. В городских распределительных сетях выявление и локализация поврежденного кабеля производится оперативным персоналом с помощью методик локализации повреждений (МЛП). Действующая МЛП при многофазном коротком замыкании (МКЗ) в кабельной линии 10 кВ включает большое количество действий, выполнение которых приводит к увеличению времени локализации. Возникновение таких неисправностей как однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) может быть даже более болезненно для электроснабжения городских кабельных сетей. При применении действующей МЛП ОЗЗ процесс локализации замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью может занимать продолжительное время и сопровождаться ручными отключениями потребителей. Таким образом, проблема локализации повреждений кабельных линий 10 кВ при эксплуатации ЭТК городских распределительных сетей актуальна. Разработка действенных МЛП кабельных линий позволит решить данную проблему и с технической точки зрения повысит оперативность процесса локализации.

**Степень разработанности проблемы.** Фундаментальный вклад в решение проблемы исследования надежности ЭТК городских электрических сетей внесли следующие известные ученые и исследователи: Федотов А.И., Куро Ж., Куско А., Буторин В.А., Мясоедов Ю.В., Шведов Г.В., Сибикин Ю.В., Соловьёв А.Л. Вопросами селективности защит от однофазных замыканий на землю посвящены работы зарубежных и российских учёных: Rezavandi R., Khaburi D.A., Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Zhang H. A., Burkhardt E., Шуин В.А., Лихачев Ф.А., Обабков В.А., Булычев А.В., Шалин А.И., Андреев В.А., Титенков С.С. и др. Эффективность внедрения датчиков короткого замыкания описана в работах Тарасова К.В., Назарова А.В. и Горюнова А.Г.

**Цель диссертационной работы.** Улучшение процесса эксплуатации

электротехнических комплексов городских распределительных сетей за счет разработки методик локализации повреждений в кабельных линиях 10 кВ.

#### **Решаемые задачи.**

1. Анализ существующих способов локализации повреждений в кабельных линиях 10 кВ при эксплуатации электротехнических комплексов городских распределительных сетей.

2. Разработка методик локализации повреждений в кабельных линиях 10 кВ при эксплуатации электротехнических комплексов городских распределительных сетей.

3. Количественная оценка перенапряжений, вызванных переключениями в сети 10 кВ, во время замыкания на землю при использовании разработанных методик локализации повреждений.

4. Обоснование применения разработанных методик локализации повреждений в кабельных линиях 10 кВ при эксплуатации электротехнических комплексов городских распределительных сетей.

**Объектом исследования** являются городские распределительные кабельные сети 10 кВ.

**Предметом исследования** являются методики локализации повреждений в кабельных линиях 10 кВ электротехнических комплексов городских распределительных сетей.

**Методы исследования.** Для решения задач работы использовались теория линейных и нелинейных электрических цепей, методы математического и имитационного моделирования. Обоснованность и достоверность результатов работы определяются корректным применением математических методов исследования и сертифицированного программного обеспечения MATLAB с пакетом расширения SIMULINK.

#### **Научная новизна.**

1. Методика локализации повреждений при многофазных коротких замыканиях в кабельных линиях 10 кВ, отличающаяся от известных использованием специальных датчиков короткого замыкания.

2. Методика локализации повреждений при однофазных замыканиях на землю в кабельных линиях 10 кВ, отличающаяся применением последовательного деления и перегруппирования сети на участки.

3. Имитационная модель двухсекционной распределительной сети, отличающаяся возможностью исследования перенапряжений, возникающих при переключениях в сети 10 кВ во время однофазного замыкания на землю, которая может быть использована для дальнейшего совершенствования методик локализации повреждений при замыканиях на землю в городских кабельных сетях 10 кВ.

#### **Практическая значимость диссертационной работы.**

Разработанная методика локализации повреждений при многофазных коротких замыканиях в кабельных линиях 10 кВ позволяет значительно сократить время локализации многофазных коротких замыканий в городских кабельных сетях 10 кВ.

Разработанная методика локализации повреждений при однофазных

замыканиях на землю в кабельных линиях 10 кВ позволяет сократить время локализации замыкания на землю, а в отдельных случаях полностью исключить перерывы электроснабжения потребителей при осуществлении поиска данного повреждения.

Предложенные в диссертации научно-технические решения вошли в устойчивую практику АО «ССК» и применяются при эксплуатации электротехнических комплексов городских распределительных сетей 10 кВ. Разработанная методика локализации повреждений при однофазных коротких замыканиях в кабельных линиях 10 кВ в городских распределительных сетях позволяет не только ускорить процесс локализации, но и ограничить кратковременные отключения потребителей, выполняемые в ходе поиска замыкания на землю (Справка о внедрении АО «ССК»).

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Методика локализации повреждений при многофазных коротких замыканиях в кабельных линиях 10 кВ с применением датчиков короткого замыкания.

2. Техническое решение индикации коротких замыканий для городских кабельных сетей 10 кВ.

3. Методика локализации повреждений при однофазных замыканиях на землю в кабельных линиях 10 кВ с применением последовательного деления и перегруппирования сети на участки.

4. Анализ снижения расчетного времени локализации повреждений и недоотпуска электроэнергии в результате применения разработанных методик.

**Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук** выполнена в соответствии с паспортом специальности - 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» и отвечает направлениям: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем...», п. 2 «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов», п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

**Достоверность полученных результатов** обусловлена использованием обоснованных допущений, строгих математических методов, адекватность которых подтверждена результатами теоретических, прикладных и компьютерно-имитационных исследований, а также апробации результатов диссертации на российских и международных конференциях, форумах и семинарах.

**Апробация работы.** Результаты работы обсуждались на научно-технических семинарах ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет».

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: II Всероссийская научно-

практическая конференция «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» (Казань, 2020); III Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» (Казань, 2021); LI Международная научно-практическая конференция «Федоровские чтения» (Москва, 2021); I Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты» (Казань, 2021).

**Публикации.** По тематике исследований опубликовано 10 научных работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, получен 1 патент на полезную модель.

**Личный вклад автора в диссертационное исследование.** Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно. В основном объеме исследований, изложенных в диссертации, автором разработаны: МЛП при МКЗ в кабельных линиях 10 кВ с применением датчиков короткого замыкания, модель датчика короткого замыкания для кабельных линий 10 кВ, МЛП при ОЗЗ в кабельных линиях 10 кВ с применением последовательного деления и перегруппирования сети на участки, математическая модель участка городской распределительной сети 10 кВ, проанализированы результаты исследования, выполнена подготовка основных публикаций по теме диссертации.

