

На правах рукописи



Сидоров Сергей Владимирович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Научный руководитель: **Сушков Валерий Валентинович**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры электроэнергетики

Официальные оппоненты: **Гольдштейн Валерий Геннадьевич,**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
технический университет», кафедра
«Автоматизированные электроэнергетические
системы», профессор;

Обухов Сергей Геннадьевич,
доктор технических наук, доцент, федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», отделение
электроэнергетики и электротехники
Инженерной школы энергетики, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Югорский государственный
университет», г. Ханты-Мансийск

Защита диссертации состоится «17» января 2024 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.04, созданного на базе Омского государственного технического университета, по адресу: 644050, Сибирский федеральный округ, Омская область, г. Омск, проспект Мира, д. 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» и на сайте <https://omgtu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук

Гиршин Станислав Сергеевич

Актуальность темы. Возникновение ненормальных и аварийных режимов работы электрических сетей является одной из основных причин ухудшения показателей качества электрической энергии. Повреждения воздушных линий электропередачи обусловлены перенапряжениями, гололёдными образованиями, ветровой нагрузкой, механическими воздействиями и прочими факторами, которые способны привести к развитию различных видов коротких замыканий и обрыву проводов. В электрических сетях с изолированной нейтралью основным видом повреждения воздушной линии является возникновение однофазных замыканий на землю, доля которых, согласно опыту эксплуатации и различным экспертным оценкам, составляет до 70 % от общего количества повреждений.

Научные исследования и практические работы, направленные на повышение надёжности электрических сетей с изолированной нейтралью, достоверности их диагностирования, увеличение точности определения места повреждения, совершенствование математического описания электромагнитных процессов в воздушных линиях с учётом свойств грунта, ведутся уже продолжительное время многими отечественными и зарубежными учёными: В. Бёк, Р. А. Вайнштейн, В. Г. Гольдштейн, В. Н. Горюнов, Е. Куффель, Ф. А. Лихачев, Р. Г. Минуллин, В. А. Ощепков, А. А. Пухальский, В. В. Сушков, А. И. Федотов, Ф. Х. Халилов, М. А. Шабад, А. И. Шалин, Г. М. Шалыт, А. Е. Emanuel, М. Е. Valdes и другими.

Несмотря на широко проводимые исследования, применяемые в настоящее время методы диагностирования электрических сетей с изолированной нейтралью и методики локализации однофазного замыкания на землю практически не учитывают конструктивные особенности эксплуатируемых воздушных линий электропередачи и природно-климатические факторы, влияющие на достоверность расчёта расстояния до места повреждения. Методики, как правило, ориентированы на устоявшиеся средства релейной защиты, тогда как применение технологии цифровых подстанций позволяет оперировать большим количеством данных, что обеспечивает более эффективную работу энергосистемы в целом.

Согласно технологии «Цифровой подстанции» микропроцессорные устройства релейной защиты фиксируют измеряемые напряжения и токи в векторной форме, а также ведут протоколы срабатывания встроенных защит, ненормальных и аварийных режимов, образуя единую информационно-измерительную систему, которая может быть напрямую использована в устройствах диагностирования однофазного замыкания на землю и определения расстояния до места повреждения воздушной линии электропередачи в условиях сложной топологии электрической сети и иных факторов, осложняющих обнаружение и локализацию повреждения.

Таким образом, решение проблемы повышения надёжности электрических сетей с изолированной нейтралью путём диагностирования однофазных замыканий на землю и определения расстояния до места повреждения воздушной линии электропередачи является актуальной научно-технической задачей.

Объектом исследования является электрическая сеть напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью.

Предметом исследования является способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью.

Цель диссертационной работы – снижение времени поиска места однофазного замыкания на землю воздушной линии электропередачи с изолированной нейтралью.

Основные задачи исследования:

1. Проанализировать аварийные отключения электрических сетей напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью и применение микропроцессорных средств для диагностирования однофазных замыканий на землю воздушных линий электропередачи.

2. Провести математическое моделирование однофазных замыканий на землю и обрывов воздушной линии в различных точках фидера древовидной структуры и установить закономерности между электрическими параметрами и местом повреждения линии.

3. Разработать способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью с учётом конструктивных особенностей и природно-климатических факторов. Провести испытания способа определения места однофазного замыкания на землю на лабораторном стенде и действующей электрической сети напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью.

4. Разработать программное обеспечение по определению места повреждения воздушной линии электропередачи напряжением 6(10) кВ с учётом её конструктивных особенностей и природно-климатических факторов.

Методы исследования. В процессе исследования поставленных задач применялись положения теоретических основ электротехники, методы математического анализа, математического моделирования схем электроснабжения.

Научная новизна. В качестве основных результатов, имеющих научную новизну:

1. Установлены закономерности между величинами обратной последовательности напряжений на трансформаторных подстанциях и повреждённым фидером, что позволяет сократить время поиска места повреждения воздушной линии электропередачи и снизить экономические потери.

2. Разработан способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью, отличающийся тем, что проводится распознавание повреждённого фидера, а затем уточняется расстояние до места возникновения повреждения с учётом конструктивных особенностей линии и природно-климатических факторов, что позволяет существенно сократить время поиска места повреждения и повысить технико-экономические показатели электроснабжения.

3. Уточнены выражения расчёта первичных параметров воздушной линии электропередачи, отличающиеся тем, что поправочные интегралы Карсона заменены на эмпирические коэффициенты, учитывающие природно-климатические факторы и конструктивные параметры линии, что позволяет сузить область поиска места однофазного замыкания на землю.

Практическая ценность результатов.

В результате проведённых исследований получен патент на изобретение (№ 2798941) и реализовано программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021617190), позволяющие определять место повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ с учётом конструктивных особенностей и природно-климатических факторов. Результаты диссертационной работы внедрены в процесс проведения диагностических испытаний воздушных линий распределительной сети АО «СУЭНКО», применяются при подготовке обучающихся по направлениям 13.03.02 «Электроэнергетика и

электротехника» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности между величинами напряжения обратной последовательности трансформаторных подстанций и повреждённым фидером воздушной линии электропередачи, позволяющие впоследствии вдоль него определить расстояние до места повреждения.

2. Зависимости между природно-климатическими факторами и значениями первичных параметров схемы замещения воздушной линии электропередачи, позволяющие повысить точность определения величины её резонансной частоты.

3. Способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью, позволяющий существенно сократить время поиска места повреждения и, следовательно, сократить время восстановления линии и улучшить технико-экономические показатели работы электроприемников.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность результатов исследования подтверждается путём сравнения результатов математического моделирования и экспериментального определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрической сети напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на следующих научных мероприятиях: Международная научно-практическая конференция молодых исследователей им. Д.И. Менделеева, посвящённая 10-летию института промышленных технологий и инжиниринга (Тюмень, 2018 г.); Национальная с международным участием научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе», посвящённая 10-летию института промышленных технологий и инжиниринга (Тюмень, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Новые технологии – нефтегазовому региону» (Тюмень, 2019 г.); 73-я Международная молодёжная научная конференция «Нефть и газ – 2019» (Москва, 2019 г.); Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные энергетические системы» (Казань, 2019 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 12 печатных работах, из них 2 – статьи в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 2 работы в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, получен патент на изобретение, зарегистрирована программа для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Личный вклад соискателя состоит в постановке и реализации задач исследования, сборе и обработке статистических данных, формулировке основных положений научной новизны и практической значимости, разработке математической модели участка электрической сети, выполнении математического анализа результатов расчёта и натурных экспериментов, создании способа определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью с учётом её конструктивных особенностей и природно-климатических факторов; внедрении полученных результатов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности:

Рассматриваемая область исследования методов диагностирования однофазных замыканий на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью соответствует паспорту специальности 2.4.3. Электроэнергетика, а именно: п.8 «Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях», п.11 «Разработка методов мониторинга и анализа режимных параметров основного оборудования электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав основного текста, заключения, списка использованных источников, включающего 109 наименований, в том числе 18 иностранных. Диссертация изложена на 123 страницах машинописного текста, включает 43 рисунка, 13 таблиц, 5 приложений на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, обозначены основные положения, выносимые на защиту, отражены научная новизна и практическая значимость результатов исследования.

Первая глава посвящена анализу аварийных отключений электрических распределительных сетей. Установлено следующее распределение причин повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ: 42 % составляют атмосферные перенапряжения, 12 % связаны с изменением свойств грунта, 11 % – с коммутационными перенапряжениями, по 9 % – гололёдные образования и пляска проводов, 7 % – с ветровой нагрузкой; доля повреждений, связанных с температурными условиями, вибрационной нагрузкой и составом воздуха не превышает одного процента; выполнена оценка влияния атмосферных и внутренних перенапряжений на ресурс высоковольтных выключателей и изоляции погружных электродвигателей.

В результате оценки эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи в электрических сетях напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью установлено, что переход на обслуживание по техническому состоянию воздушных линий электропередачи позволит снизить продолжительность восстановления и повысить эффективность технического обслуживания на 11 %.

