

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Новобрицкий Владислав Александрович

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Федосов Денис Сергеевич

Иркутск, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРАВИЛЬНУЮ РАБОТУ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	15
1.1 Короткие замыкания в электрической сети. Последствия неправильной работы релейной защиты при коротких замыканиях.....	15
1.2 Влияние на работу релейной защиты насыщения измерительных трансформаторов тока	18
1.2.1 Общие требования к трансформаторам тока для релейной защиты ...	18
1.2.2 Модель трансформатора тока для анализа работы релейной защиты	20
1.2.3 Оценка влияния насыщения и остаточной намагниченности трансформатора тока на работу релейной защиты.....	28
1.3 Влияние исправности цепей трансформатора напряжения на функционирование устройств релейной защиты	33
1.3.1 Принцип действия и существующие недостатки функции блокировки защиты при неисправностях в цепях напряжения.....	33
1.3.2 Способы предотвращения неправильных срабатываний релейной защиты, при отказе устройства блокировки при неисправностях в цепях напряжения	39
1.3.3 Обоснование применения аварийной максимальной токовой защиты....	41
1.4 Влияние переходного сопротивления электрической дуги на работу дистанционной защиты	43
1.4.1 Анализ влияния переходного сопротивления дуги на замеры сопротивления	43
1.4.2 Описание и верификация динамической модели электрической дуги	46
1.4.3 Интеграция модели дуги с нелинейным сопротивлением в модель первичной электрической сети и анализ замеров сопротивления.....	50
1.5 Достоинства и недостатки существующих каналов связи для устройств релейной защиты линий электропередачи	55
Выводы по первой главе.....	59

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С АБСОЛЮТНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ..... 63

2.1 Теоретические основы расчета напряжённости магнитного поля многопроводной системы.....	63
2.2 Исследование составляющих магнитного поля одноцепной и двухцепной линий электропередачи	67
2.3 Измерение тока в линии электропередачи путём применения датчиков магнитного поля	73
2.4 Способы и устройства измерения напряжённости магнитного поля промышленной частоты	81
2.5 Разработка защиты с абсолютной селективностью для одноцепной линии с применением датчиков магнитного поля	89
2.5.1 Способ получения замеров магнитного поля для создания защиты с абсолютной селективностью	89
2.5.2 Определение оптимальной траектории размещения датчиков магнитного поля возле одноцепной линии	95
2.5.3 Применение метода оптимизации для определения точки установки датчика магнитного поля	102
2.6 Разработка защиты с абсолютной селективностью для двухцепной линии с применением датчиков магнитного поля	112
2.6.1 Способ получения замеров магнитного поля для создания защиты с абсолютной селективностью	112
2.6.2 Определение оптимальной траектории размещения датчиков магнитного поля возле двухцепной линии	119
2.6.3 Обоснование требования для оптимизации при внешнем коротком замыкании на параллельной линии.....	122
2.6.4 Обоснование требования для оптимизации при внутреннем коротком замыкании на защищаемой линии	127

2.6.5 Решение задачи оптимального размещения датчиков магнитного поля с применением алгоритма многопараметрической оптимизации	133
Выводы по второй главе.....	144
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНО-ДУГОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	148
3.1 Постановка задачи	148
3.2 Описание аппаратной части устройства спектрально-дуговой защиты	151
3.3 Описание принципа работы устройства спектрально-дуговой защиты.....	153
3.4 Область применения устройства спектрально-дуговой защиты.....	158
Выводы по третьей главе.....	160
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ СПОСОБОВ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	161
4.1 Верификация замеров напряжённости магнитного поля для разработки рекомендаций по применению к защите с абсолютной селективностью на датчиках магнитного поля.....	161
4.1.1 Результаты измерений напряжённости магнитного поля, создаваемого физической моделью двухцепной линии электропередачи	161
4.1.2 Рекомендации по выбору уставок и проверки защиты с абсолютной селективностью на датчиках магнитного поля.....	164
4.2 Разработка прототипа устройства релейной защиты с использованием атмосферной оптической линии связи.....	168
4.2.1 Оценка возможности применения атмосферной оптической линии связи для устройств релейной защиты.....	168
4.2.2 Анализ требований к каналам связи для устройств релейной защиты..	170
4.2.3 Описание алгоритма прототипа устройства защиты	174
4.2.4 Оценка эффективности работы прототипа устройства защиты	177
Выводы по четвёртой главе	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	183
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	195

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	197
ПРИЛОЖЕНИЕ А ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ.....	215
А.1 Современные устройства измерения магнитного поля промышленной частоты на основе датчика Холла	215
А.2 Факторы погрешностей и способы их устранения для датчиков магнитного поля на основе эффекта Холла	218
ПРИЛОЖЕНИЕ Б РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА КООРДИНАТ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОПОР ЛИНИЙ 35 кВ.....	226
ПРИЛОЖЕНИЕ В ПАТЕНТЫ И СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ.....	227
ПРИЛОЖЕНИЕ Г АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	230

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования: С увеличением объемов потребляемой энергии и сокращением запасов органического топлива перед энергетической отраслью встали новые задачи. Среди них: разработка методов эффективного преобразования природных энергетических ресурсов и топлива в электрическую энергию, оптимизация технологий передачи электроэнергии, разработка автоматизированных быстродействующих систем для повышения надежности работы энергетических комплексов. Основным способом передачи электрической энергии остаются высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП). Повреждения ЛЭП приводят к затратам не только в части восстановления оборудования, но и в части недоотпуска электрической энергии на время проведения восстановительных работ [1], а также возможного выхода энергосистемы из синхронизма и нарушения динамической устойчивости. Защита ЛЭП реализуется посредством применения комплекса устройств релейной защиты (РЗ), предназначенного для своевременного выявления и ликвидации всех видов коротких замыканий (КЗ). В настоящий момент основным источником получения информации о возникновении аварийного режима в первичной сети являются измерительные трансформаторы тока (ТТ) и трансформаторы напряжения (ТН), у которых с ростом номинальных напряжений существенно увеличиваются стоимость, вес и габариты, а метрологические характеристики ухудшаются [2]. Правильная работа устройств РЗ зависит от множества факторов, оказывающих влияние на их функциональность. В части человеческого фактора могут быть рассмотрены ошибки при расчёте, выборе и выставлении уставок устройств РЗ при наладочных работах. К ним же относится неверная настройка самих электромеханических реле, а для микропроцессорных (МП) защит таким фактором является неправильное задание внутренних алгоритмов функционирования и настройка аппаратной части.

Всё, что не относится к аппаратной части РЗ, не связано с человеческим фактором и имеет случайный характер, подходит под описание

внешних влияющих факторов. К таким факторам относятся погрешности измерительных ТН и ТТ, наличие несимметрии и гармонических составляющих нагрузочных токов и напряжений, влияние переходного сопротивления электрической дуги на замеры сопротивления у дистанционных защит (ДЗ).

Требования, предъявляемые РЗ к измерительным преобразователям тока за последние годы существенно повысились. Это объясняется следующими причинами: значительно выросли кратности токов КЗ в энергосистемах, с увеличением единичных мощностей генераторов выросли постоянные времени затухания апериодической составляющей токов КЗ [3], проявили себя проблемы, связанные с насыщением ТТ. Например, из-за насыщения ТТ произошла крупная авария на Ростовской АЭС, связанная с возникновением КЗ в начале ЛЭП на присоединении 500 кВ, когда из-за насыщения ТТ произошла ложная работа ДЗШ 4 СШ 500 кВ с последующим отделением Ростовской АЭС от энергосистемы на изолированную работу [4]. Дополнительными факторами являются большие по величине и длительности существования переходные сопротивления электрической дуги [5], оказывающие негативное влияние на правильность работы защиты и усложняющие расчет и выбор уставок устройств РЗ. Следовательно, актуальной становится задача применения альтернативных методов [6] выявления аварийных режимов в первичной электрической сети, лишенных недостатков существующих средств измерений и позволяющих реализовать новые способы выполнения РЗ. В качестве таких вариантов могут стать способы выявления КЗ без непосредственного подключения измерительных преобразователей к высоковольтным ЛЭП. Так, в РЗ известны способы измерения токов по напряжённости магнитного поля (НМП) в окружающем пространстве. Одним из недостатков разработанных способов является допущение о том, что все фазные провода расположены в одной горизонтальной плоскости, тогда как в действительности размещение фазных проводов на одноцепных опорах может иметь произвольную конфигурацию. Не рассматриваются случаи

реализации РЗ, основанной на замерах НМП для двухцепных ЛЭП. Также известны РЗ от дуговых замыканий, применяемые в открытых [7] и комплектных распределительных устройствах, выявляющие КЗ по появлению световой вспышки от электрической дуги. Данные способы выполнения защит могут быть условно названы «бесконтактными».