**Структура и объем диссертации.** В составе диссертации: введение, четыре главы, заключение, список используемой литературы и 2 приложения. Общий объем работы – 131 страница, включая 49 рисунков, 21 таблицу. Список используемой литературы состоит из 119 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определена цель и поставлены задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** показано, что реализация приоритетных задач по разработке МЛП кабельных линий 10 кВ при эксплуатации ЭТК городских распределительных сетей позволит не только сократить время локализации, но и ограничить кратковременные отключения потребителей.

Проведен анализ повреждаемости кабельных линий 10 кВ в распределительных сетях, выполненный на примере Автозаводского района г. Тольятти, в ходе которого установлено, что наиболее частыми видами повреждений являются МКЗ и ОЗЗ. Результаты проведенного анализа хорошо соотносятся с существующими статистическими данными. Поэтому локализация именно данных видов повреждений в кабельных линиях 10 кВ является одной из важных задач при возобновлении электроснабжения в аварийных ситуациях. Рассмотрены общие сведения о городских распределительных сетях и конфигурациях их схем. Установлено, что в звене, включающим распределительные пункты (РП) 10 кВ и трансформаторные подстанции (ТП)

10/0,4 кВ, не выполняются требования селективности. В процессе анализа действующих МЛП кабельных линий 10 кВ установлено количество переключений ( $n_{\text{перекл.}}$ ), которые следует выполнить в ходе локализации, и количество электроустановок, на которых проводятся переключения ( $n_{\text{эл.уст-ок}}$ ). Используя эти параметры, время локализации повреждения и время восстановления электроснабжения потребителей ( $t$ ) можно определить в виде:

$$t = n_{\text{перекл.}} \cdot t_{\text{перекл.}} + n_{\text{эл.уст-ок}} \cdot t_{\text{переезда}} \cdot \quad (1)$$

С учетом приведенных условных характеристик определено время локализации повреждения и время восстановления нормального электроснабжения потребителей при МКЗ в кабельных линиях 10 кВ. Выявлены недостатки, которые приводят к увеличению времени локализации и времени восстановления нормального электроснабжения потребителей. Обоснована возможность оптимизации действующей МЛП МКЗ, которая реализуется специальной индикацией, указывающей на поврежденную линию между ТП.

Проведен анализ существующих защит от замыканий на землю, по результатам которого можно констатировать актуальность проблемы определения поврежденного отходящего присоединения. Установлено, что действующая МЛП ОЗЗ имеет недостатки, приводящие к увеличению времени локализации, и деструктивный характер для электроснабжения городских потребителей.

Для сокращения времени локализации ОЗЗ и ограничения количества отключений в ходе локализации предложено комбинировать методы последовательного отключения и последовательного деления. Применение этой комбинации предполагает последовательное деление и перегруппирование сети, с целью выявления ОЗЗ на ограниченном участке. Перегруппирование сети включает выполнение переключений в сети 10 кВ во время замыкания на землю. При этом ОЗЗ сопровождаются перенапряжениями, которые могут привести к повреждению изоляции. Это является обоснованием исследования перенапряжений, возникающих при ОЗЗ во время переключений.

**Во второй главе** разработаны МЛП кабельных линий 10 кВ при эксплуатации ЭТК городских распределительных сетей. Разработанная методика состоит из двух этапов.

1. Получение сведений о поврежденной КЛ-10 кВ по сработавшим датчикам короткого замыкания.
2. Производство переключений по восстановлению электроснабжения потребителей и по вводу в работу неповрежденных элементов схемы.

Разработанная МЛП при МКЗ в КЛ-10 кВ использует специальные датчики короткого замыкания (ДКЗ), которые указывают направление прохождения тока КЗ. Комплект из двух ДКЗ устанавливается на все вводные кабельные линии в ТП (рисунок 1 а). Срабатывание хотя бы одного ДКЗ (окрашены красным цветом, рисунок 1 б) на КЛ свидетельствует о прохождении по кабелю тока КЗ, что позволяет определить поврежденную КЛ.

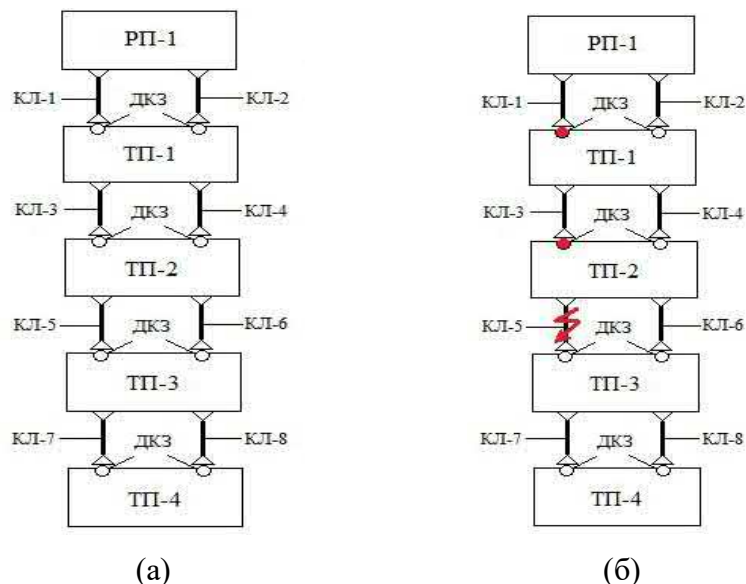


Рисунок 1 – Структурная схема цепочки ТП с применением ДКЗ: а) в нормальном режиме; б) в аварийном режиме

Получение сигнала о срабатывании ДКЗ является входной информацией при локализации, которая определяет дальнейший порядок выполнения переключений.

Алгоритм локализации МКЗ в зависимости от места возникшего повреждения реализуется на основе сквозной нумерации подстанций (рисунок 2).