В результате анализа принципов и способов определения места повреждения с применением микропроцессорных устройств и анализа литературных источников по диагностированию воздушных линий электропередачи установлено:

1. В большинстве случаев в процессе определения места повреждения используются указанные в конструкторской документации параметры воздушной линии электропередачи без учёта изменения параметров проводов, линейной изоляции и опор воздушной линии электропередачи в процессе эксплуатации. Подавляющее большинство способов определения места повреждения не учитывает реальную характеристику переходного сопротивления в месте возникновения повреждения; не учитывает конструктивные особенности опор, линейной изоляции воздушной линии электропередачи и влияние природно-климатических факторов на первичные параметры воздушной линии электропередачи.

2. За исключением волновых методов определения места повреждения не учитываются отражения электромагнитной волны в воздушной линии электропередачи. Не учитывается затухание локационных импульсов при определении места повреждения воздушной линии электропередачи.

Во второй главе разработана методика идентификации повреждённого фидера электрической сети с изолированной нейтралью, на котором произошло однофазное замыкание на землю вследствие перекрытия линейной изоляции либо обрыва провода линии с образованием замыкания на землю.

Известно, что вследствие возникновения однофазного замыкания на землю воздушной линии, напряжение на электрооборудовании системы электроснабжения становится несимметричным, несмотря на наличие установленных симметричных источников питания и симметричных потребителей. Согласно методу симметричных составляющих, несимметричную трёхфазную систему напряжений возможно разложить на эквивалентную сумму симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей чередования фаз. Напряжение обратной последовательности определяется линейными (продольными) индуктивностями линии, которые зависят исключительно от геометрических размеров петель, образованных линейными проводами воздушной линии, что, следовательно, позволяет установить закономерности между величинами обратной последовательности напряжений на трансформаторных подстанциях и повреждённым фидером. С целью выявления таких закономерностей разработана схема замещения электрической сети напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью, приведённая на рисунке 1.

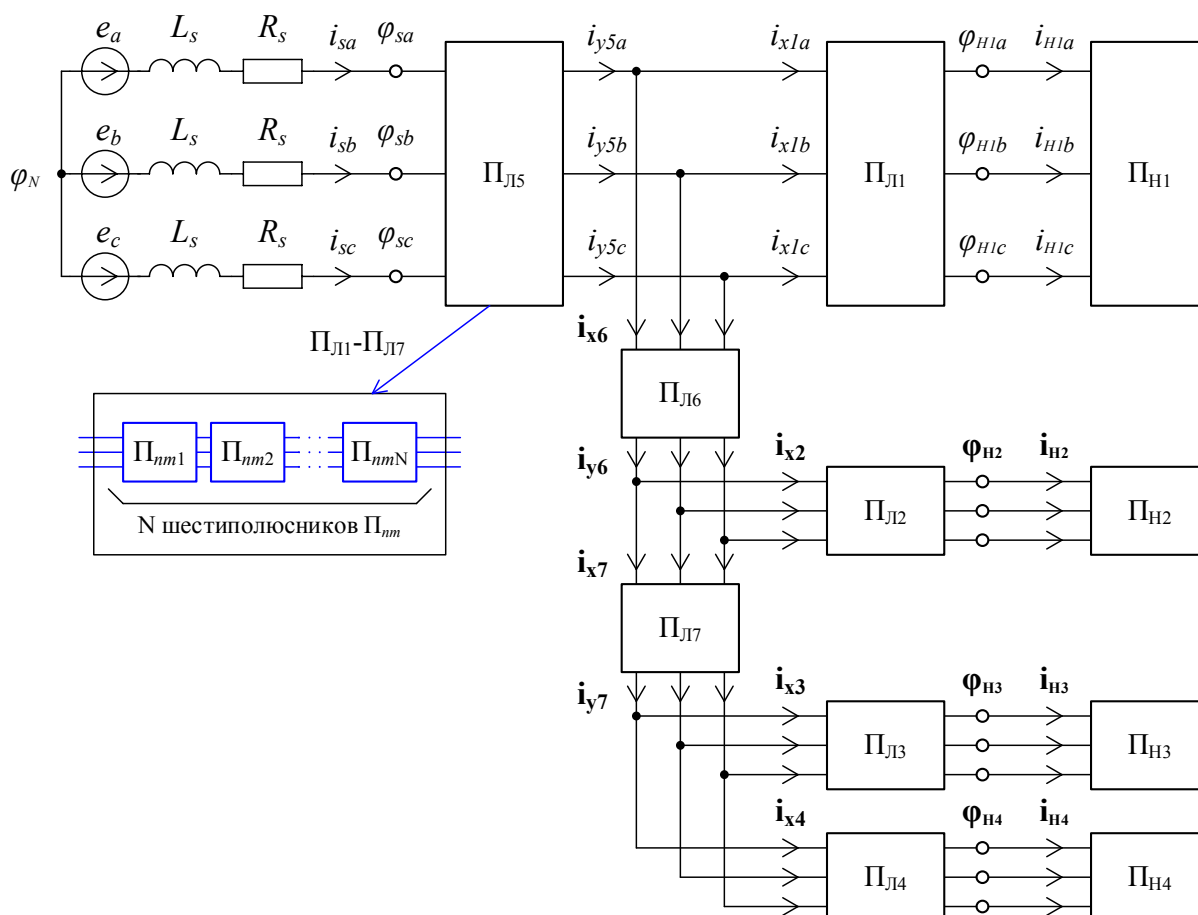


Рисунок 1 – Схема замещения электрической сети с изолированной нейтралью

Схема замещения электрической сети напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью состоит из трёхфазного симметричного источника напряжения, воздушных линий электропередачи, представленных шестиполюсниками $\Pi_{Л1}$ - $\Pi_{Л7}$, и трёхполюсников нагрузки $\Pi_{Н1}$ - $\Pi_{Н3}$.

Каждый шестиполюсник $\Pi_{Л1}$ - $\Pi_{Л7}$ является цепной схемой из шестиполюсников Π_{nm} , количество N которых определяется исходя из условия:

$$N \geq 8 \cdot l \cdot f_{\max} / v_{\phi}, \quad (1)$$

где l – длина воздушной линии; f_{\max} , v_{ϕ} – максимальная частота и фазовая скорость волны соответственно.

Схема замещения шестиполюсника Π_{nm} приведена на рисунке 2.

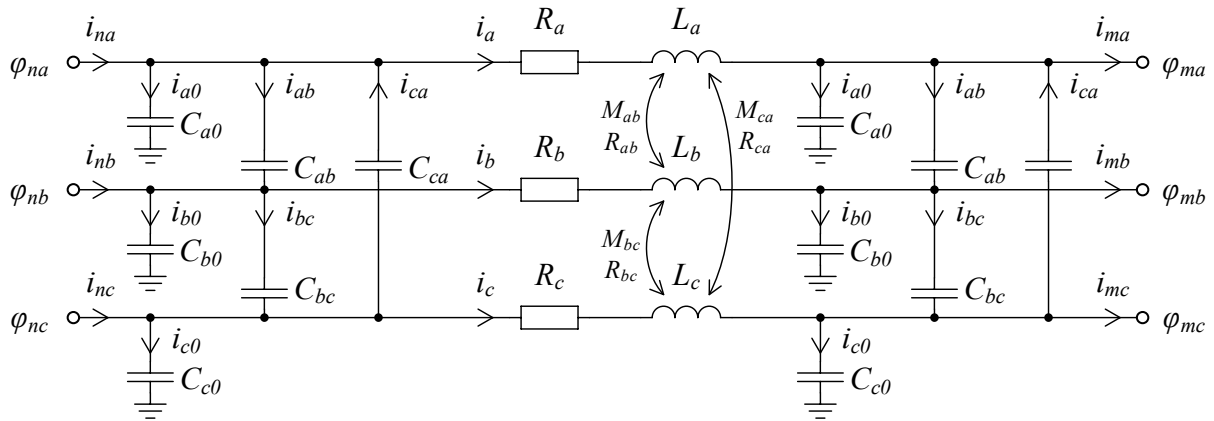


Рисунок 2 – Схема замещения шестиполюсника Π_{nm} в составе цепной схемы шестиполюсников $\Pi_{Л1}$ - $\Pi_{Л7}$

Математическая модель шестиполюсника Π_{nm} в составе цепной схемы шестиполюсников $\Pi_{Л1}$ - $\Pi_{Л7}$, составленная по законам Кирхгофа и Ома, имеет вид:

$$\begin{cases} \Phi_n - \Phi_m = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{L} \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{i}; \\ \mathbf{i}_n - \mathbf{i} = \mathbf{C} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_n; \\ \mathbf{i} - \mathbf{i}_m = \mathbf{C} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_m, \end{cases} \quad (2)$$

где \mathbf{R} , \mathbf{L} , \mathbf{C} – матрицы активных сопротивлений, индуктивностей и ёмкостей воздушной линии электропередачи соответственно, \mathbf{i} , \mathbf{i}_n , \mathbf{i}_m – матрицы продольных токов, входных и выходных токов шестиполюсника соответственно, Φ_n , Φ_m – матрицы входных и выходных потенциалов шестиполюсника соответственно:

$$\Phi_n = \begin{bmatrix} \varphi_{na} \\ \varphi_{nb} \\ \varphi_{nc} \end{bmatrix}; \quad \Phi_m = \begin{bmatrix} \varphi_{ma} \\ \varphi_{mb} \\ \varphi_{mc} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_a & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_b & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \mathbf{i}_n = \begin{bmatrix} i_{na} \\ i_{nb} \\ i_{nc} \end{bmatrix}; \mathbf{i}_m = \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{mc} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{a0} + C_{ab} + C_{ac} & -C_{ab} & -C_{ca} \\ -C_{ba} & C_{b0} + C_{ba} + C_{bc} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{c0} + C_{ca} + C_{cb} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Математическая модель трёхфазного источника напряжения имеет вид:

$$\mathbf{e} + \boldsymbol{\varphi}_N - \boldsymbol{\varphi}_s = R_s \cdot \mathbf{i}_s + L_s \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s, \quad (5)$$

где \mathbf{e} , $\boldsymbol{\varphi}_s$, \mathbf{i}_s – матрицы ЭДС, выходных потенциалов и токов источника напряжения соответственно.