Степень разработанности темы исследования: В части исследования влияния насыщения измерительных ТТ на работу устройств РЗ большой вклад внесли следующие отечественные ученые: С. Л. Кужеков, Н. А. Дони, А. Д. Рыбалкин, И. Н. Одинаев, Г. С. Нудельман, А. Д. Дроздов, Ю. Я. Лямец и др. В вопросах разработки бесконтактных методов измерения электрических параметров первичной электрической сети и реализации на их основе устройств РЗ существенный вклад внесли П. А. Назаров, А. Т. Аблаев, М. Я. Клецель, В. Д. Лебедев, А. А. Яблоков, М. Е. Фесенко и др. Среди зарубежных ученых, специализирующихся на применении для устройств РЗ датчиков на основе эффекта Холла и катушки Роговского [8, 9, 10, 11], известны К. L. Chen, Y. P. Tsai, M. Andrusca, R. Majumder, B. Miedzinski, A. Lisowiec и др.

Объект исследования: Объектом исследования являются системы и комплексы РЗ ВЛ высокого напряжения, работающие при аварийных режимах КЗ.

Предмет исследования: Предметом исследования являются методы, алгоритмы и технические решения для выявления КЗ на воздушных ЛЭП с применением измерителей НМП и устройств для регистрации светового сигнала электрической дуги с целью разработки новых типов РЗ.

Цель работы: Разработка способов реализации РЗ высоковольтных ЛЭП с получением информации о параметрах повреждения при различных видах КЗ в первичной электрической сети от датчиков магнитного поля (ДМП) и оптических сенсоров.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести оценку влияния на работу РЗ режима насыщения ТТ, неисправностей в цепях напряжения ТН, электрической дуги на замеры сопротивления при КЗ.

2. Разработать модель для исследования магнитных полей трёхфазных одноцепных и двухцепных ЛЭП высокого напряжения. Провести анализ существующих разработок ДМП для оценки их применения в качестве измерителей для устройств РЗ.
3. Разработать способ выполнения абсолютно селективной защиты одноцепных и двухцепных ЛЭП от междуфазных КЗ с использованием ДМП на основе дифференциального принципа, применяя для этого не формирование пофазных замеров токов каждого из проводов, а используя результирующее значение НМП от всех фаз ЛЭП при КЗ.
4. Сформулировать и решить оптимизационную задачу определения минимального количества и координат точки размещения ДМП возле одноцепной и двухцепной ЛЭП для реализации защиты с абсолютной селективностью. Произвести верификацию результатов расчёта НМП на физической модели двухцепной ЛЭП.
5. Исследовать недостатки существующих каналов связи устройств РЗ. Рассмотреть и предоставить обоснование возможности применения атмосферной оптической линии связи (АОЛС) в качестве канала передачи данных для устройств РЗ. Реализовать прототип устройства защиты с применением АОЛС, провести его апробацию.
6. Разработать устройство спектрально-дуговой защиты (УСДЗ) ЛЭП [12] для реализации дистанционного выявления дуговых КЗ оптическим методом, описать логику работы защиты и алгоритмы функционирования.

Методология и методы исследования: В работе применены методы математического моделирования и анализа режимов ЛЭП и её магнитного поля, использован дифференциальный принцип реализации традиционных устройств РЗ. При разработке моделей и выполнении расчётов применены фундаментальные законы теоретических основ электротехники для

расчёта режимов КЗ на ЛЭП, теории электромагнитного поля для расчёта НМП от проводников с токами. Поиск места оптимального расположения ДМП произведён с использованием эвристического метода многопараметрической оптимизации, реализованного при помощи генетического алгоритма в модуле «Optimization Toolbox» программного вычислительного комплекса MATLAB. Основные расчёты режима работы электрической сети, параметров магнитного поля и обработка полученных результатов выполнены с применением программ MATLAB Simulink и Microsoft Excel. В качестве метода аналитических исследований использовалось физическое моделирование и натурный эксперимент.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана имитационная модель ТТ с возможностью задания остаточной магнитной индукции до 86% от индукции насыщения, позволяющая учитывать размагничивающее действие от тока КЗ;
2. Впервые предложен метод обработки сигналов с ДМП для создания селективной защиты двухцепной ЛЭП, реализованный на сравнении замеров результирующей НМП от всех проводников по концам ЛЭП. Применение данного метода позволяет выполнить защиту ЛЭП используя только 6 ДМП с каждой стороны, в то время как используя пофазный замер токов через ДМП, необходимо в общей сложности 72 ДМП.
3. Разработана уточненная динамическая модель электрической дуги при междуфазных КЗ на основе уравнения Касси для оценки искажения замеров сопротивления и их влияния на работу ДЗ при дуговых коротких замыканиях.

Теоретическая значимость работы состоит в получении векторов НМП одно- и двухцепных ЛЭП не только в симметричных нагрузочных режимах, но и при всех видах КЗ. Разработана защита одно- и двухцепных ЛЭП на дифференциальном принципе по измерению результирующей НМП. Предложено использовать эвристические алгоритмы оптимизации для выбора оптимального

количества и места расположения ДМП для реализации защиты ЛЭП. Доказано, что существует возможность реализации защиты с абсолютной селективностью для двухцепных и одноцепных ЛЭП на базе замеров результирующей НМП, измеренного ДМП.

Практическая значимость работы заключается в том, что с применением бесконтактного получения информации об аварийных режимах в первичной сети – путём измерения НМП и регистрации электрической дуги – появляется возможность реализации быстродействующих устройств РЗ без применения ТТ и ТН. Решение этой задачи особенно актуально для сетей 35 кВ с односторонним питанием по двум параллельным ЛЭП на двухцепной опоре в случае установки ТТ только со стороны питающего конца ЛЭП и отсутствия возможности реализации ДЗЛ – традиционной РЗ с абсолютной селективностью. Применение разрабатываемых защит не исключает их совместное использование с традиционными комплексами РЗ ЛЭП, а дополняет их, перекрывая недостатки, связанные с насыщением ТТ, неисправностями в цепях ТН и т. д. В работе представлены рисунки с оптимальными точками размещения ДМП для наиболее распространённых типов двухцепных опор ЛЭП 35 кВ. Внедрение УСЗД позволит устранить недостатки существующих устройств РЗ, в т. ч. применять её для защиты начального участка ЛЭП, так как УСДЗ имеет существенно отличающийся принцип действия. Насыщение ТТ, потеря цепей ТН, а также несинусоидальность и несимметрия параметров режима не оказывают никакого влияния на УСДЗ благодаря созданию гальванической развязки через оптическую связь.

Соответствие паспорту специальности:

Решаемые в диссертации задачи исследования соответствуют паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки), а именно:

- п. 3. Разработка методов расчета электрических и магнитных полей, исследование закономерностей воздействия сильных токов, электрических

и магнитных полей на диспергированные и другие материалы, среды и изделия;

- 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. 16. Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике.

Достоверность результатов работы подтверждена путём проведения измерений полного значения и ортогональных составляющих НМП на физической модели двухцепной ЛЭП в режимах внешнего КЗ и КЗ в зоне действия защиты. Различия рассчитанных на модели и измеренных НМП не превышают 10%, что соответствует классам точности использованных измерителей и является приемлемым для устройств РЗ. Возможность применения АОЛС в качестве канала связи для устройства РЗ подтверждена при разработке и испытаниях прототипа РЗ, реализованного на базе микроконтроллеров Arduino.

Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Доказана возможность реализации основной защиты ЛЭП с использованием ДМП не только для проводников с точками подвеса на опоре на одной горизонтальной линии, но и для произвольно размещённых на опоре проводников одноцепных ЛЭП 6-110 кВ и двухцепных ЛЭП 35 кВ;
2. Доказано, что для реализации защиты двухцепных ЛЭП с использованием ДМП необходимо применять однокоординатные ДМП, реагирующие на вертикальную или горизонтальную составляющую НМП. Получено соотношение порядка 1000 между результирующим значением НМП при внутренних КЗ и небалансом при внешних КЗ. Для КЗ в зоне значение результирующей НМП при токах КЗ в 1 кА составляет 88 А/м,

тогда как наибольший небаланс при внешнем КЗ в 40 кА составил 1,5 А/м, что подтверждает возможность выбора уставок с $K_{\text{ч}} = 2$.