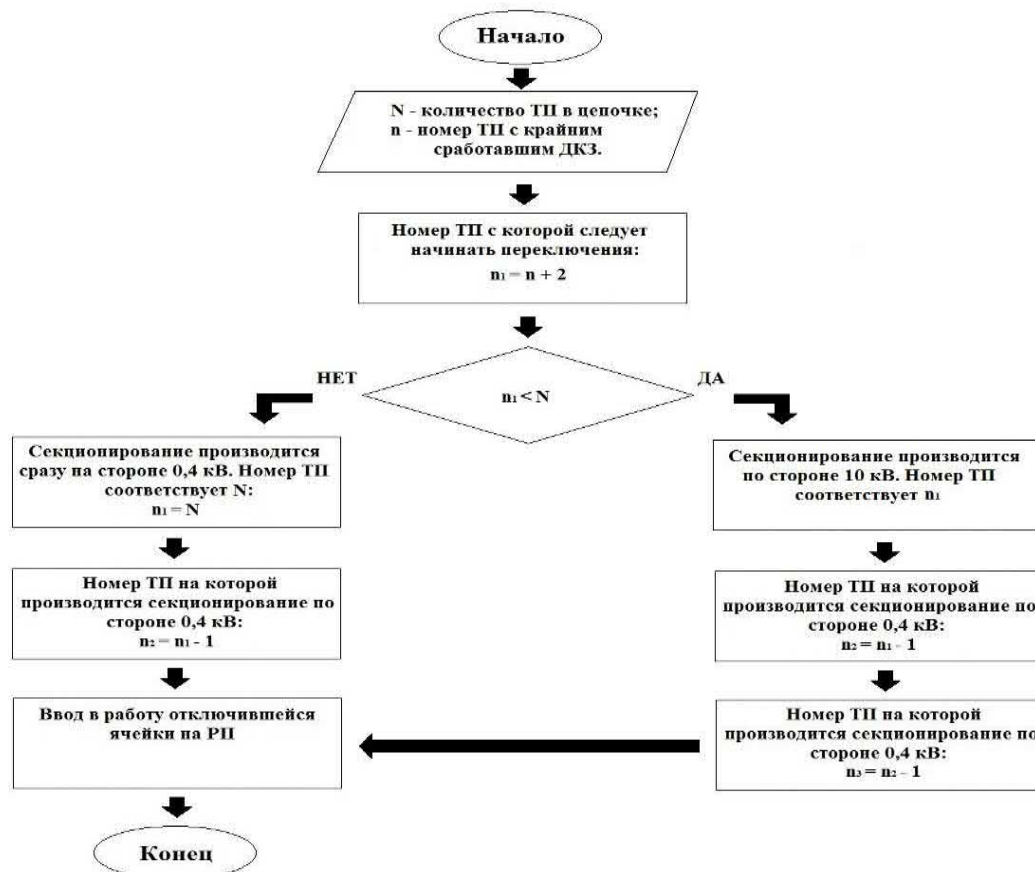


Рисунок 2 – Алгоритм локализации МКЗ с применением разработанной МЛП



Получение сигнала о срабатывании ДКЗ является входной информацией при локализации, которая определяет дальнейший порядок выполнения переключений. Входные параметры алгоритма: количество ТП в цепочке ( $N$ ), номер подстанции со сработавшим ДКЗ ( $n$ ). Срабатывание ДКЗ на одной из подстанций говорит о возникновении в этой зоне короткого замыкания, которое ликвидируется аварийным отключением выключателя на РП. Порядковый номер подстанции, с которой следует начинать переключения, определяется как:

$$n_1 = n + 2. \quad (2)$$

Существует условие, которое устанавливает характер дальнейших переключений:

$$n_1 < N. \quad (3)$$

Следующее действие – секционирование по стороне 0,4 кВ. Номер ТП, на которой производятся переключения, определяется как:

$$n_2 = n_1 - 1. \quad (4)$$

То же самое производится и для ТП, подключенной выше по цепочке:

$$n_3 = n_2 - 1. \quad (5)$$

Выполненные переключения включают в себя отключение вводного выключателя нагрузки обесточенной секции и ввод в работу секции шин 0,4 кВ через межсекционную перемычку 0,4 кВ.

Если условие (3) не выполняется, то переключения начинаются с концевой ТП, номер которой соответствует количеству подстанций в заданной магистрали:

$$n_1 = N. \quad (6)$$

На этой ТП производится аналогичное секционирование по стороне 0,4 кВ. Те же самые переключения выполняются на предыдущей подстанции:

$$n_2 = n_1 - 1. \quad (7)$$

Последним действием алгоритма является ввод в работу отключившегося выключателя 10 кВ на РП.

Данное классическое представление алгоритма достаточно наглядно, однако оно содержит объемные пояснения, которые необходимы для восприятия разработанной методики. Так как в алгоритме рассматриваются несколько процессов: определение порядкового номера подстанции и состав оперативных переключений, то удобнее рассматривать алгоритм в виде графа и в матрично-предикатном виде. Представление алгоритма графом в виде граф-схемы упрощает восприятие разработанной методики. При этом любая из этих граф-схем имеет два типа вершин: блок действия и предикатный блок. Предикатные блоки обозначены  $d = \{d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_k\}$ , где блок  $d_0$  является условием (3), а остальные блоки фиксируют окончание операций, заданных в блоках действия. Блоки, определяющие выполнение каждого действия, обозначены  $A = \{A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_k\}$ . Каждый блок действия соответствует операциям, выполняемым в ходе локализации:

$A_0$  – определение номера ТП, с которой начинаются переключения по формуле (2);

$A_1$  – секционирование по стороне 10 кВ на ТП с номером  $n_1$ ;

$A_2$  – секционирование по стороне 0,4 кВ на ТП, номер которой

определяется по формуле (4);

$A_3$  – секционирование по стороне 0,4 кВ на ТП, номер которой определяется по формуле (5);

$A_4$  – секционирование по стороне 0,4 кВ на ТП, номер которой соответствует N;

$A_5$  – секционирование по стороне 0,4 кВ на ТП, номер которой определяется по формуле (7);

$A_k$  – ввод в работу отключившейся ячейки на РП.

Все блоки действия связаны с предикатными блоками, которые фиксируют окончание блока действия.

Алгоритм начинается с действия  $A_0$ . Переход из одного состояния в другое характеризуется операторами логики, отходящими от предикатных блоков. Верхний индекс оператора соответствует предикатному блоку, а нижний определяет порядковый номер оператора, отходящего от заданного блока (0,1,2,3 и т.д.). Разработанный алгоритм локализации МКЗ, приведенный к виду двудольного графа, представлен на рисунке 3.

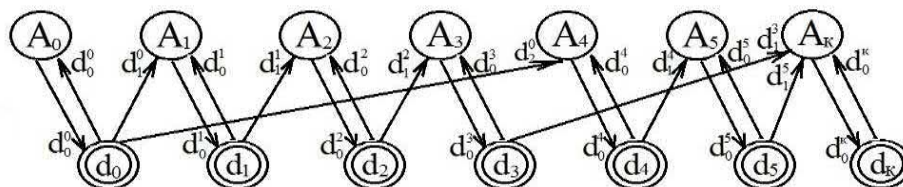


Рисунок 3 – Алгоритм локализации МКЗ в виде двудольного графа

Использование связанных блоков – блоков действия и предикатных блоков, позволяет представить алгоритм в матрично-предикатном виде (рисунок 4). При этом заданная матрица будет квадратной и обладать свойством неизменности: для описываемого процесса в матрице возможно произвести замену строки и столбца с одинаковыми номерами на соответствующую пару с другим номером. Использование свойства неизменности позволяет представить алгоритм в функционально-предикативной форме (рисунок 5).