Математическая модель трёхполюсников $\Pi_{Н1}$ - $\Pi_{Н3}$ трёхфазной симметричной активно-индуктивной нагрузки с соединением фаз «звездой» имеет вид:

$$\boldsymbol{\varphi}_H - \boldsymbol{\varphi}_{N'} = R_H \cdot \mathbf{i}_H + L_H \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{i}_H, \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\varphi}_H$, \mathbf{i}_H , $\boldsymbol{\varphi}_{N'}$ – матрицы входных потенциалов и токов трёхполюсников нагрузки, матрица потенциалов нулевой точки нагрузки соответственно.

Распределение токов в месте подключения каждой отходящей воздушной линии электропередачи описывается в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$\mathbf{i}_{y5} - \mathbf{i}_{x1} - \mathbf{i}_{x6} = 0; \mathbf{i}_{y6} - \mathbf{i}_{x2} - \mathbf{i}_{x7} = 0; \mathbf{i}_{y7} - \mathbf{i}_{x3} - \mathbf{i}_{x4} = 0, \quad (7)$$

где \mathbf{i}_x , \mathbf{i}_y – векторы-столбцы фазных токов на входе и выходе соответствующих шестиполусников $\Pi_{Л1}$ - $\Pi_{Л7}$.

В разработанной математической модели электрической сети с изолированной нейтралью:

1. Однофазное замыкание на землю вследствие перекрытия линейной изоляции задают условием равенства нулю потенциала, соответствующего повреждённой фазе воздушной линии электропередачи, в матрице $\boldsymbol{\varphi}_n$ либо $\boldsymbol{\varphi}_m$.

2. При обрыве провода воздушной линии электропередачи с образованием однофазного замыкания на землю в дополнение к предыдущему условию задают равенство нулю тока повреждённой фазы в матрице \mathbf{i} .

3. Начальные условия рассчитываются численными методами по установившемуся режиму перед возникновением повреждения воздушной линии электропередачи.

4. Переходные процессы после возникновения повреждения (коммутации) воздушной линии электропередачи рассчитываются численными методами, например, методами Эйлера или Рунге-Кутта.

На основе анализа результатов численного решения математической модели электрической сети с изолированной нейтралью – уравнений (1)-(7) – установлены закономерности между величинами обратной последовательности напряжений на трансформаторных подстанциях и ответвлением воздушной линии электропередачи (фидером), на котором произошло однофазное замыкание на землю вследствие перекрытия линейной изоляции либо обрыва провода линии с образованием замыкания на землю:

1. При повреждении магистрали электрической сети на всех трансформаторных подстанциях, подключённых до места повреждения, напряжения обратной последовательности значительно ниже, чем на подстанциях за местом повреждения.

2. При повреждении отходящей воздушной линии электропередачи наибольшее напряжение обратной последовательности соответствует подстанции, подключённой к повреждённой линии.

3. При повреждении отходящей воздушной линии электропередачи величина напряжения обратной последовательности прямо пропорциональна расстоянию от трансформаторной подстанции до места возникновения повреждения.

В результате, разработана методика идентификации повреждённого участка воздушной линии электропередачи, на котором произошло однофазное замыкание на землю вследствие перекрытия линейной изоляции либо обрыва провода линии с образованием замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью на основе сопоставления напряжений обратной последовательности на трансформаторных подстанциях:

1. С помощью цифровых приборов контроля качества и учёта электроэнергии в составе современных трансформаторных подстанций измеряют с привязкой ко времени мгновенные значения фазных напряжений на каждой подстанции.

2. На основе результатов измерений вычисляют величины напряжений обратной последовательности фазных напряжений на каждой трансформаторной подстанции.

3. Устанавливают повреждённый участок воздушной линии электропередачи на основе изложенных выше закономерностей между величинами обратной последовательности фазных напряжений трансформаторных подстанций и местом возникновения повреждения.

Разработанная методика идентификации повреждённого участка воздушной линии электропередачи применима для радиальной и древовидной структуры фидера.

Внедрение разработанной методики и практическое применение установленных закономерностей в микропроцессорных устройствах релейной защиты путём модификации программного обеспечения с учётом возможностей установленных контрольно-измерительных средств позволит локализовать поиск места повреждения воздушной линии электропередачи вблизи подстанции с наивысшим уровнем напряжения обратной последовательности, сократить время поиска места повреждения на 10 %-30 % (в зависимости от условий поиска) и этим снизить экономические потери.

В третьей главе разработан способ и алгоритм определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью с учётом конструктивных особенностей и природно-климатических факторов; выполнен анализ природно-климатических факторов, влияющих на первичные параметры воздушной линии электропередачи; уточнена методика поиска места повреждения линии; проведена проверка разработанной методики на математической модели электрической сети с изолированной нейтралью.

В соответствии с методом зеркальных изображений, расчётная схема трёхфазной воздушной линии электропередачи изображена на рисунке 3. Расстояния между проводами и поверхностью земли определяются параметрами опоры. Формулы расчёта первичных параметров воздушной линии электропередачи сведены в таблицу 1.

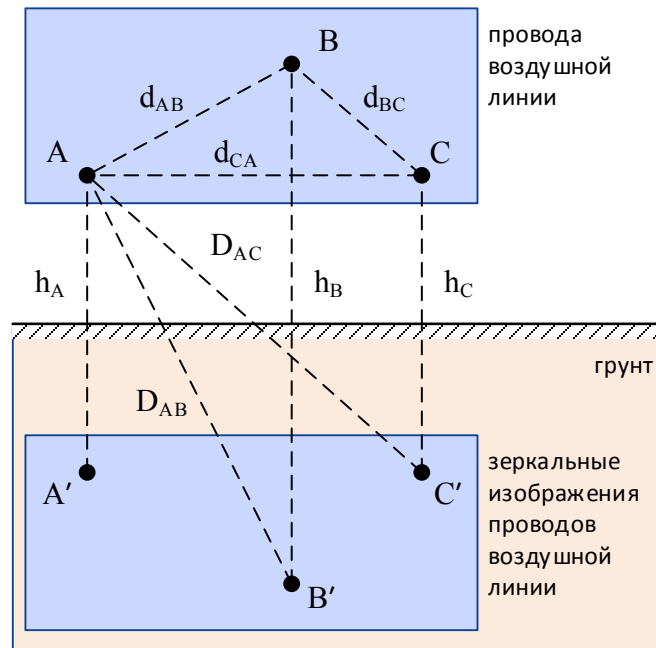


Рисунок 3 – Расчётная схема воздушной линии электропередачи:

h_i, h_k – высота проводов i, k над поверхностью земли; d_{ik} – расстояние между проводами i и k ; D_{ik} – расстояние между проводом i и зеркальным изображением провода k

В приведённых формулах влияние удельного сопротивления грунта учитывается поправочными интегралами Карсона $\Delta R_{ii}, \Delta R_{ik}, \Delta L_{ii}, \Delta L_{ik}$. Применение интегралов Карсона к расчёту электромагнитного состояния воздушной линии электропередачи подробно изложено в работах В. Г. Гольдштейна.

Таблица 1 – Параметры схемы замещения воздушной линии электропередачи

| Собственные и взаимные частичные сопротивления (Ом/км) | Собственные и взаимные частичные индуктивности (Гн/км) | Собственные и взаимные частичные потенциальные коэффициенты (км/Ф) и ёмкости (Ф/км) |
|---|--|---|
| $R_{ii} = R_i + \Delta R_{ii}$ $R_{ik} = \Delta R_{ik}$ | $L_{ii} = L_i + \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \lg \frac{2h_i}{r_i} + \Delta L_{ii}$ $L_{ik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \lg \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta L_{ik}$ | $P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \lg \frac{2h_i}{r_i}$ $P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \lg \frac{D_{ik}}{d_{ik}}$ $\mathbf{C} = \mathbf{P}^{-1}$ |

Удельное активное сопротивление провода определяется его сечением и удельным сопротивлением материала. Данные, приводящиеся в справочной литературе рассчитаны на температуру 20°C и не учитывают сезонные изменения температуры окружающей среды. Удельная индуктивность и удельная электрическая ёмкость провода определяются сечением провода и геометрическим расположением проводов воздушной линии электропередачи относительно друг друга и поверхности земли. Графики зависимостей относительных погрешностей первичных параметров воздушной линии электропередачи от температуры и влажности окружающей среды, атмосферного давления и удельного сопротивления грунта приведены на рисунке 4.