3. Предложено применение УСДЗ для реализации защиты начального участка 5-10% от длины ЛЭП малой протяженностью до 2 км, на которых нет возможности выбора уставок ступенчатых защит с выдержкой времени 0 с и наблюдаются искажения замеров сопротивления более 50% от фактических при близких дуговых КЗ.

Апробация результатов работы: Основные положения представленной работы докладывались в период с 2020 по 2025 г на следующих конференциях:

1. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Международная конференция «Пром-Инжиниринг»), 2020, г. Сочи;
2. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», 2022, 2023, 2024, г. Иркутск;
3. XIII Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2023», 2023, г. Красноярск;
4. Научно-практическая конференция имени В.Н. Ясникова «Планирование и управление электроэнергетическими системами», 2024, г. Кемерово, филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири;
5. XIV Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2024», 2024, г. Ставрополь.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры электрических станций, сетей и систем ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», получены акты внедрения. Разработанная программа для ЭВМ применяется для получения карт НМП, создаваемого воздушными ЛЭП напряжением 35 кВ и выше, при проектировании и эксплуатации ЛЭП. Получены акты использования результатов диссертационного исследования в АО «Иркутская электросетевая компания» и АО «ХОЛДИНГ ЭРСО», подтверждающие заинтересованность в дальнейшем развитии и практическом применении результатов работы

(«Приложения В – Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ», и «Приложение Г – Акты внедрения результатов исследования»).

Личный вклад автора: В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит формализация поставленных задач, обзор литературных источников, в т. ч. по использованию существующих технологий ДМП и АОЛС для их применения в РЗ, разработка и детализация математических моделей, проведение основных исследований, поиск и выбор методов решения задачи оптимизации. Автор самостоятельно провёл анализ и сравнение полученных решений с существующими разработками, выявил их преимущества и недостатки. Автор самостоятельно создал макет двухцепной ЛЭП, провёл на нём испытания для верификации математической модели. Автор самостоятельно провел обзор существующих устройств, использующих оптический принцип выявления КЗ в распределительных устройствах, на основе которых создано концептуальное решение в части реализации УСДЗ, патентообладателем которого является автор. Цель и задачи работы, основные положения по разработке математических моделей формулировались и обсуждались с научным руководителем. Разработка прототипа защиты с АОЛС выполнена совместно с научным руководителем, сотрудниками и обучающимися кафедры электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ.

Публикации:

В результате выполненных исследований по теме диссертационной работы опубликовано 12 научных статей, из них 3 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях из Перечня ВАК РФ по научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика, 1 статья в сборнике материалов конференции, индексируемая в международной базе Scopus. Получен 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы: Общий объем диссертационной работы представлен на 232 страницах и содержит введение, четыре главы основного текста, заключение, список литературы в количестве 154 позиции, 4 приложений. Всего в работе представлено 15 таблиц и 101 рисунок.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРАВИЛЬНУЮ РАБОТУ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

1.1 Короткие замыкания в электрической сети. Последствия неправильной работы релейной защиты при коротких замыканиях

С момента появления первых систем производства, передачи и потребления электрической энергии возникла потребность в обеспечении данных электрических систем защитой от ненормальных режимов и повреждений, на работу в которых они не рассчитаны. К ненормальным электрическим режимам и повреждениям относятся: перегрузки, режимы КЗ, обрывы, отказы выключателя, перенапряжения, провалы напряжения, асинхронные режимы (качания), предельные отклонения частоты и т. д. Основная функция РЗ заключается в своевременном выявлении и устранении именно режимов КЗ ввиду малого интервала времени на их возникновение и развитие, где переход из рабочего режима в аварийный режим КЗ может составлять несколько микросекунд [13]. Остальные ненормальные режимы характеризуются более медленной скоростью протекания, поэтому на их устранении специализируется отдельная противоаварийная или режимная автоматика [14].

Под режимом КЗ понимается всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных точек (фаз) электроустановки между собой или с землей [15]. При этом основными причинами возникновения КЗ в первичной сети ЛЭП являются:

1. Нарушение внешней изоляции токоведущих частей вследствие её старения, износа или механических повреждений, а также изначальных дефектов конструкции.
2. Перекрытия в случае загрязнения опорных изоляторов, влияния коррозии, появления микротрещин вследствие перепада температур; перекрытие потоком воды во время дождя, при попадании молнии в токоведущую часть, а также перекрытия птицами, мелкими животными или продуктами их жизнедеятельности.

3. Касания проводов при проведении строительно-монтажных работ, неправильные действия персонала при производстве переключений, включение ЛЭП на заземляющий нож, падение близрастущих деревьев или прорастание под ЛЭП кустарников и иной растительности [16, 17].

Все вышеперечисленные явления являются лишь причинами возникновения КЗ, при этом к признакам КЗ относятся повышение фазных токов и их симметричных составляющих в электрической сети, снижение напряжения в месте возникновения КЗ для поврежденной фазы и появления напряжений симметричных составляющих по обратной или нулевой последовательностям, изменение угла φ между током и напряжением (Рисунок 1.1), изменение замера сопротивления, изменение направления протекания тока в сторону повреждения, изменение направления мощности, появление вспышки электрической дуги в случае возникновения неметаллического КЗ через переходное сопротивление, высокая скорость перехода из нагрузочного режима в режим КЗ, появление волновых высокочастотных процессов в первичной сети [18]. Представленные признаки КЗ являются теми условиями, наличие которых позволяет отличить режим КЗ от нормальных режимов и позволяет устройствам РЗ сработать правильно.

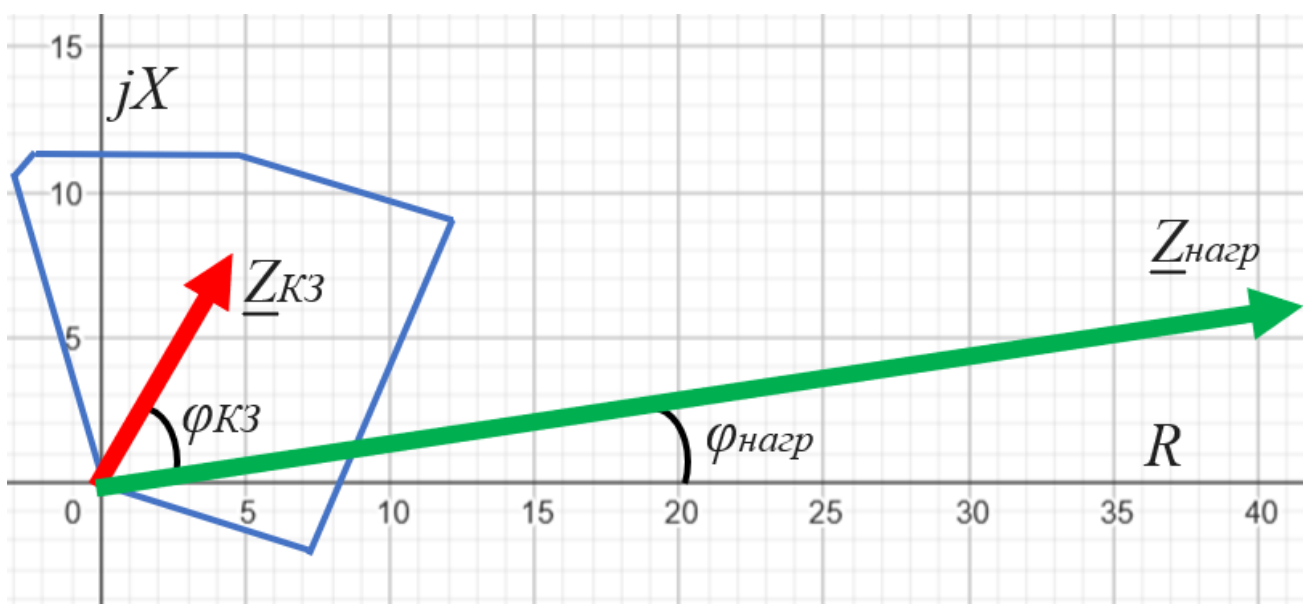


Рисунок 1.1 – Изменение угла и величины сопротивления при КЗ

В соответствии с п. 21 приказа Минэнерго России № 80 [19] под правильной работой устройств РЗ понимается срабатывание устройства или заложенных в составе функций в соответствии с назначением устройства РЗ и исходя из обеспечения выполнения устройством возложенных на него функций, при наличии требования для его срабатывания.