$$M^A = \begin{matrix} \begin{matrix} A_0 d_0^0 A_0 & A_0 d_0^0 d_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_0 d_0^0 A_0 & d_0 d_0^0 d_0 & d_0 d_1^0 A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_0 d_2^0 A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_1 d_0^1 A_1 & A_1 d_1^1 d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_1 d_0^1 A_1 & d_1 d_1^1 d_1 & d_1 d_2^1 A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_2 d_0^2 A_2 & A_2 d_1^2 d_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_2 d_0^2 A_2 & d_2 d_1^2 d_2 & d_2 d_3^2 A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_3 d_0^3 A_3 & A_3 d_1^3 d_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_3 d_0^3 A_3 & d_3 d_1^3 d_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_3 d_5^3 A_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_4 d_0^4 A_4 & A_4 d_1^4 d_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_4 d_0^4 A_4 & d_4 d_1^4 d_4 & d_4 d_5^4 A_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 d_0^5 A_5 & A_5 d_1^5 d_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_5 d_0^5 A_5 & d_5 d_1^5 d_5 & d_5 d_k^5 A_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_k d_0^k A_k & A_k d_k^k d_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_k d_0^k A_k & d_k d_k^k d_k \end{matrix} \end{matrix}$$

Рисунок 4 – Алгоритм локализации МКЗ в матрично-предикатном виде

$$M^{A^*} = \begin{array}{c|cccccccc|cccccccc}
A_0 d_0^0 A_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_0 d_0^0 d_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & A_1 d_0^1 A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_1 d_0^1 d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & A_2 d_0^2 A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_2 d_0^2 d_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & A_3 d_0^3 A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_3 d_0^3 d_3 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & A_4 d_0^4 A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_4 d_0^4 d_4 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 d_0^5 A_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 d_0^5 d_5 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_k d_0^k A_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_k d_0^k d_k \\
\hline
d_0 d_0^0 A_0 & d_0 d_0^1 A_1 & 0 & 0 & d_0 d_0^2 A_2 & 0 & 0 & 0 & d_0 d_0^0 d_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & d_1 d_0^1 A_1 & d_1 d_1^1 A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_1 d_0^1 d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & d_2 d_0^2 A_2 & d_2 d_1^2 A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_2 d_0^2 d_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & d_3 d_0^3 A_3 & 0 & 0 & d_3 d_1^3 A_k & 0 & 0 & 0 & 0 & d_3 d_0^3 d_3 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & d_4 d_0^4 A_4 & d_4 d_1^4 A_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_4 d_0^4 d_4 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_5 d_0^5 A_5 & d_5 d_1^5 A_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_5 d_0^5 d_5 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_k d_0^k A_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_k d_0^k d_k
\end{array}$$

Рисунок 5 – Алгоритма локализации МКЗ в матрично-предикатном виде в функционально-предикативной форме

Для осуществления индикации поврежденного кабельного участка разработана модель герконового датчика короткого замыкания (рисунок 6). Постоянный магнит 2 создает поле подмагничивания геркона 3, увеличивающее его чувствительность. Регулировка чувствительности производится изменением расстояния между постоянным магнитом и герконом. Плата 1 имеет дугообразное отверстие для её закрепления на КЛ. При этом плоскость перемещения постоянного магнита должна быть перпендикулярна КЛ. При возникновении МКЗ по кабельной линии проходит ток короткого замыкания, который увеличивает магнитное поле вокруг поврежденных кабельных жил. Вследствие этого геркон срабатывает и замыкает сигнальную цепь. Результатом процесса замыкания геркона является срабатывание ДКЗ. Для «запоминания» сработавших контактов в состав датчика включается триггер-защелка 4.

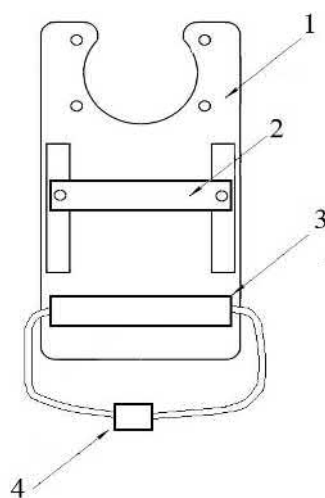


Рисунок 6 – Модель герконового датчика короткого замыкания  
1 – плата; 2 – постоянный магнит; 3 – геркон с двумя выводами; 4 – триггер-защелка

Выполненный технико-экономический анализ разработанной модели

герконового ДКЗ и других датчиков, используемых в распределительных сетях, позволил установить, что расчетная стоимость одного комплекта разработанной модели ДКЗ примерно в 3,8 раза меньше стоимости самого дешевого комплекта датчиков.

Разработана и описана МЛП при ОЗЗ в кабельных линиях 10 кВ в городских распределительных сетях. Эта методика состоит из следующих этапов.

1. Получение сведений о возникновении ОЗЗ.
2. Выполнение переключений по выявлению РП с ОЗЗ.
3. Определение на РП присоединения с ОЗЗ.
4. Выполнение переключений по восстановлению электроснабжения потребителей и локализации поврежденной кабельной линии.

Каждый этап методики содержит действия, выполняемые в строгой последовательности и требующие дополнительного разъяснения. Для этого разработанную МЛП ОЗЗ целесообразно представить в виде алгоритма, приведенного на рисунке 7.