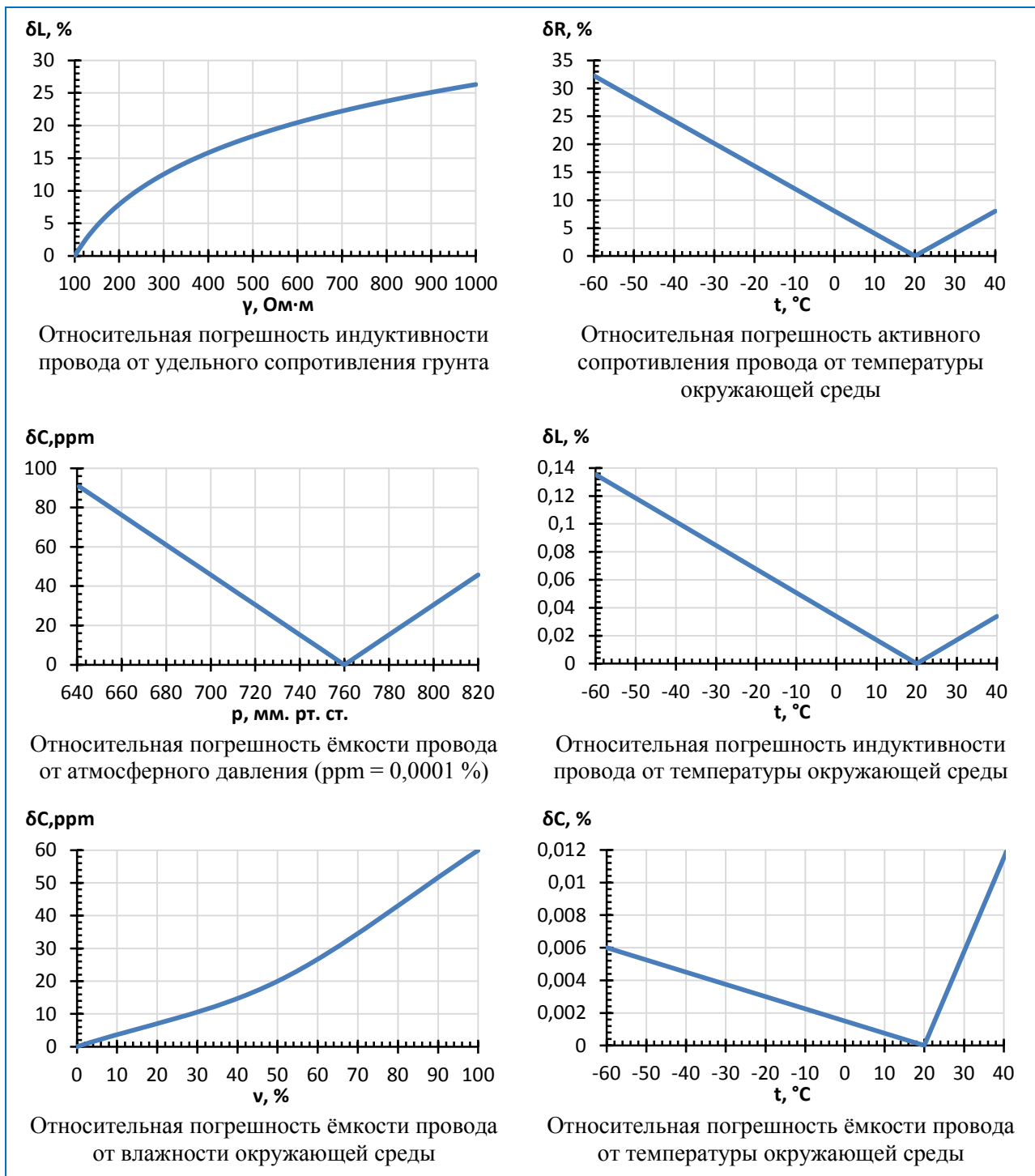


Рисунок 4 – Графики зависимостей относительных погрешностей первичных параметров воздушной линии электропередачи от природно-климатических факторов

В зависимости от состава, пористости, влажности, температуры, наличия химических загрязнителей удельное сопротивление грунта изменяется в очень широких пределах. При этом относительная погрешность определения индуктивности провода воздушной линии электропередачи может достигать 26 % при изменении величины удельного сопротивления грунта со 100 до 1000 Ом·м.

Зависимость удельной ёмкости воздушной линии электропередачи от атмосферного давления и влажности окружающей среды не значительна и не превышает 91 ppm и 60 ppm соответственно.

Температура оказывает существенное влияние на величину активного сопротивления проводов воздушной линии электропередачи, не учёт этого фактора вносит в расчёт сопротивления относительную погрешность до 32 %. Температура несущественно влияет на индуктивность и ёмкость линии, относительные погрешности не превышают 0,13 % и 0,012 % соответственно.

Таким образом, предложено в формулах таблицы 1 заменить поправочные интегралы Карсона корректировкой первичных параметров воздушной линии электропередачи на основе её конструктивных особенностей и природно-климатических факторов в соответствии с характеристиками, приведёнными на рисунке 3:

$$R_{\text{коррект}} = R \cdot \sum(1 + \delta R); \quad L_{\text{коррект}} = L \cdot \sum(1 + \delta L); \quad C_{\text{коррект}} = C \cdot \sum(1 + \delta C). \quad (8)$$

Исследовано влияние построенных на рисунке 4 зависимостей на расчёт первичных параметров электрической сети 10 кВ, упрощённая однолинейная схема которой приведена на рисунке 5.

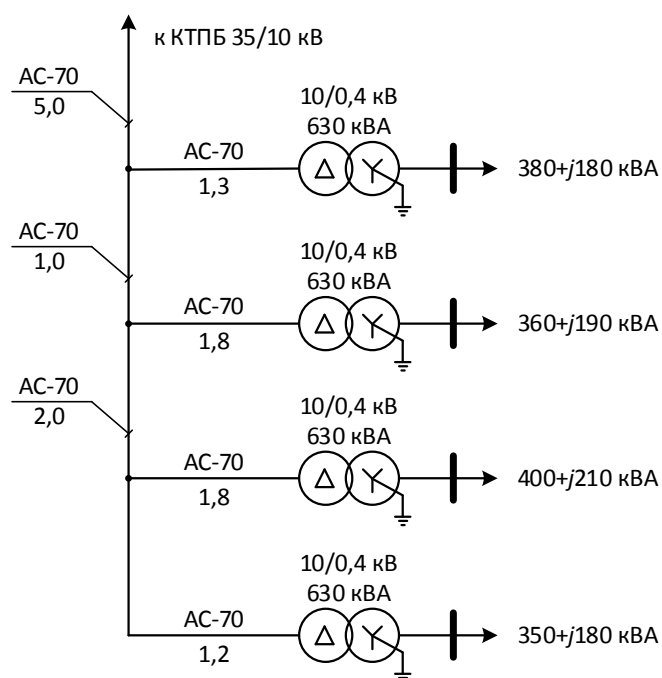


Рисунок 5 – Упрощённая схема электрической сети напряжением 10 кВ

Математическая модель электрической сети задана уравнениями (1)-(7). Параметры модели рассчитываются с учётом конструктивных и геометрических параметров воздушной линии электропередачи, затем уточняются с учётом существенных природно-климатических факторов по формулам (8).

Результаты расчёта первичных параметров воздушных линий электрической сети напряжением 10 кВ с учётом и без учёта природно-климатических факторов сведены в таблицу 2.

Анализ данных таблицы 2 показал, что природно-климатические факторы вносят в результаты вычислений матрицы активных сопротивлений относительную погрешность в пределах 9 %, в результаты вычислений матрицы индуктивностей – в пределах 20 %. Относительная погрешность вычисления матрицы ёмкостей не превышает одного процента.