К последствиям КЗ в случае их своевременного неустранения можно отнести возникновение пожаров, повреждение и выход из строя электрического оборудования, нарушение устойчивости генерирующего оборудования и нагрузки потребителей и т. д.

Существующие современные комплексы и устройства РЗ реагируют именно на признаки возникновения КЗ, а не на его причину. Для защит токового принципа, таких как МТЗ, МФТО, ТЗНП и ТЗОП определяющим условием срабатывания является превышение уставки по фазному или линейному току, току нулевой или обратной последовательности соответственно. ДЗ реагирует на уменьшение замера сопротивления. Защиты, основанные на принципе направленности (ВЧБ, НВЧЗ), реагируют на изменение знака направления мощности, защиты дифференциального принципа действия (ДЗЛ) основаны на том, что при внешних КЗ в начале и в конце протекает один и тот же ток (рисунки 1.2 а-г), а при КЗ в зоне действие разные токи (рисунки 1.2 д-з). В итоге защита реагируют либо на модуль и фазу измеряемых токов по концам защищаемого объекта, либо на их непосредственные мгновенные значения [20]. Дуговые защиты реагируют на появление электрической дуги, как правило, в определенном спектральном световом диапазоне [21].

Следовательно, измерительные ТТ дают информацию о процессах и признаках КЗ, возникающих в первичной сети, для защит всех принципов действия, тогда как замеры с ТН используются только в защитах с контролем напряжения, защитах дистанционного принципа и защитах, основанных на принципах направленности. Наличие дуги может быть зафиксировано только оптическими сенсорами. Именно недостоверность замеров перечисленными

устройствами может стать причиной либо ложного действия устройств РЗ, либо отказа их срабатывания.

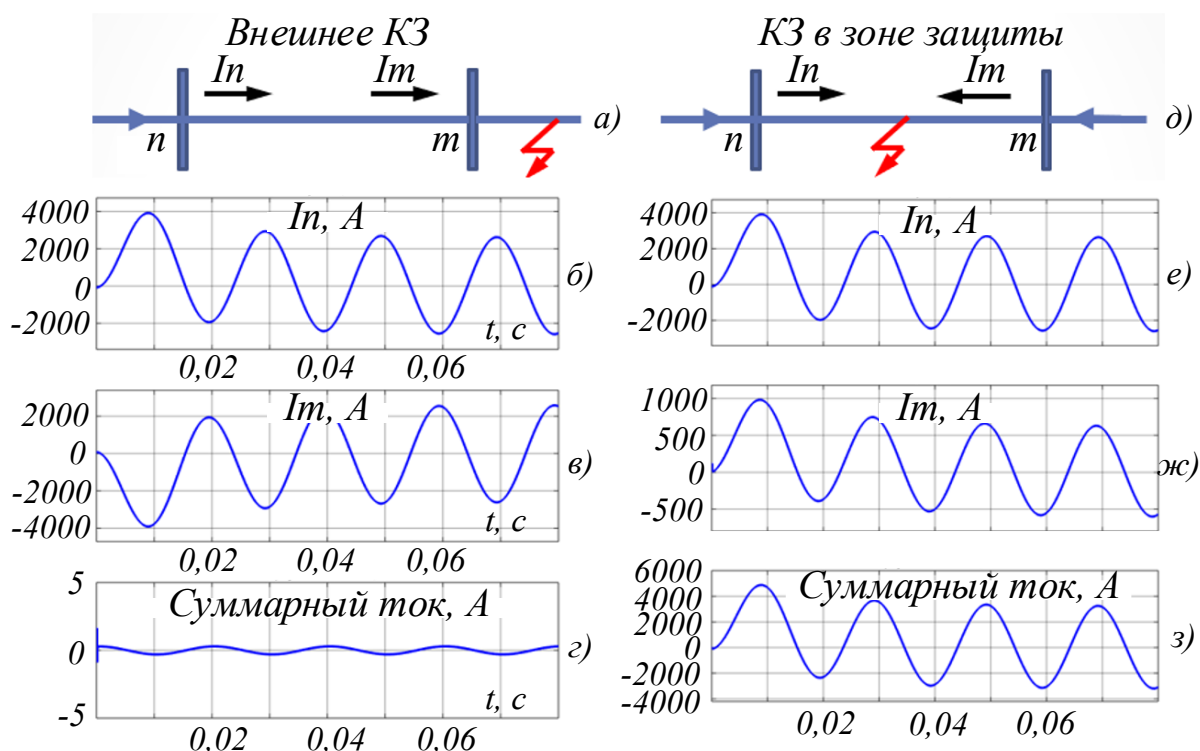


Рисунок 1.2 – Дифференциальный принцип действия защиты: а) распределение токов при внешнем КЗ; б) Ток I_n при внешнем КЗ; в) Ток I_m при внешнем КЗ, г) суммарный ток при внешнем КЗ; д) распределение токов при внутреннем КЗ; е) Ток I_n при внутреннем КЗ; ж) Ток I_m при внутреннем КЗ; з) суммарный ток при внутреннем КЗ

1.2 Влияние на работу релейной защиты насыщения измерительных трансформаторов тока

1.2.1 Общие требования к трансформаторам тока для релейной защиты

Измерительные ТТ производят преобразование больших величин токов, в частности токов КЗ, в малые токи, с которыми удобно производить анализ явлений и процессов, которые происходят в первичной сети. ТТ являются разделителями между первичной и вторичной сетью, и позволяют выполнить устройства измерения уже на более дешевой изоляции вторичной сети, а также

снизить опасность для персонала, хоть и не исключить её полностью, так как существует вероятность того, что при размыкании вторичных цепей ТТ сотрудник может получить электротравму. ТТ позволяют создать дифференциальную защиту для электромеханических устройств РЗ, посредством включения ТТ в начале и в конце элемента, и полярность обмоток которых направлена в защищаемый элемент [22]. Так, при внешних КЗ по отношению к защищаемому элементу, при протекании одной и той же величины тока в начале и в конце, имеется возможность произвести дифференциальное вычитание этого тока и получить общий результирующий замер с двух сторон равный нулю. Для МП устройств изменение полярности измеряемого сигнала можно производить программным путём.

Однако помимо указанных преимуществ, измерения, получаемые с ТТ могут быть значительно искажены, в особенности при переходных процессах в первичных сети с большими токами КЗ и перехода работы ТТ в режим насыщения. Одни из таких случаев, который привёл к крупной аварии на Ростовской АЭС и выделении её на изолированную работу, описан в [23]. Из-за насыщения ТТ по причине большой величины остаточной магнитной индукции (порядка 86% от индукции насыщения), а также влияния апериодической составляющей тока КЗ, произошла излишняя работа ДЗШ 500 кВ при внешнем для защиты КЗ.

В данном разделе оцениваются факторы, оказывающие влияние на выход ТТ в режим насыщения, а также как данные факторы влияют и искажают измеряемые величины для устройств РЗ, получаемые с ТТ. К таким оказывающим влияние факторам можно отнести: величину отношения тока КЗ к номинальному первичному току ТТ, называемое кратностью, величину вторичной нагрузки ТТ, определяемую количеством подключённых устройств и сопротивлением кабеля от ТТ до устройства РЗ, вид КЗ в первичной сети, в вопросах насыщения чаще всего рассматриваются трёхфазные и однофазные КЗ, доля апериодической составляющей в первичном токе КЗ, величина остаточной намагниченности в долях от максимальной индукции насыщения [24].

Общее требование для правильной работы устройств РЗ, подключенных к вторичным цепям, можно выразить в отсутствии наличия режима насыщения на время, за которое устройству РЗ необходимо выявить КЗ и выдать воздействие на отключение (в случае если КЗ в зоне действия защиты) или время, за которое устройство определит, что КЗ для него является внешним, и команда на отключение будет заблокирована [25].

1.2.2 Модель трансформатора тока для анализа работы релейной защиты

Для моделирования ТТ используется схема замещения на рисунке 1.3. При отсутствии влияния посторонних факторов ток вторичной обмотки ТТ будет линейно пропорционален первичному току. В идеальном ТТ полностью отсутствуют потери, моделируемые нагревом сердечника и током намагничивания [26].