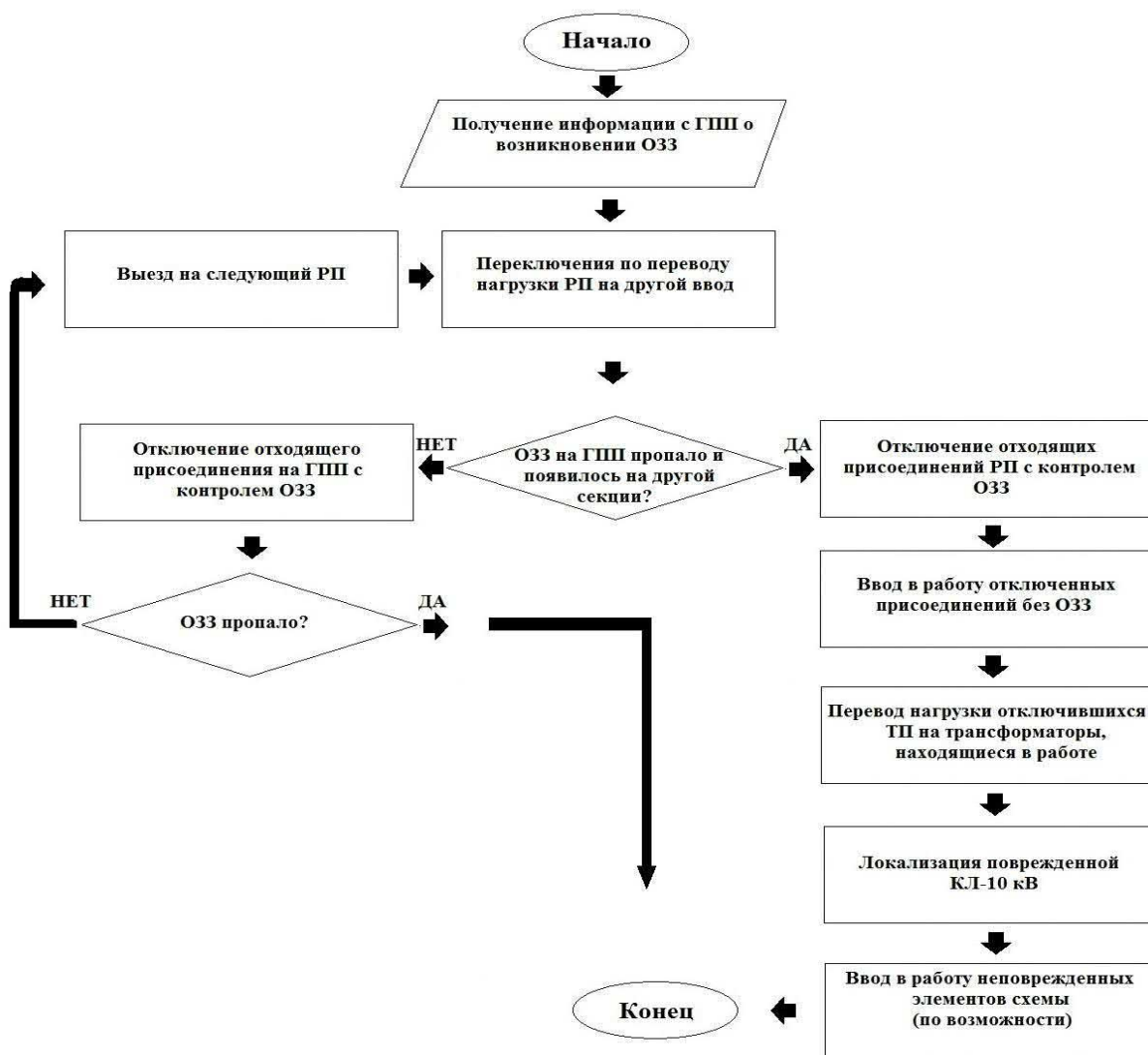


Рисунок 7 – Алгоритм локализации ОЗЗ с применением разработанной МЛП

Выполнено преобразование разработанного алгоритма МЛП ОЗЗ в графический и в матрично-предикатный вид. Граф-схема алгоритма состоит из блоков действия и предикатных блоков. Блоки действия соответствуют действиям, выполняемым в ходе локализации:

- $A_0$  – получение информации с ГПП о возникновении ОЗЗ;
- $A_1$  – переключения по переводу нагрузки РП на другой ввод;
- $A_2$  – отключение отходящих присоединений РП с контролем ОЗЗ;
- $A_3$  – ввод в работу отключившихся присоединений без ОЗЗ;
- $A_4$  – локализация поврежденной КЛ-10 кВ с вводом в работу

неповрежденных элементов схемы;

- $A_5$  – отключение отходящего присоединения на ГПП с контролем ОЗЗ;
- $A_6$  – локализация поврежденной КЛ-10 кВ;
- $A_7$  – ввод в работу отключенного присоединения на ГПП;
- $A_8$  – выезд на следующий РП;
- $A_k$  – конец алгоритма.

Предикатные блоки  $d_1$  и  $d_5$  являются условиями алгоритма (рисунок 7), возникающими после соответствующих им блоков действия:

- $d_1$  – ОЗЗ пропало и появилось на другой секции;
- $d_5$  – ОЗЗ пропало.

Остальные предикатные блоки фиксируют окончание операций, заданных в блоках действия. Двудольный граф разработанного алгоритма представлен на рисунке 8.

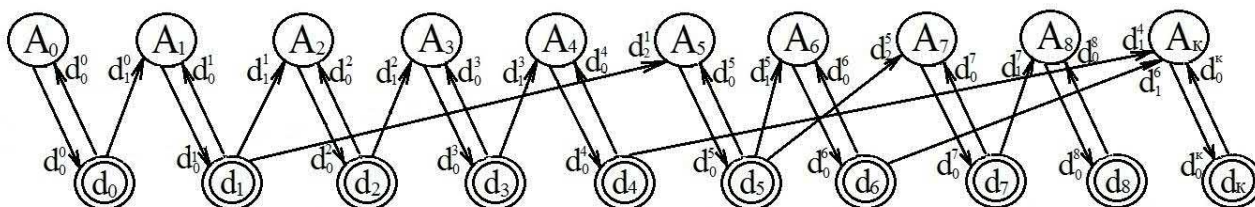


Рисунок 8 – Двудольный граф разработанного алгоритма локализации ОЗЗ

Задание разработанных алгоритмов мест повреждения МКЗ и ОЗЗ в матричной форме позволит их эффективно использовать при автоматизации процесса локализации повреждений КЛ. В этом случае следует учитывать управление положением коммутационных аппаратов, характеризующим выполнение каждого действия и порядковый номер подстанций, на которых производятся переключения. Соответственно, происходит параллельное взаимодействие двух процессов: локализация повреждения, управление состоянием коммутационных аппаратов. Для рассмотрения этого параллельного взаимодействия производится операция композиции с данными процессами, представленными в матричной форме.

Применение разработанного алгоритма локализации ОЗЗ не только ускоряет поиск замыкания на землю, но и позволяет производить его без отключения потребителей. Эти преимущества актуальны именно в городских условиях, так как даже кратковременные перерывы электроснабжения участка

жилого фонда являются негативными мероприятиями. Возрастание риска возникновения замыкания в другом месте сети во времени сопоставимо с продолжительностью поиска ОЗЗ методикой последовательного отключения. Здесь учитывается, что при использовании последовательного отключения, количество переключений возрастает, что может привести к выходу за установленный регламент по времени. Поэтому для обоснования разработанной МЛП ОЗЗ необходима диагностика перенапряжений, возникающих при переключениях во время замыкания на землю.

**В третьей главе** произведено имитационное моделирование двухсекционной распределительной сети, соответствующей участку городской распределительной кабельной сети 10 кВ, реализованное в программной среде MATLAB с пакетом расширения SIMULINK (рисунок 9).