Таблица 2 – Результаты расчёта первичных параметров воздушной линии

| С учётом природно-климатических факторов | | | Без учёта природно-климатических факторов | | | Относительная погрешность расчёта | | |
|--|---------|---------|---|---------|---------|-----------------------------------|-------|-------|
| Матрица активных сопротивлений, Ом/км | | | | | | Сопротивления, % | | |
| 0,4961 | 0,0520 | 0,0521 | 0,4700 | 0,0482 | 0,0482 | 5,55 | 7,85 | 8,06 |
| 0,0520 | 0,4961 | 0,0527 | 0,0482 | 0,4702 | 0,0483 | 7,85 | 5,50 | 9,04 |
| 0,0521 | 0,0527 | 0,4961 | 0,0482 | 0,0483 | 0,4702 | 8,06 | 9,04 | 5,50 |
| Матрица индуктивностей, мГн/км | | | | | | Индуктивности, % | | |
| 2,6734 | 1,3809 | 1,4412 | 2,4460 | 1,1533 | 1,2135 | 9,29 | 19,74 | 18,76 |
| 1,3809 | 2,6731 | 1,4601 | 1,1533 | 2,4452 | 1,2322 | 19,74 | 9,32 | 18,50 |
| 1,4412 | 1,4601 | 2,6731 | 1,2135 | 1,2322 | 2,4452 | 18,76 | 18,50 | 9,32 |
| Матрица ёмкостей нФ/км | | | | | | Ёмкости, % | | |
| 7,4916 | -1,3092 | -1,6880 | 7,4822 | -1,3207 | -1,6994 | 0,13 | -0,87 | -0,67 |
| -1,3092 | 7,7093 | -1,7280 | -1,3207 | 7,6934 | -1,7425 | -0,87 | 0,21 | -0,83 |
| -1,6880 | -1,7280 | 7,8609 | -1,6994 | -1,7425 | 7,8463 | -0,67 | -0,83 | 0,19 |

Согласно результатам вычислений, приведённых в таблице 3, при расчёте параметров схемы замещения воздушной линии электропередачи прямой последовательности наибольшая относительная погрешность вычисления активного сопротивления составляет 2,32 %, при расчёте параметров схемы замещения линии нулевой последовательности максимальная относительная погрешность вычисления индуктивности составляет 12,36 %.

Таблица 3. Результаты расчёта параметров схем замещения воздушной линии электропередачи прямой (ПП) и нулевой (НП) последовательностей фаз

| | С учётом природно-климатических факторов | | Без учёта природно-климатических факторов | | Относительная погрешность расчёта | |
|--------------|--|--------|---|--------|-----------------------------------|---------|
| | ПП | НП | ПП | НП | ПП | НП |
| R , Ом/км | 0,4319 | 0,5989 | 0,4219 | 0,5667 | 2,32 % | 5,38 % |
| L , мГн/км | 1,2458 | 5,5280 | 1,2458 | 4,8448 | 0,001 | 12,36 % |
| C , нФ/км | 9,2623 | 4,5372 | 9,2615 | 4,4989 | 0,01 % | 0,84 % |

Полученные в процессе исследования, величины относительных погрешностей вычисления первичных параметров воздушной линии электропередачи (таблицы 2, 3) приводят к искажению результатов дистанционных методов определения места повреждения.

В результате однофазных замыканий на землю воздушной линии электропередачи на электрооборудовании системы электроснабжения возникают напряжения, содержащие «резонансные» гармоники. Параметры «резонансных» гармоник зависят от матриц активных сопротивлений, индуктивностей и ёмкостей линии, что позволяет установить количественную взаимосвязь с расстоянием до места повреждения

Разработана методика определения места повреждения при однофазном замыкании на землю с учётом природно-климатических факторов, включающая следующие составляющие:

1. Установка на каждой трансформаторной подстанции 6(10)/0,4 кВ электрической сети 6(10) кВ технического средства регистрации сигналов фазных

напряжений каждой фазы и преобразование их в цифровой вид с последующей передачей микропроцессорной системе определения места повреждения.

2. Микропроцессорная система определения места повреждения выполняет спектральный анализ принятых цифровых сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье. Появление высших гармонических составляющих, превышающих значения до аварийного режима работы воздушной линии электропередачи, в сигналах с нескольких трансформаторных подстанций означает возникновение повреждения.

3. При обнаружении факта возникновения однофазного замыкания на землю микропроцессорная система определения места повреждения по запрограммированному алгоритму вычисляет место повреждения на основе данных спектрального анализа сигналов фазных напряжений и встроенной математической модели воздушной линии электропередачи, параметры которой корректируются в соответствии с входными сигналами технических средств мониторинга температуры и удельного сопротивления грунта.

Результаты моделирования работы электрической сети 10 кВ с учётом и без учёта влияния природно-климатических факторов приведены на рисунке 6.

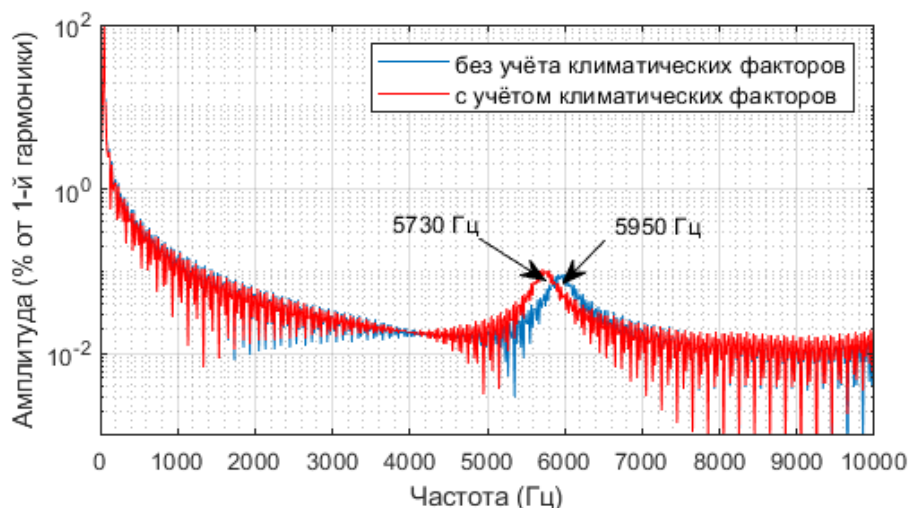


Рисунок 6 – Амплитудно-частотная характеристика напряжения на трансформаторной подстанции с повреждённой отходящей линией

Предполагается, что применение технических средств, реализующих предложенную методику определения места повреждения воздушной линии электропередачи, повысит технико-экономические показатели электроснабжения, увеличит надёжность работы воздушных линий, сократит ресурсы на поиск места повреждения.

На основе проведённого анализа литературных источников и технических средств определения места повреждения, для фидеров радиальной и древовидной структуры разработан способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью, включающий следующие этапы:

1. Определение ответвления (фидера) воздушной линии электропередачи, на котором произошло однофазное замыкание на землю.

2. Определение расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю для выделенного ответвления воздушной линии электропередачи.

В основу способа определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью положен следующий алгоритм:

1. Получить в требуемом формате (например, COMTRADE) массив данных с цифровых приборов контроля качества и учёта электроэнергии в составе современных цифровых подстанций. Минимальный состав массива данных должен включать информацию о величинах фазных напряжений и токов на вводе цифровых подстанций электрической сети, синхронизированных по времени.

2. В случае отсутствия в массиве данных информации о величинах напряжений обратной последовательности фазных напряжений, их необходимо рассчитать.

3. Установить соответствие между величинами напряжений обратной последовательности фазных напряжений на вводе цифровых подстанций и ответвлением воздушной линии электропередачи, на котором произошло однофазное замыкание на землю.

4. Вычислить спектр фазных напряжений и токов, сохранённых в массиве данных, и определить резонансную частоту $f_{\text{озз}}$ повреждённой воздушной линии электропередачи.

5. Вычислить резонансную частоту $f_{\text{рез}}$ воздушной линии электропередачи в нормальном режиме работы, используя её математическое описание и имитационную модель с учётом конструктивных особенностей и климатических факторов.

6. Используя величины $f_{\text{озз}}$ и $f_{\text{рез}}$, вычислить расстояние до места возникновения однофазного замыкания на землю вдоль установленного ответвления воздушной линии электропередачи.

Для реализации первого пункта алгоритма поиска места повреждения воздушной линии электропередачи при однофазных замыканиях на землю необходимо, чтобы ячейки вторичных цепей трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ были укомплектованы приборами контроля качества и учёта электроэнергии, регистрирующие мгновенные значения фазных напряжений и токов с привязкой ко времени и формирующие из них массив данных.

Во втором пункте алгоритма напряжения обратной последовательности фазных напряжений на вводе каждой цифровой подстанции электрической сети рассчитываются следующим образом. Сначала к трём входным сигналам фазных напряжений применяется анализ Фурье на интервале одного периода и оцениваются векторные значения \dot{U}_a , \dot{U}_b и \dot{U}_c на основной частоте 50 Гц. Затем применяется преобразование для получения напряжения обратной последовательности:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a^2 \cdot \dot{U}_b + a \cdot \dot{U}_c) \quad (9)$$

где $a = e^{j2\pi/3}$ – комплексный оператор.

Напряжения обратной последовательности определяются индуктивностями на фазу линии, зависящими только от геометрических размеров петель, образованных линейными проводами, что позволяет в третьем пункте алгоритма установить соответствие между величинами напряжений обратной последовательности фазных напряжений на вводе цифровых подстанций и ответвлением воздушной линии

электропередачи, на котором произошло однофазное замыкание на землю:

- при однофазном замыкании на землю магистрали электрической сети на всех трансформаторных подстанциях, подключённых до места повреждения напряжения обратной последовательности значительно ниже, чем на подстанциях за местом повреждения;

- при однофазном замыкании на землю ответвления воздушной линии электропередачи наибольшее напряжение обратной последовательности соответствует трансформаторной подстанции, подключённой к повреждённому ответвлению.