Допущения, представленные в модели для подключения РЗ: в условиях насыщения сердечников ТТ, как показали исследования, проведенные в Новочеркасском политехническом институте А. Д. Дроздовым и В. П. Глуховым [27], допустимо не учитывать частные циклы перемагничивания сердечников, выраженные в виде гистерезиса и присущие всем видам магнитных материалов [28]. В режиме насыщения происходит переход от одной крайней точки характеристики намагничивания до другой и сам путь данного перехода, выраженный гистерезисом, не оказывает особенного влияния на результирующие значения, следовательно, применение прямоугольной характеристики намагничивания (ПХН), представленной на рисунке 1.4 (а), является идеальным случаем и справедливо для схемы замещения ТТ на рисунке 1.4 (б). В то же время реальная характеристика намагничивания ТТ имеет наклон линейной части, отличный от 90 градусов. За счёт этого более близкой к реальной характеристике ТТ становится спрямлённая характеристика намагничивания (СХН). Далее такие характеристики намагничивания ТТ будут называться упрощёнными.

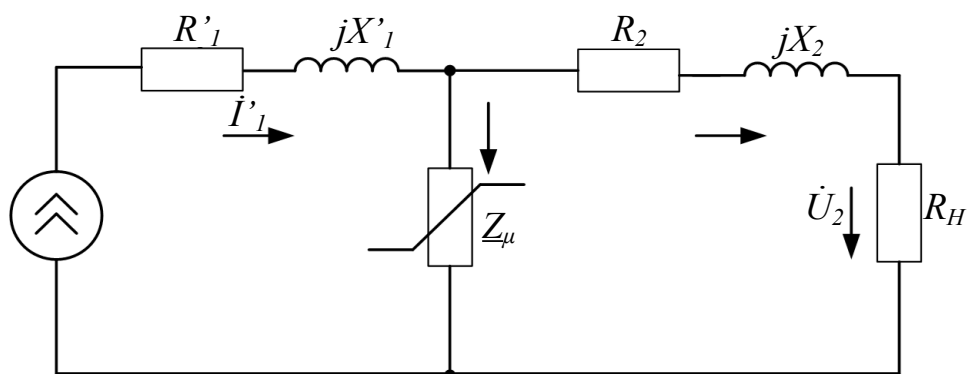


Рисунок 1.3 – Эквивалентная модель ТТ

Необходимо провести анализ корректности использования СХН для фиксации насыщения [29] ТТ и определить расчётные параметры ТТ в нормальном режиме при применении СХН с наклонным линейным участком.

Уравнения для разработки модели ТТ: основу модели составляют известные уравнения ТТ [30], выраженные в системе (1.1). В первую очередь в модели определяется рабочая магнитодвижущая сила (F_{sat} , А), обусловленная наличием тока намагничивания ТТ. Ток намагничивания определяется как разность первичного (i_1 , А) и вторичного тока (i_2 , А).

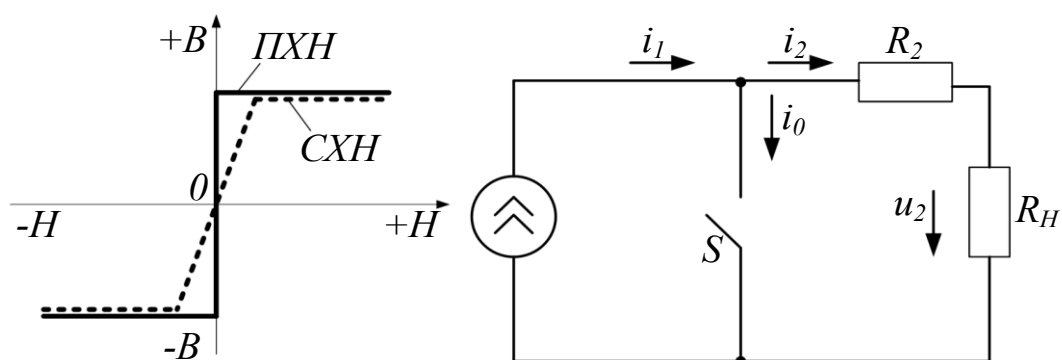


Рисунок 1.4 – Упрощённые характеристики ТТ (а)

упрощённая схема замещения ТТ с ПХН (б)

Геометрическими показателями, характеризующими магнитопровод ТТ, являются длина средней силовой линии магнитного поля (L_{cp} , м) и площадь поперечного сечения (S , м²). Параметр L_{cp} позволяет определить НМП в сердечнике (H , А/м), создаваемую током намагничивания.

Так как для модели применяется СХН, то первый наклонный участок характеристики ($B_{sat.off}$, Тл) моделируется с помощью применения коэффициента пропорциональности, зависящего от относительной магнитной проницаемости материала сердечника (μ , о. е.) и магнитной постоянной ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Для моделирования магнитной индукции с учетом насыщения ($\max(B)$, $\min(B)$, Тл) применяется блок PS Saturation, позволяющий ввести верхний и нижние пороги изменения магнитной индукции. Величина магнитной индукции ТТ определяется характеристикой стали магнитопровода [31].

По величине магнитной индукции и площади поперечного сечения магнитопровода можно найти значение магнитного потока в сердечнике ТТ (Φ , Вб), а затем через количество витков вторичной обмотки (w_2) определить суммарное потокосцепление (Ψ_2 , Вб). По закону электромагнитной индукции вычисляется вторичная ЭДС ТТ (e_2 , В) как производная потокосцепления во времени. Для определения напряжения на выводах вторичной обмотки (u_2 , В) необходимо от полученной ЭДС отнять падение напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки (R_2 , Ом) и индуктивности рассеяния вторичной обмотки (L_2 , Гн). Полная система уравнений ТТ с учётом введённых обозначений запишется как (1.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{sat} = i_1 w_1 - i_2 w_2; \\ H = \frac{F_{sat}}{L_{cp}}; \\ B = B_{sat.off} = \mu_0 \mu H; \\ B(0) = B_{res}; \\ \max(B) = B_{sat}; \\ \min(B) = -B_{sat}; \\ \Phi = BS; \\ \Psi_2 = \Phi w_2; \\ e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt}; \\ u_2 = e_2 - i_2 R_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Для анализа работы ТТ с упрощенными характеристиками намагничивания была разработана имитационная модель ТТ (рисунок 1.5) в

программной среде MATLAB Simulink [32] с использованием блоков библиотеки Simscape.