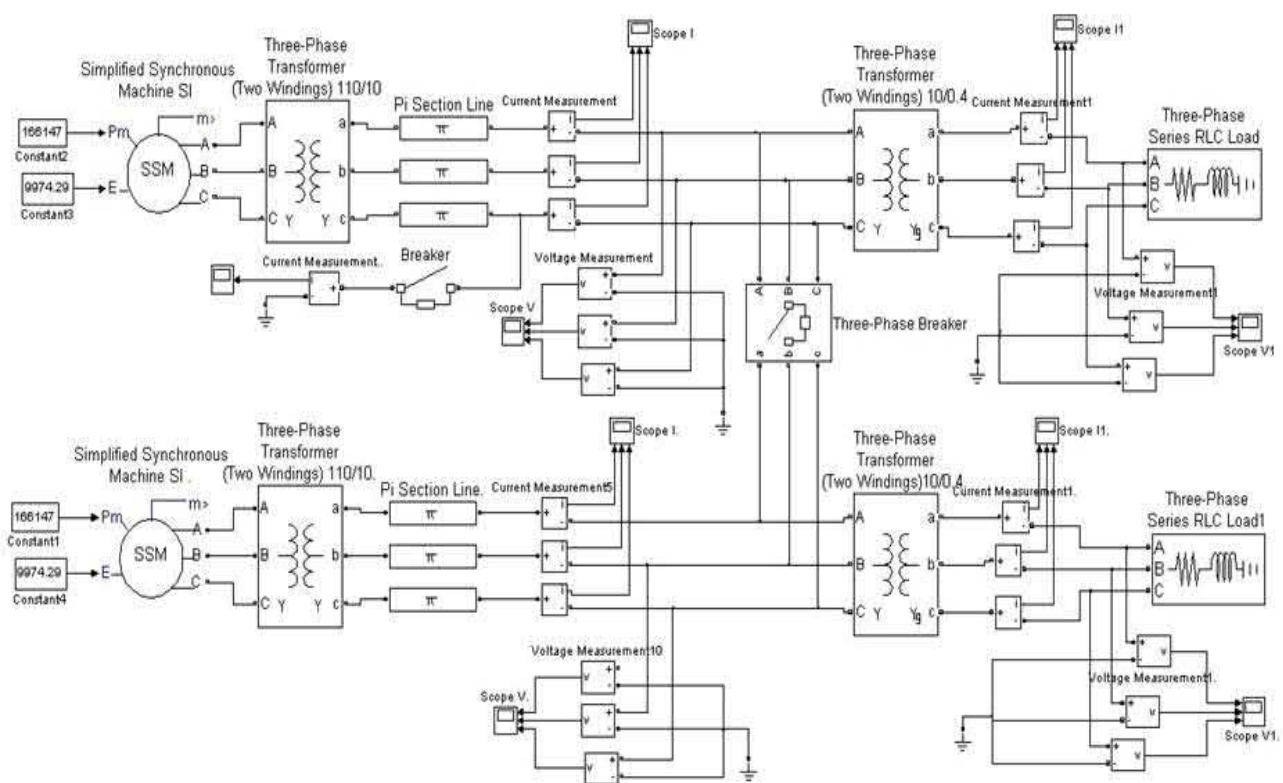


Рисунок 9 – Модель двухсекционной схемы с замыканием на землю

С помощью двухсекционной модели (рисунок 9) возможно исследовать перенапряжения, возникающие при переключениях во время ОЗЗ. До замыкания на землю две секции работают отдельно. В момент времени 0,1 с на 1-й секции сборных шин происходит замыкание на землю фазы «С», которое осуществляется с помощью однофазного ключа – Breaker. В результате этого напряжение поврежденной фазы «С» снижается до нуля, а в фазах «А» и «В» повышается до линейных значений (рисунок 10). Далее, согласно разработанной МЛП ОЗЗ (рисунок 7), производится перевод нагрузки на другой ввод. Для этого включается секционный выключатель, представленный блоком – Three-Phase Breaker, который замыкает обе секции на параллельную работу. Переключения производятся в наиболее опасный момент времени (0,2 с) при достижении

максимального амплитудного значения напряжения по фазе «В» (рисунок 10). При этом на неповрежденной 2-й секции возникает однофазное замыкание на землю, сопровождаемое смещением нейтрали. На 1-й секции замыкание на землю по-прежнему сохраняется.

Амплитуда напряжения в момент ОЗЗ достигает 20 кВ, а в момент включения секционного выключателя – 17 кВ (рисунок 10). Производимое в ходе моделирования изменение длины линии приводит к изменениям напряжений в момент замыкания. Соответствующая зависимость максимального амплитудного значения напряжения фазы «В» в момент ОЗЗ от длины КЛ-10 кВ приведена в таблице 2.

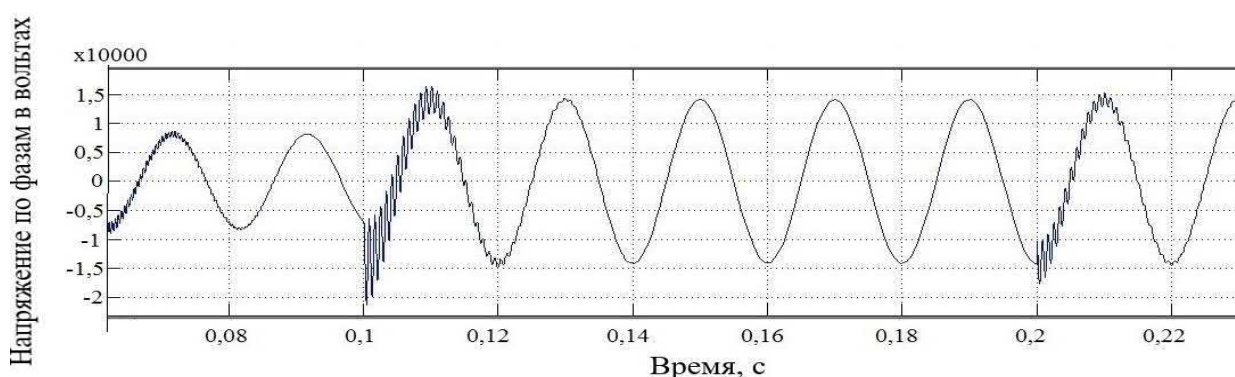


Рисунок 10 – Осциллограмма напряжений распределительной сети во время переключений при ОЗЗ

Таблица 2 – Максимальное амплитудное значение напряжения в зависимости от длины линии при моделировании ОЗЗ в сети 10 кВ

L, км	0,5	1	3
$U_{\text{макс.амп.фазы «В»}}$ , кВ (в момент ОЗЗ)	21	20	19
$U_{\text{макс.амп.фазы «В»}}$ , кВ (в момент включения секционного выключателя)	17,7	17	16

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что значения перенапряжений, возникающих при переключениях в ходе локализации однофазного замыкания на землю, не превышают значения перенапряжений, сопровождающих появление однофазного замыкания на землю.

Результаты численного эксперимента достаточно хорошо совпадают с результатами, полученными в АО «ССК» Ставропольские электрические сети при ликвидации ОЗЗ, возникшего в КЛ-10 кВ между ТП-1614 яч.1 и ТП-1609 яч.1. Погрешность составила 5-7 %.