В четвёртом пункте алгоритма вычисляются спектр фазных напряжений и токов на вводе цифровых подстанций электрической сети прямым преобразованием Фурье.

Сначала через интервал времени Δt берётся выборка анализируемого сигнала из массива данных с цифровых приборов контроля качества и учёта электроэнергии. Верхний предел частоты в спектре анализируемого сигнала должен быть равен $1/(2\Delta t)$ (частота Котельникова), так как все частоты, превышающие половинную частоту дискретизации, отражаются относительно неё и переносятся на более низкие частоты что приводит к возникновению эффекта наложения, искажающего исходный спектр. Затем элементы выборки преобразуются в цифровую форму и при помощи быстрых цифровых преобразований вычисляется Фурье-образ. На заключительном шаге к элементам выборки применяется прямое преобразование Фурье и формируется спектр сигнала, на основании которого определяется резонансная частота f_{033} повреждённой воздушной линии электропередачи:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad (10)$$

где N – количество значений сигнала, измеренных за период, а также количество компонент разложения; x_n – измеренные значения сигнала в дискретных временных точках с номерами n от 0 до $N-1$; X_k – комплексные амплитуды высших гармонических составляющих, формирующих исходный сигнал; k – номер высшей гармонической составляющей сигнала.

В пятом пункте алгоритма резонансная частота линии в нормальном режиме работы $f_{рез}$ определяется из условия возникновения резонанса путём численного решения уравнений (1-7) математической модели электрической сети и скорректированными по формулам (8) первичными параметрами линии.

Следует отметить, что в процессе математического описания воздушная линия электропередачи разбивается на участки с одинаковыми конструктивно-техническими параметрами (по типу опор, марке проводов и тому подобному).

Блок-схема предложенного алгоритма определения места повреждения воздушной линии электропередачи приведена на рисунке 7.

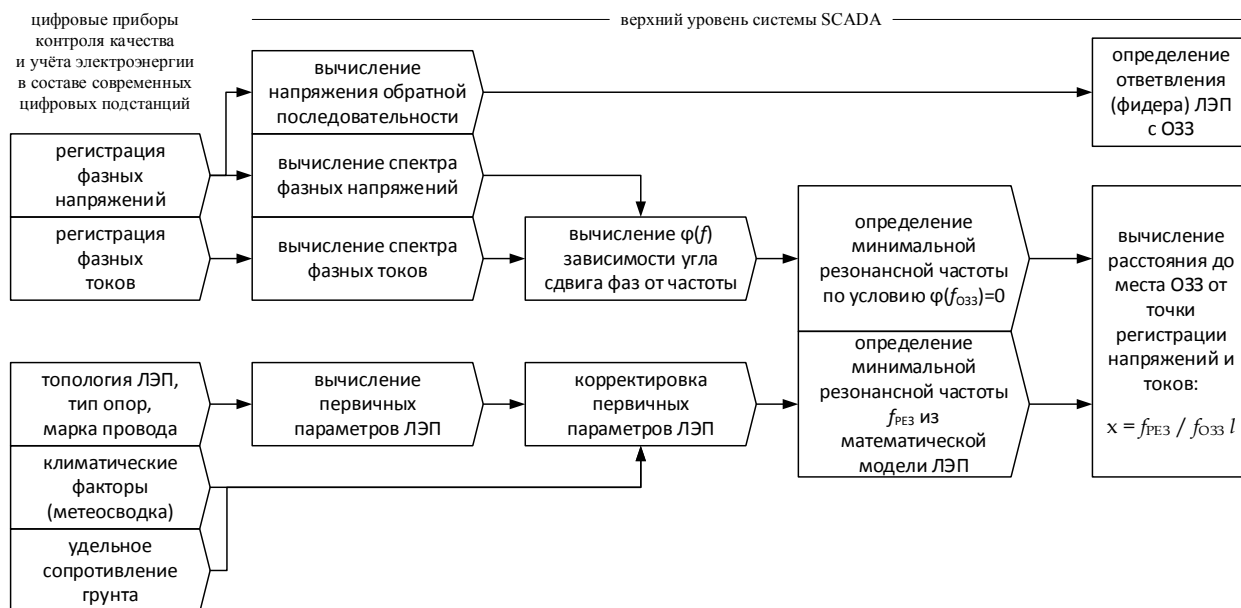


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма определения места повреждения воздушной линии электропередачи

На базе разработанного алгоритма предложена цифровая система определения места однофазного замыкания на землю (ОМОЗЗ) включает следующие функциональные блоки (рисунок 8): блок детектирования однофазного замыкания на землю (1), блок вычисления первичных параметров воздушной линии электропередачи (2), блок корректировки первичных параметров воздушной линии электропередачи (3), блок вычисления расстояния до места однофазного замыкания на землю (4).

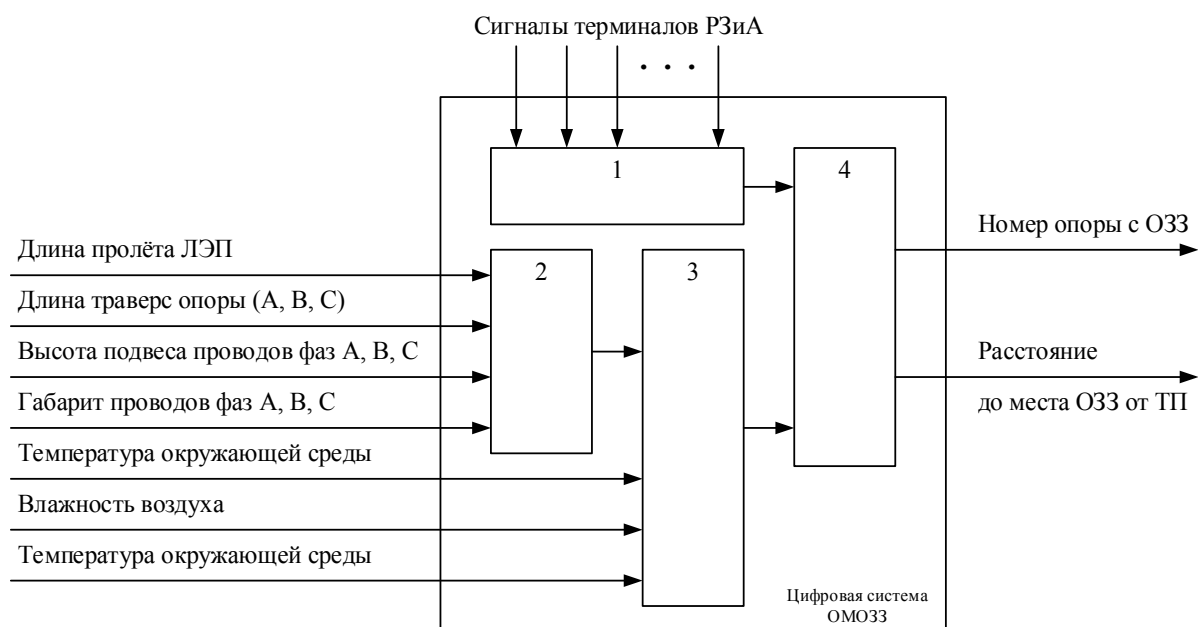


Рисунок 8 – Схема функционального блока цифровой системы определения места однофазного замыкания на землю

Блок вычисления первичных параметров воздушной линии электропередачи вычисляет первичные параметры воздушной линии электропередачи с учётом конструктивных особенностей линии электропередачи: длины пролёта, высоты подвеса проводов, длин траверс и габарита проводов.

Блок корректировки первичных параметров воздушной линии электропередачи корректирует активное сопротивление проводов, собственные и взаимные индуктивности, ёмкости на землю и взаимные ёмкости проводов с учётом изменения температуры окружающей среды, влажности воздуха (климатических факторов) и удельного сопротивления грунта по результатам измерений или в соответствии с картой почв.

Блок вычисления расстояния до места однофазного замыкания на землю определяет расстояние до места однофазного замыкания на землю согласно одному из методов (либо группе методов, включая разработанный способ) определения места повреждения воздушной линии электропередачи.

В соответствии с разработанным алгоритмом получен патент на способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью и написана программа для ЭВМ «Estimation damage location of overhead lines».

В четвёртой главе разработана модульная лабораторная установка для определения расстояния до места однофазного замыкания на землю и выполнена обработка результатов испытаний по определению места повреждения на воздушной линии 10 кВ с имитацией однофазного замыкания на землю.

Модульная лабораторная установка содержит физические модели всех основных элементов сети, обеспечивающих передачу, распределение и потребление электрической энергии (линии электропередачи, выключатели, силовые трансформаторы, активную нагрузку); содержит устройства преобразования, потенциального разделения и нормализации дискретных и аналоговых сигналов, обеспечивающих измерение, регистрацию и отображение электрических сигналов различного типа дискретизации, рода тока и уровня, а также режимные параметры. Модульная лабораторная установка состоит из лабораторного стола, в котором закрепляются отдельные модули производства ООО НПП «Учтех-Профи». Схема модульной лабораторной установки приведена на рисунке 9.