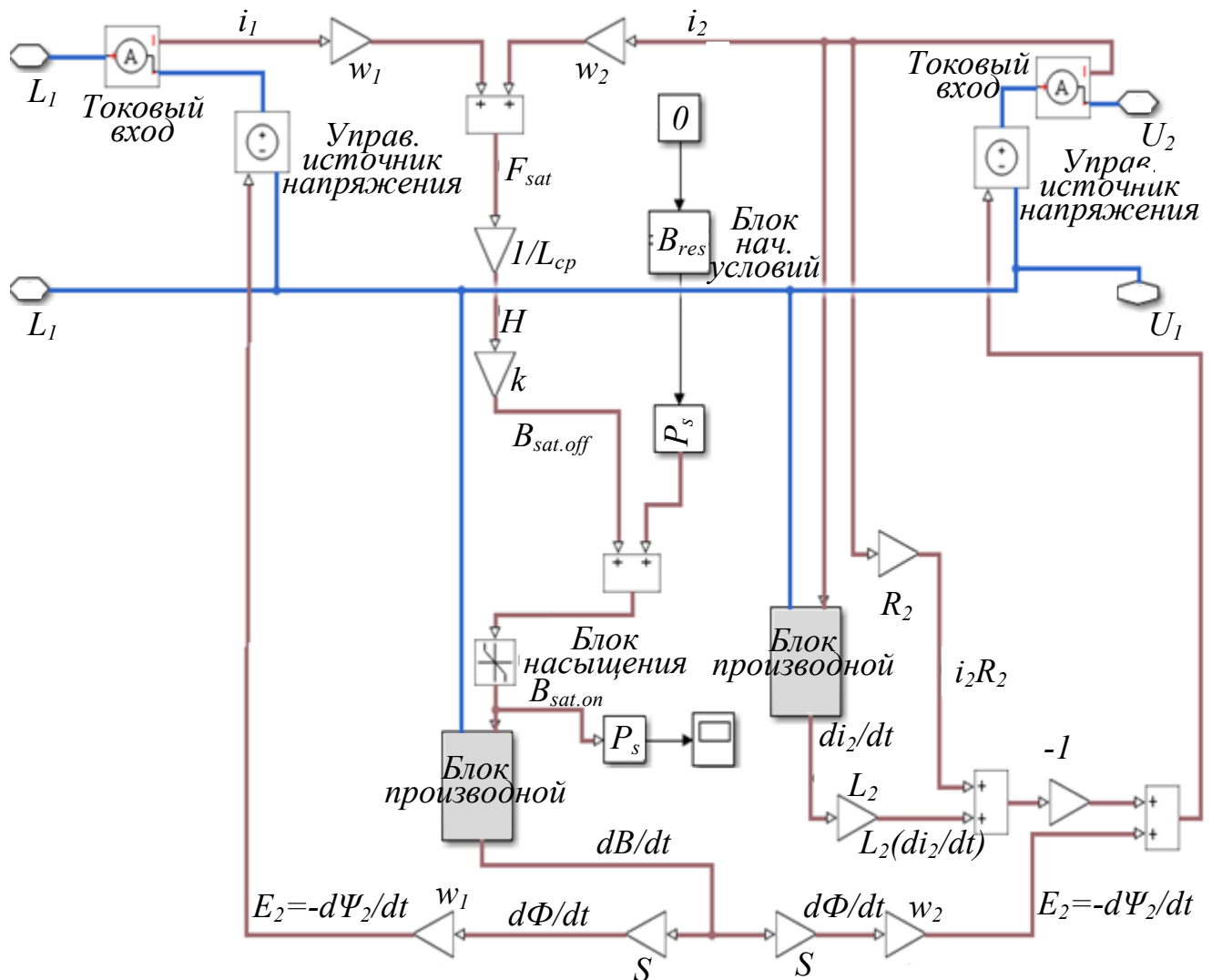


Рисунок 1.5 – Имитационная модель ТТ в программной среде MATLAB Simulink

С использованием модели ТТ производилось снятие вольтамперной характеристики (ВАХ) (рисунок 1.6). Фиксировались действующие значения тока и напряжения намагничивания на вторичной обмотке ТТ. Проверка корректности представленной модели ТТ производится по условию сравнении снятой ВАХ с ТТ и расчётной модели [33]. Картины ВАХ были получены для ТПЛ-10-50/5 (рисунок 1.7 а) и ТПЛ-10-75/5 (рисунок 1.7 б) с меньшей точкой напряжения намагничивания, сверенные с замеренными параметрами данных ТТ [34].

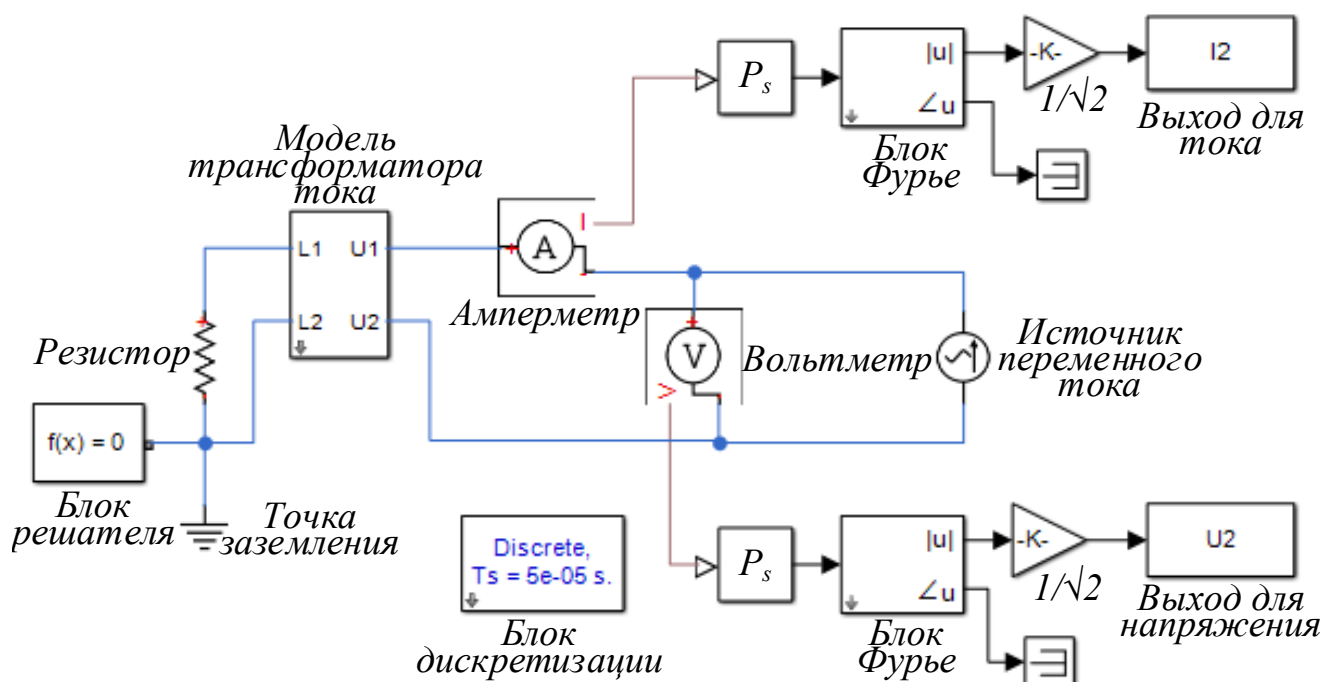


Рисунок 1.6 – Схема для снятия ВАХ исследуемой модели ТТ

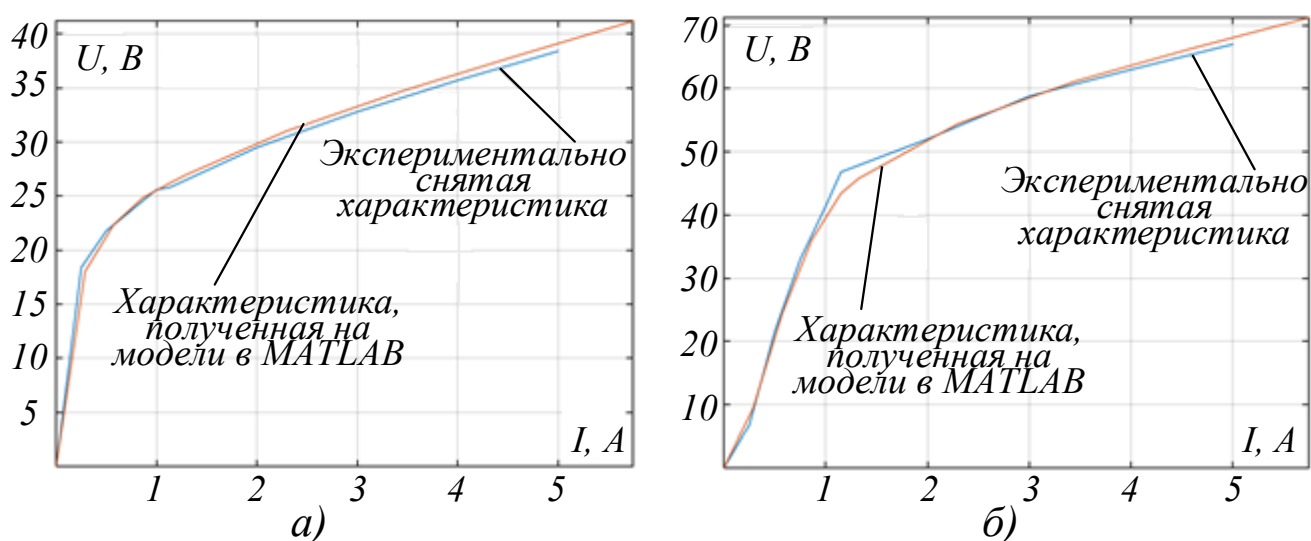


Рисунок 1.7 ВАХ для ТТ: а) Тип ТПЛ-10-50/5; б) Тип ТПЛ-10-75/5

Предельное напряжение намагничивания является той величиной напряжения, при достижении которой ТТ переходит в режим насыщения. Величина предельного напряжения намагничивания определяет точку перегиба ВАХ. В свою очередь режимом насыщения называется такой режим, при котором суммарный магнитный поток, не может быть полностью передан через сечение магнитопровода ТТ и частично замыкается по пути рассеяния (через воздух с большим магнитным сопротивлением). Данный режим характеризуется

горизонтальным участком ВАХ, возникающим после точки перегиба характеристики.