**В четвертой главе** выполнено обоснование применения разработанных методик путём сравнения количества заходов в электроустановки и количества необходимых переключений.

В первой главе было определено количество заходов в электроустановки и количество переключений, необходимых для восстановления электроснабжения потребителей и локализации МКЗ в КЛ-10 кВ с помощью действующей МЛП. Данные значения получены при рассмотрении условного участка городской

распределительной сети, состоящего из двух РП, от которых отходят по две цепочки ТП (по четыре ТП в цепочке). По формуле (1) было рассчитано время выполнения соответствующих действий.

В четвертой главе данные параметры были определены при использовании разработанной МЛП при МКЗ в КЛ-10 кВ. Расчетные время локализации и время восстановления электроснабжения потребителей при применении действующей и разработанной МЛП сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Расчетное время локализации и восстановления электроснабжения потребителей

Расчетные параметры	Действующая МЛП	Разработанная МЛП с применением ДКЗ
Время восстановления электроснабжения	51 мин.	46 мин.
Время локализации	79 мин.	
Общее время	130 мин.	

Установлено, что применение разработанной МЛП значительно сокращает не только время восстановления электроснабжения потребителей, но и общее время локализации возникшего МКЗ. Для рассматриваемой схемы было определено общее время локализации МКЗ для каждой КЛ-10 кВ в цепочке ТП. Наименьшее общее время локализации МКЗ при применении разработанной МЛП составило 31 минуту.

Исходя из рассчитанного времени восстановления электроснабжения потребителей определен недоотпуск электроэнергии. Например, при допущении равенства мощности трансформаторов ТП недоотпуск электроэнергии, возникающий при аварийном отключении цепочки подстанций, определяется как:

$$\Delta W = P_{нагр.} \cdot n_{ТП} \cdot t_{восст.эл.снаб.}, \quad (8)$$

где  $n_{ТП}$  – количество ТП, попавших под отключение.

Если принять мощность трансформаторов всех ТП  $S_n=630$  кВА, а коэффициент активной мощности  $\cos\varphi=0,8$ , недоотпуск электроэнергии при применении используемой МЛП составит 857 кВт·ч, а при применении разработанной МЛП – 521 кВт·ч, то есть снизится примерно в 1,6 раза. Выбранное значение мощности трансформаторов и коэффициента активной мощности приняты на основании данных эксплуатации городских распределительных сетей АО «ССК».

Выполнен анализ возможного снижения времени локализации ОЗЗ с применением разработанной методики. Рассмотрены варианты локализации повреждения в сети с двумя РП и двумя отходящими от него присоединениями (вариант 1); с тремя РП и тремя отходящими от него присоединениями (вариант 2). Результаты выполненного анализа приведены на рисунке 11. Показано, что экономия времени при использовании разработанной МЛП ОЗЗ возможна при увеличении количества РП и ТП: выигрыш во времени имеет место при количестве отходящих присоединений на ГПП и на РП больше двух. Дальнейшее



увеличение количества отходящих присоединений приведет к ещё большему снижению времени локализации ОЗЗ при применении разработанной методики локализации повреждений.

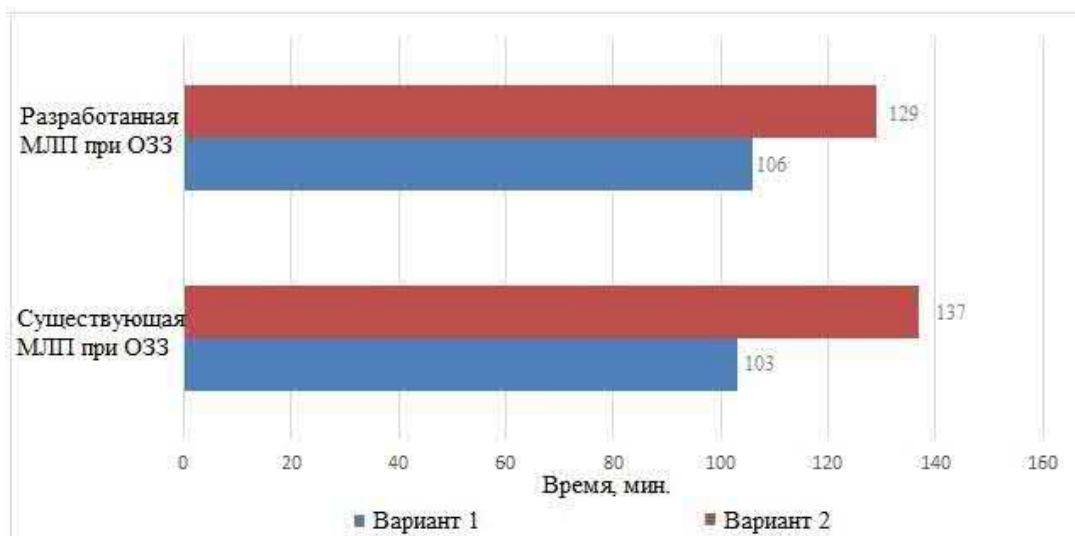


Рисунок 11 – Диаграмма времени локализации ОЗЗ при применении действующей и разработанной МЛП ОЗЗ

Выполнен анализ количества электроустановок, попавших под отключение при применении действующей МЛП ОЗЗ и разработанной МЛП ОЗЗ. Результаты выполненного анализа приведены на рисунке 12. Получено, что при использовании разработанной МЛП ОЗЗ происходит уменьшение количества ТП, попавших под отключение.