Запись осциллограммы при выполнении однофазного замыкания на землю на одной из фаз в указанном месте выполняется в программе DeltaProfi. Текстовый формат файла *.txt, сохраняет результаты записи в виде массива мгновенных значений сигнала, привязанных к отметкам времени. Значения записываются с интервалом 0,02 мс. К сохранённому массиву мгновенных значений напряжений применяется прямое преобразование Фурье для получения частотной характеристики. Погрешность определения места однофазного замыкания на землю составляет 2,439 %.

На базе Юргамышского РЭС филиала Западные электрические сети АО «СУЭНКО» 17.06.2021 г. были проведены испытания по определению места повреждения на линии 10кВ с имитацией однофазного короткого замыкания на землю. Место испытания: ПС 35/10кВ «Кипель», ВЛ 10кВ «Рождественка». Приборы, используемые при испытаниях: устройство определения места повреждения «Сириус-2-ОМП» производства «Радиус Автоматика» и цифровой измерительный прибор «ИРИС» производства «Микропроцессорные технологии». Целью проведения испытаний является проверка на соответствие расстояния до места повреждения линии, полученного согласно методике фактическому расстоянию до места повреждения.

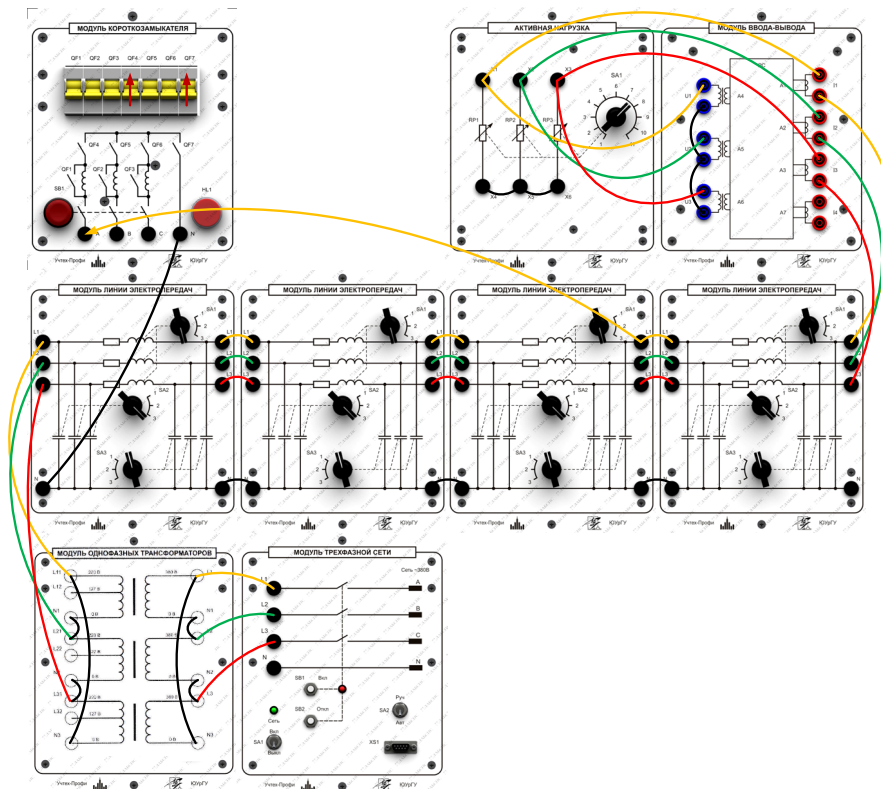


Рисунок 9 – Схема модульной лабораторной установки

В ходе подготовки на ВЛ 10 кВ «Рождественка» (рисунок 10) были определены четыре точки для проведения имитации однофазного короткого замыкания на землю:

1. ТП 10 кВ КП 4-7 Поселок (14,5 км от ПС «Кипель»)
2. ТП 10 кВ КП 4-9 Зерноток (14,42 км от ПС «Кипель»)
3. ВЛ 10кВ «Рождественка» опора 77 (5,4 км от ПС «Кипель»)
4. ВЛ 10кВ «Рождественка» опора 1 (0,01 км от ПС «Кипель»)

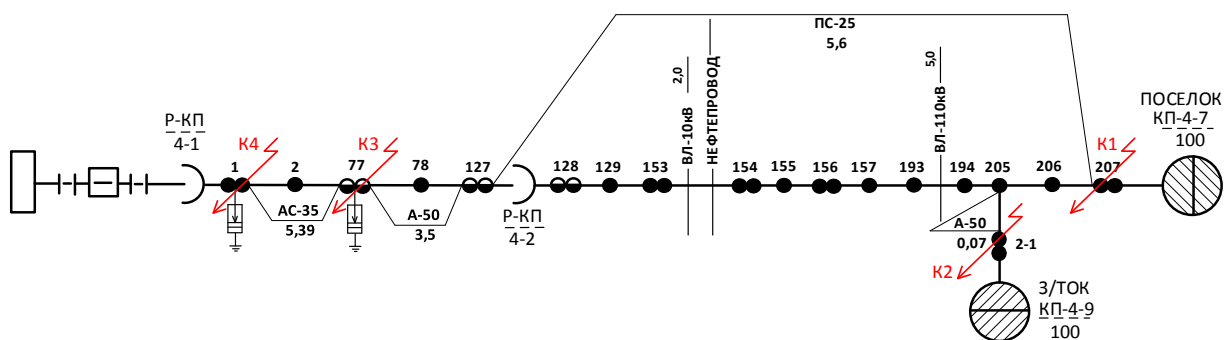


Рисунок 10 – Поопорная схема ВЛ-10кВ «Рождественка» от ПС «Кипель» 35/10 кВ с указанием точек для проведения имитации однофазного замыкания на землю

На выбранные точки устанавливалось переносное заземление на одну фазу, тем самым имитируя однофазное короткое замыкание.

Фиксация фазных напряжений и токов при осуществлении замыкания производилась приборами «Сириус-2-ОМП» и «ИРИС», предварительно установленными в ячейке вторичных цепей В-10кВ «Рождественка» (рисунок 11), а для первых двух измерений приборы дополнительно устанавливались в ТП 10 кВ.

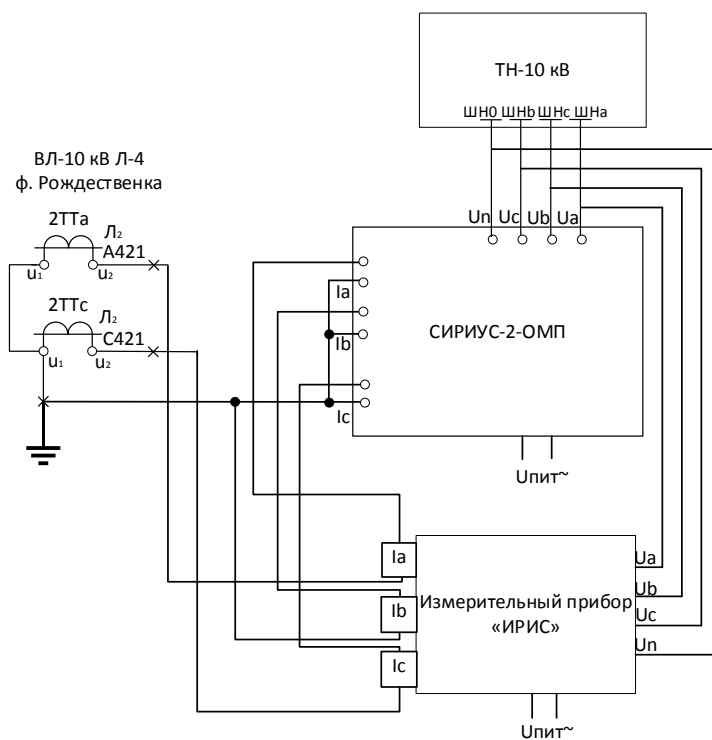


Рисунок 11 – Схема подключения ИРИС и Сириус-ОМП на ПС «Кипель»

Испытания в каждой точке проводились в одинаковом порядке, в частности, испытания на точке 3: ВЛ 10кВ «Рождественка» опора 77:

В 11:48 на опоре 77 бригадой оперативного персонала было установлено переносное заземление на ВЛ-10 кВ на фазу «С». После установки переносного заземления, на ПС «Кипель» отключили заземляющие ножи на В-10 кВ, включили линейный разъединитель и В-10 кВ. После имитации однофазного замыкания на землю прибор «ИРИС» и «Сириус-2-ОМП», установленные во вторичных цепях В-10 кВ, зафиксировали замыкание в линии и записали осциллограммы напряжений и токов в формате COMTRADE. Осциллограммы фазных напряжений при испытании на точке КЗ приведены на рисунке 12.