Анализ первого линейного участка ВАХ: Наклон линейного участка ВАХ характеризуется только параметрами материала магнитопровода в ненасыщенном состоянии. При наличии в магнитопроводе воздушного зазора, который используется у ТТ классов точности PR, TPY, TPZ, характеристика на линейном участке будет более пологой (похожей на СХН), следовательно, и величина погрешности ТТ в нормальном режиме у таких ТТ будет выше, чем у ТТ с характеристикой, близкой к ПХН. Пределы нормируемой погрешности при работе на линейном участке ВАХ представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Пределы допускаемых погрешностей вторичных обмоток ТТ для защиты согласно ПНСТ-283-2018

Класс точности	Предел допускаемой погрешности				
	При номинальном первичном токе			Полной при токе номинальной предельной кратности ε , %	При переходном режиме, %
	Токовой, %	угловой		-	-
		мин	срад	-	-
5P, 5PR	± 1	± 60	$\pm 1,8$	5	Не нормируют
10P, 10PR	± 3	Не нормируют		10	Не нормируют
TPY	± 1	± 60	$\pm 1,8$	10	$\varepsilon_{\max} \leq 10$
TPZ	± 1	180 ± 18	$5,3 \pm 0,6$	10	$\varepsilon_{\text{ас. max}} \leq 10$

При работе на линейном участке, искажений формы тока и напряжения не возникнет. Следовательно, можно использовать выражения для действующих значений токов и напряжений и определять сопротивления переменному току, которые будут справедливы на первом участке СХН [35]. По закону Ома выражение для действующего значения напряжения намагничивания (1.2):

$$\dot{U}_{\text{нам}} = X_{\mu} \cdot \dot{I}_{\mu}, \quad (1.2)$$

где X_{μ} – индуктивное сопротивление ветви намагничивания; $\dot{I}_{\mu}$ – действующее значение тока намагничивания.

Для оценки влияния вторичного контура сопротивление ветви намагничивания принято чисто индуктивным ввиду малых активных потерь в сердечнике ТТ. Все сопротивления, токи и напряжения приняты модулями их значений. Также не учитывается сопротивление рассеяния вторичной обмотки ТТ. Как правило вторичная нагрузка ТТ R_H имеет активный характер. В результате получена схема замещения ТТ на рисунке 1.8 для анализа работы ТТ при синусоидальных токах в нормальном установившемся режиме.

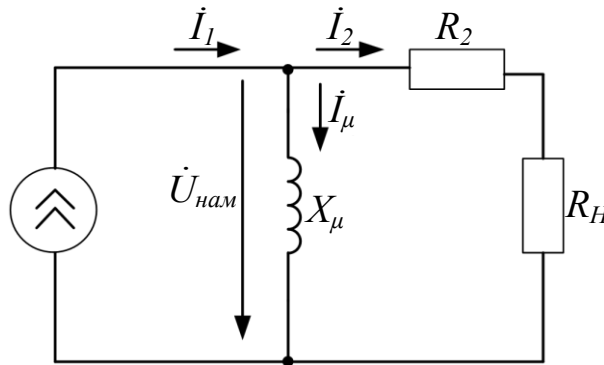


Рисунок 1.8 – Схема замещения ТТ при протекании синусоидальных токов

Наклон линейного участка СХН оказывает влияние на постоянную времени вторичного контура ТТ, определяемую как (1.3):

$$T_s = \frac{L_\mu}{R_2 + R_H} = \frac{X_\mu}{(R_2 + R_H)\omega}, \quad (1.3)$$

где ω – угловая частота электрической сети, рад/с.

Величины токов в схеме замещения распределяются обратно пропорционально сопротивлениям параллельных ветвей:

$$\frac{I_\mu}{I_2} = \frac{R_2 + R_H}{X_\mu}. \quad (1.4)$$

Выражая X_μ через постоянную времени вторичного контура (1.3) и подстановки результата в выражение (1.4) получено выражение (1.5):

$$\frac{I_\mu}{I_2} = \frac{R_2 + R_H}{T_s (R_2 + R_H)\omega} = \frac{1}{T_s\omega}. \quad (1.5)$$

В соответствии с [37] отношение тока I_μ к I_2 определяет величину токовой погрешности ТТ f_i . Для режима с номинальным первичным током по таблице 1.1 отношение токов I_μ/I_2 для ТТ класса точности 5Р, 5РР, ТРЗ, ТРУ составляет 0,01. Для ТТ класса точности 10Р, 10РР аналогичное отношение составит 0,03. Тогда на основании формулы (1.6):

$$T_s \geq \frac{1}{f_i \omega} \quad (1.6)$$

Следовательно, при частоте сети 50 Гц и номинальных синусоидальных токах постоянная времени вторичного контура ТТ, не должна быть ниже:

- 1) 318 мс для ТТ классов 5Р, 5РР, ТРЗ, ТРУ;
- 2) 106 мс для ТТ классов 10Р, 10РР.

Таким образом, требования к погрешности ТТ при их работе в нормальном режиме, автоматически выполняются, если ТТ будет иметь указанные выше постоянные времени вторичного контура. Далее модель ТТ интегрируется в представленную схему первичной сети (рисунок 1.9).

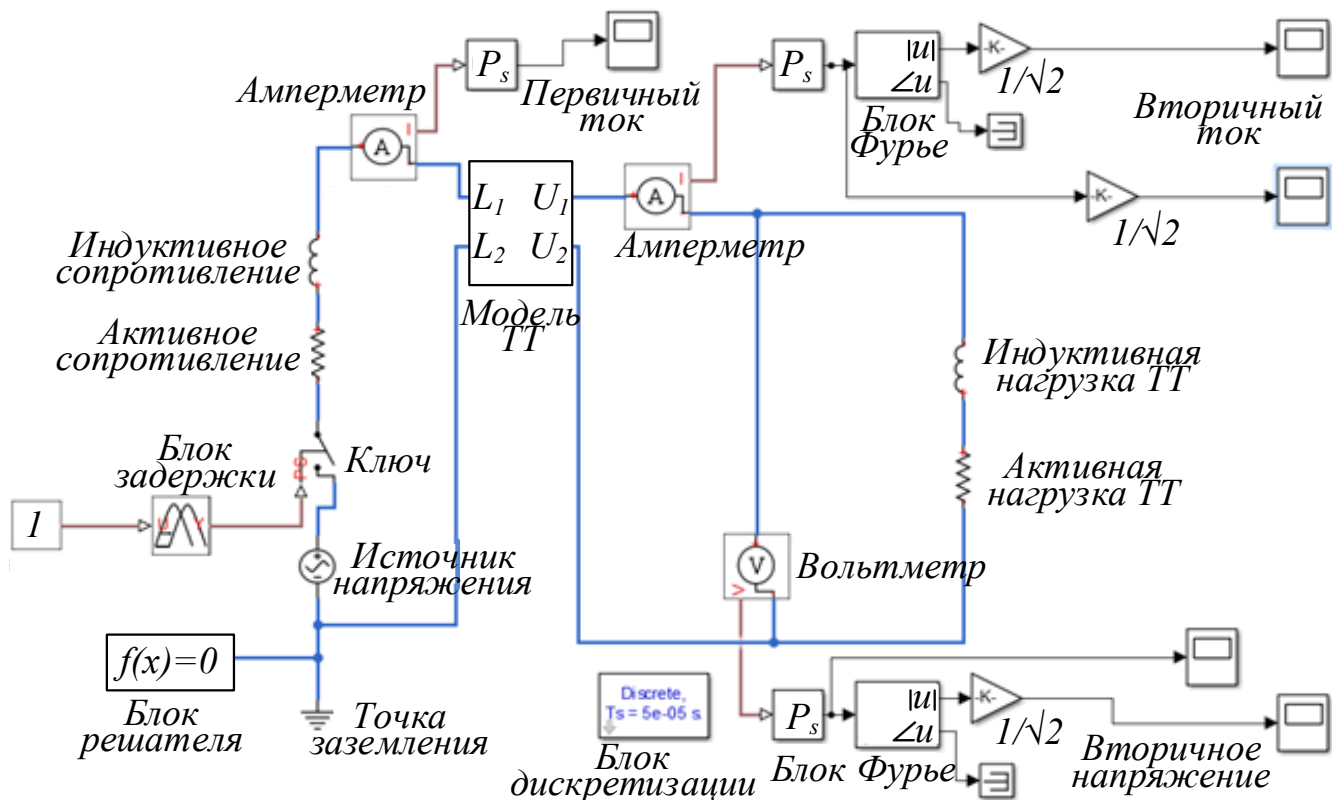


Рисунок 1.9 – Первичная схема с использованием модели ТТ

1.2.3 Оценка влияния насыщения и остаточной намагниченности трансформатора тока на работу релейной защиты

В связи с тем, что апериодическая слагающая тока КЗ накладывается только либо на положительные полупериоды синусоиды периодического тока КЗ, либо на отрицательные, а скорость её изменения незначительна по сравнению с периодической, большая её часть не трансформируется во вторичную обмотку, а проходит через сердечник ТТ в виде квазипостоянного магнитного потока, тем самым заполняя свободное пространное сердечника и мешая трансформации периодической составляющей (рисунок 1.12). При этом сердечник ТТ может иметь некое остаточное намагничивание, также имеющее положительный или отрицательный знак, вызванное возможной проверкой величины вторичного сопротивления ТТ постоянным током, или наложенным при снятии ВАР ТТ без последующего его размагничивания после проверки, или в случае включения ЛЭП на КЗ через АПВ в случае неуспешного самоустранения КЗ. Величина максимально возможной остаточной индукции составляет долю 0,86 от индукции насыщения и регламентируется п. 4.3 ГОСТ Р 58669-2019 [36]. Существует два пути при моделировании остаточной индукции ТТ:

Во-первых, остаточная индукция может быть представлена фиксированной константой и учтена через сложение с магнитным потоком вызванным первичным током КЗ (рисунок 1.10).