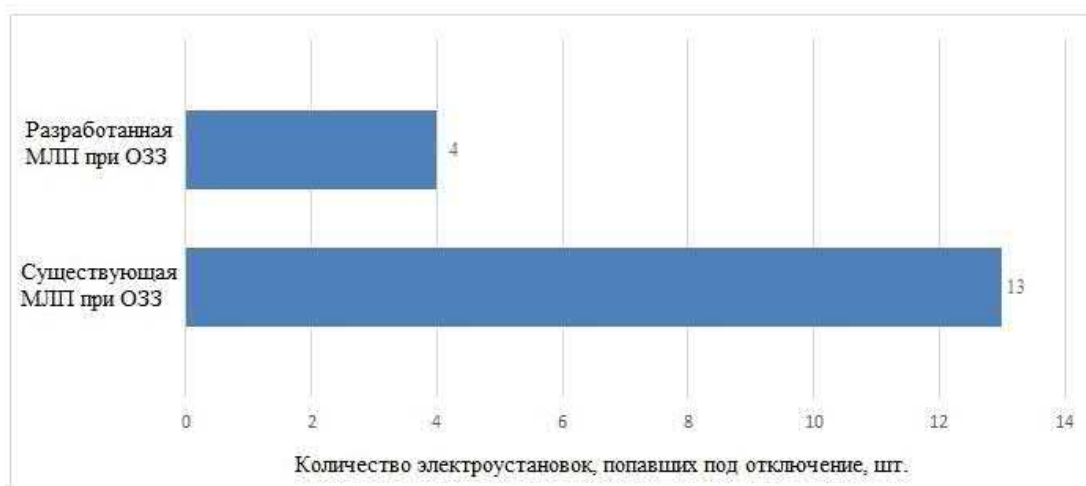


Рисунок 12 – Диаграмма количества электроустановок, попавших под отключение

Показано, что при необходимости возможно полностью исключить перерывы электроснабжения потребителей в ходе поиска ОЗЗ. Для этого, после выявления ОЗЗ необходимо переключиться на другие трансформаторы. Тогда количество переключений будет несколько увеличено, а время локализации ОЗЗ будет более 2 часов. Поэтому для использования данного алгоритма переключений должны быть заданы допустимое время работы дугогасящего

реактора и количество ответственных потребителей.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационном исследовании решена важная научно-техническая задача – разработаны методики локализации повреждений в кабельных линиях 10 кВ при эксплуатации городских распределительных сетей и получены следующие основные результаты.

1. Разработана МЛП при МКЗ в кабельных линиях 10 кВ с применением датчиков короткого замыкания. В изложенной методике представлен алгоритм действий оперативного персонала для распределительной сети с двухлучевой конфигурацией схемы. При сравнении действующей МЛП МКЗ с разработанной МЛП МКЗ было показано сокращение расчетного времени локализации с 51 минуты до 31 минуты. Расчетный недоотпуск электроэнергии сократился с 857 кВт·ч до 521 кВт·ч.

2. Разработана модель герконового датчика короткого замыкания для городских кабельных сетей 10 кВ. Техничко-экономический анализ позволяет констатировать, что расчетная стоимость одного комплекта разработанной модели датчика короткого замыкания в 3,8 раза меньше стоимости самого дешевого комплекта датчиков.

3. Разработана МЛП при ОЗЗ в кабельных линиях 10 кВ с применением последовательного деления и перегруппирования сети на участки. В методике рассмотрен алгоритм действий оперативного персонала при поиске ОЗЗ в распределительной сети 10 кВ с двухлучевой конфигурацией схемы. При сравнении действующей МЛП ОЗЗ с разработанной МЛП ОЗЗ было показано сокращение расчетного времени локализации со 137 минут до 129 минут, а количество ТП, попавших под отключение, сократилось с 13 шт. до 4 шт.

4. Проведен вычислительный эксперимент по анализу перенапряжений, вызванных переключениями в сетях 10 кВ при локализации ОЗЗ. Установлено, что перенапряжения, сопровождающие переключения в сети 10 кВ во время ОЗЗ, не превышают перенапряжений, возникающих в момент появления ОЗЗ. Полученное в результате моделирования значение перенапряжения в момент замыкания на землю в фазе, где оно имело максимальное амплитудное значение, составило 20 кВ.

5. Предложенные научно-технические решения вошли в устойчивую практику АО «ССК» и применяются при оперативном обслуживании городских распределительных сетей 10 кВ. Разработанная МЛП при ОЗЗ в кабельных линиях 10 кВ в городских распределительных сетях позволяет не только ускорить процесс локализации, но и ограничить кратковременные отключения потребителей, выполняемые в ходе поиска замыкания на землю (Справка о внедрении АО «ССК»). Основным достоинством разработанных методик является сокращение времени локализации повреждений КЛ-10 кВ при эксплуатации ЭТК городских распределительных сетей. Кроме того, использование разработанной МЛП ОЗЗ позволяет значительно ограничить нежелательные кратковременные отключения потребителей.

Дальнейшая работа по данной области исследования просматривается в направлении автоматизации процесса локализации повреждений, возникающих в городских распределительных кабельных сетях 10 кВ. Это направление может быть оправдано более быстрой локализацией и снижением опасного производственного фактора на обслуживающий оперативный персонал.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### Перечень работ, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. **Андреев, А.А.** Анализ существующих разновидностей защит от однофазных замыканий на землю и условия их применения / **А.А. Андреев** // Вестник СамГТУ. Технические науки.-2021. №4. С. 56-70.
2. **Андреев, А.А.** Исследование переходного процесса в электрических сетях с компенсированной нейтралью при их параллельной работе с замыканием на землю / **А.А. Андреев** // Вопросы электротехнологии.-2021. №3(32). С.81-90.
3. **Андреев, А.А.** Моделирование переходного процесса в распределительной сети 10 кВ при однофазном замыкании на землю / **А.А. Андреев** // Электротехнические и информационные комплексы и системы.-2022. №2. С. 5-12.
4. **Андреев, А.А.** Определение поврежденных присоединений при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях с компенсированной нейтралью / **А.А. Андреев** // Энергетик.-2021. №9. С.44-47.
5. **Андреев, А.А.** Перспективные способы обнаружения однофазных замыканий в сетях с изолированной нейтралью / **А.А. Андреев** // Электроника и электрооборудование транспорта.-2019. №3. С.34-35.

### Зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности

1. Пат. 215817 Российская Федерация, МПК Н02Н 7/26. Датчик короткого замыкания для кабельных линий / **Андреев А.А.**; заявитель и патентообладатель Андреев А.А. - № 2022103006; заявл. – 07.02.2022; опубл. 28.12.2022. Бюл. №1.

### Другие наиболее значимые публикации

1. **Андреев, А.А.** Анализ преимуществ датчиков короткого замыкания при повреждении кабельных линий 10 кВ в городских распределительных сетях / **А. А. Андреев** // Федоровские чтения – 2021: сборник трудов LI Международной научно-практической конференции / под общ. ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. М.: Изд. Дом МЭИ, 2021. С.159-162.
2. **Андреев, А.А.** Анализ преимуществ датчиков короткого замыкания при повреждении кабельных линий в распределительных сетях среднего напряжения / **А.А. Андреев** // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты. Сборник трудов международной научно-практической конференции. Казань: Изд-во КГЭУ, 2022. С. 57-61.
3. **Андреев, А.А.** Диагностика однофазных замыканий на землю в кабельных линиях 10 кВ при объединении секций на параллельную работу / **А.А. Андреев** // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники:

сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции. Казань: Изд-во КГЭУ, 2021. С.15-19.

4. **Андреев, А.А.** Определение замыканий на землю в кабельных линиях в сетях с изолированной нейтралью / **А.А. Андреев** // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции. Казань: Изд-во КГЭУ, 2020. С.9-14.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол №17 от «31» октября 2023 г.)

Заказ №\_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.