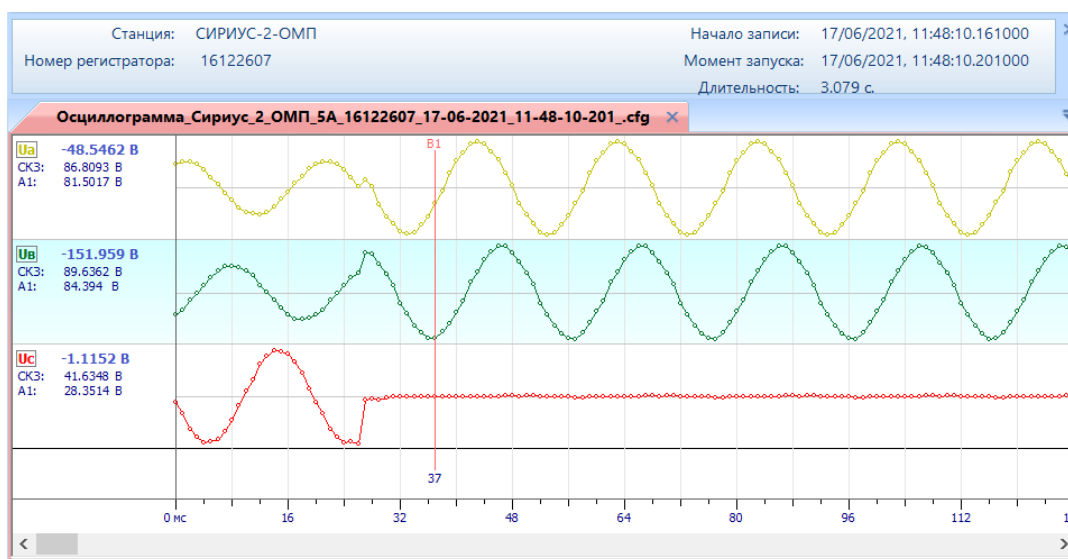


Рисунок 12 – Осциллограммы и частотная диаграмма фазных напряжений при испытании на точке КЗ: ВЛ 10кВ «Рождественка» опора 77

В соответствии с разработанным способом определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью, получены результаты, сведённые в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний по определению расстояния до места повреждения линии согласно методике

| Точка ОЗЗ | К1 | К2 | К3 | К4 |
|-----------------------------|--------|--------|-------|---------|
| Расстояние до места ОЗЗ, км | 14,404 | 14,334 | 5,372 | 0,00996 |
| Абсолютная погрешность, м | 96,1 | 85,8 | 27,9 | 0,038 |

Заключение

На основании выполненной работы получены следующие результаты:

1. Установлено, что аварийность воздушных линий электропередачи в 42 % случаев обусловлена атмосферными перенапряжениями, приводящими к развитию однофазных замыканий на землю и обрыву проводов. В результате анализа принципов и способов определения места повреждения с применением микропроцессорных устройств и анализа литературных источников по диагностированию воздушных линий электропередачи установлено, что в большинстве случаев в процессе определения места повреждения используются указанные в конструкторской документации параметры воздушной линии электропередачи без учёта изменения в процессе эксплуатации параметров проводов, линейной изоляции и опор. Подавляющее большинство способов определения места повреждения не учитывает конструктивные особенности опор, линейной изоляции воздушной линии электропередачи и влияние природно-климатических факторов на первичные параметры воздушной линии электропередачи.

2. Разработана математическая модель электрической сети с изолированной нейтралью для расчёта переходных процессов, вызванных возникновением однофазного замыкания на землю вследствие перекрытия линейной изоляции либо обрыва провода линии с образованием замыкания на землю. Разработана методика определения места повреждения воздушной линии электропередачи, основанная на определении их первичных параметров (продольное активное сопротивление проводов, собственные и взаимные индуктивности, взаимная ёмкость и ёмкость на землю проводов), корректируемых с учётом конструктивных особенностей линии (геометрические параметры опор, габарит провода), изменения природно-климатических факторов (температуры окружающей среды, влажности воздуха) и удельного сопротивления грунта. Разработана методика идентификации повреждённого фидера по совокупности величин напряжений обратной последовательности на трансформаторных подстанциях электрической сети напряжением 6(10) кВ.

3. Разработанный способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью, основанный на определении первичных параметров воздушной линии электропередачи (продольное активное сопротивление проводов, собственные и взаимные индуктивности, взаимная ёмкость и ёмкость на землю проводов) корректируется с учётом конструктивных особенностей линии (геометрические параметры опор, габарит провода), изменения природно-климатических факторов (температуры окружающей среды, влажности воздуха) и удельного сопротивления грунта позволяет получить требуемый технический результат, заключающийся в повышении надёжности электрических сетей и обеспечении электроэнергией потребителей требуемого

качества. В соответствии с разработанным способом определения места повреждения воздушной линии электропередачи написана программа для ЭВМ «Estimation damage location of overhead lines».

4. Произведены лабораторные и натурные эксперименты по апробации методики определения места повреждения на воздушной линии электропередачи с имитацией однофазного короткого замыкания на землю. В обоих случаях получены осциллограммы и частотные характеристики фазных напряжений и токов, выделены «резонансные» частоты, возникающие при переходном процессе вследствие однофазного замыкания на землю, которые позволяют определить расстояние до места повреждения воздушной линии в соответствии с разработанным способом. Погрешность определения расстояния до места повреждения воздушной линии электропередачи по предложенному способу не превышает 2,5 % относительно лабораторного и 96 м относительно натурального экспериментов.

Список научных работ, опубликованных по теме диссертации

▪ **публикация в издании, входящем в Перечень ВАК РФ:**

1. **Сидоров, С. В.** Особенности моделирования определения мест повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ / **С. В. Сидоров, В. В. Сушков, И. С. Сухачев.** – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2020. – №3. – С. 33-40.

2. Сушков, В. В., Сухачев И. С., **Сидоров С. В.** Разработка комплексного подхода к диагностированию места повреждения воздушной линии электропередачи при однофазных замыканиях на землю на основе алгоритма обработки данных цифровых подстанций / В. В. Сушков, И. С. Сухачев, **С. В. Сидоров.** – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 07. – С. 66-77.

▪ **публикации в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах Web of Science и Scopus:**

3. **Sidorov, S. V.** Development of a method for determining the location of a single line-to-ground fault of an overhead power line with voltage of 6(10) kV considering climatic factors / **S. V. Sidorov, V. V. Sushkov, I. S. Sukhachev.** – Текст : непосредственный // Smart Energy System. – 2019. – V. 124. – P. 1-6.

4. **Sidorov, S. V.** Development of a method for determining the location of a single-phase ground fault of an overhead power line 6(10) kV voltage considering climatic factors / **S. V. Sidorov, V. V. Sushkov, I. S. Sukhachev.** – Текст : непосредственный // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2020. – V. 331, № 2. – P. 115-123.

▪ **патент и свидетельство о государственной регистрации электронного ресурса:**

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617190 Российская Федерация. Estimation damage location of overhead line : № 2021615804 : заявл. 19.04.2021 : опубл. 11.05.2021 / **С. В. Сидоров, В. В. Сушков, И. С. Сухачев ; заявитель Сидоров С. В.** – 1 с.

6. Патент № 2798941 Российская федерация, МПК G01R 31/08 (2006.01). Способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью : № 2022135489: заявл. 31.12.2022 : опубл. 29.06.2023 / **С. В. Сидоров, В. В. Сушков,**

И. С. Сухачев ; заявители **Сидоров С. В.**, Сушков В. В., Сухачев И. С. – 12 с. – Текст : непосредственный

▪ *научные публикации в прочих изданиях:*

7. Сушков, В. В. Определение места обрыва линейных проводов воздушной линии по вторичному напряжению трансформаторных подстанций / В. В. Сушков, **С. В. Сидоров**, И. С. Сухачев [и др.] – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Омск : ОмГТУ, 2018. – С. 41-44.

8. Сухачев, И. С. Прогнозирование остаточного ресурса выключателей напряжением 6-10 кВ нефтяных промыслов / И. С. Сухачев, В. В. Сушков, **С. В. Сидоров**. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов. – Тюмень : ТИУ, 2018. – С. 347-350.

9. **Сидоров, С. В.** Разработка методики определения расстояния до места обрыва провода и ОЗЗ ВЛ напряжением 6(10) кВ / **С. В. Сидоров**. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 344-347.

10. **Сидоров, С. В.** Диагностирование однофазных замыканий на землю при воздействии грозových перенапряжений на электрическую сеть напряжением 6(10) кВ / **С. В. Сидоров**. – Текст : непосредственный // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Нижневартовск : НГУ, 2019. – С. 686-688.

11. **Сидоров, С. В.** Определение места повреждения воздушной линии 6-10 кВ с учетом климатических факторов (Тезисы) / **С. В. Сидоров**. – Текст : непосредственный // 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2019». Тезисы докладов. Т.3. – Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2019. – С. 480-481.

12. **Сидоров, С. В.** Оценка эффективности эксплуатации электротехнического комплекса отходящих линий / **С. В. Сидоров**, И. С. Сухачев, В. В. Сушков [и др.] – Текст : непосредственный // Динамика систем, механизмов и машин. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. – Т. 8, № 3. – С. 71-76.

В авторской редакции

Подписано в печать 09.11.2023. Формат 60x90 1/16. Печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 2706.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.