В этом случае ТТ не размагничивается при прохождении через него тока КЗ и может всегда остаться в режиме насыщения. Такой способ моделирования остаточной индукции является самым простым и распространённым в разных моделях ТТ [38]. Подходит данная модель только для определения первого момента выхода ТТ в режим насыщения и полностью соответствует ГОСТ Р 58669-2019 [36], так как в представленном стандарте не регламентируется размагничивание ТТ со временем.

Для устройств РЗ вышеуказанный режим является слишком тяжёлым. Из-за полного отсутствия размагничивания следует, что ТТ никогда не выйдет из

режима насыщения. Поэтому для более точного анализа разработан следующий вариант моделирования остаточной магнитной индукции.

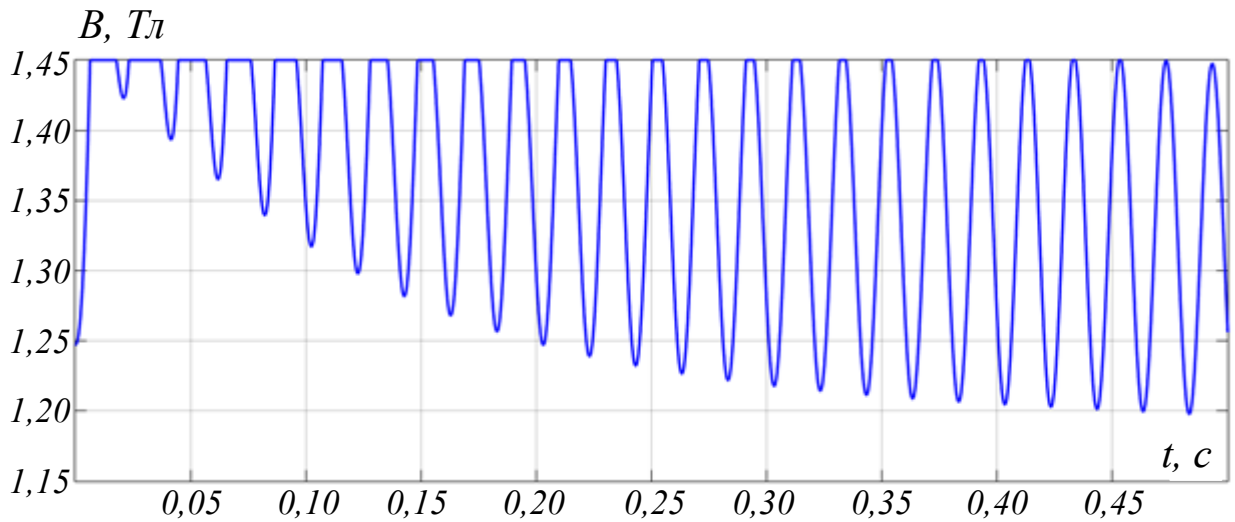


Рисунок 1.10 – Зависимость изменения магнитной индукции во времени при моделировании остаточной магнитной индукции константой

Второй способ реализован посредством применения блока «Initial condition» программной среды MATLAB Simulink (рисунок 1.11).

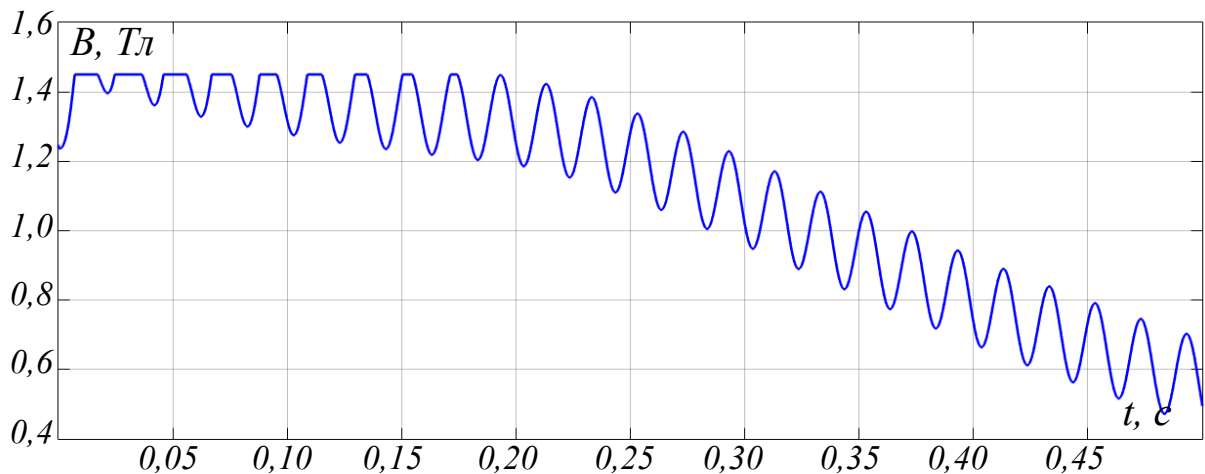


Рисунок 1.11 – Изменение величины магнитной индукции ТТ при влиянии аperiodической составляющей тока КЗ

Применение блока «Initial condition» позволяет задать только начальные условия для запуска системы, при этом последующее влияние на систему, в отличие от первого случая, будет полностью исключено. Со временем система возвращается к своему установившемуся режиму. Далее для анализа поведения

устройств РЗ будет использован второй вариант моделирования остаточной магнитной индукции. На рисунках T_a – величина постоянной времени первичной сети, с.

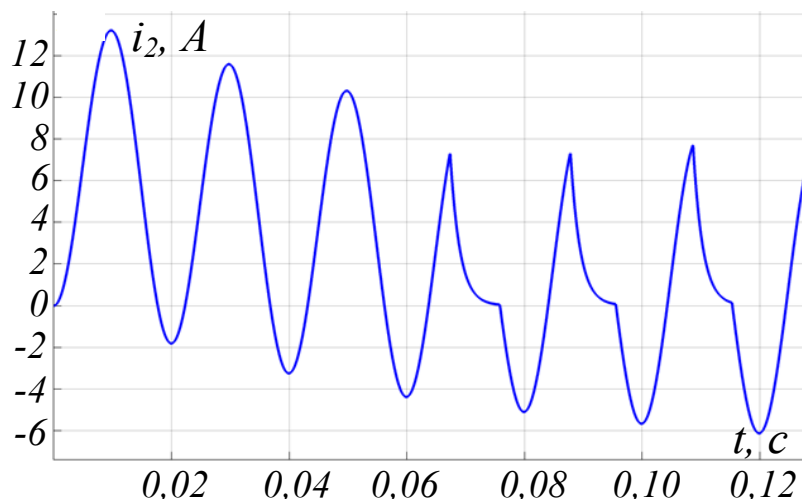


Рисунок 1.12 – Изменение величины вторичного тока КЗ с апериодической составляющей, T_a равна 0,1 с

Для оценки влияния работы ТТ в переходном режиме на действие устройств РЗ рассматриваются следующие ключевые параметры [39]:

- 1) изменение действующего значения вторичного тока КЗ;
- 2) изменение действующего значения тока намагничивания ТТ;
- 3) изменение угловой погрешности вторичного тока КЗ;

Для ТТ рассматривается режим при номинальных параметрах при токах номинальной предельной кратности. Доля остаточной намагниченности сердечника составляет 86%.

Главным условием для оценки является отрезок времени, когда ТТ выйдет из режима насыщения, как указано в таблице 1.2 и на рисунке 1.13.

Таблица 1.2 – Зависимость времени восстановления действующего значения вторичного тока КЗ от величины T_a

T_a , сек	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
t , сек	0,05	0,11	0,19	0,23	0,27	0,3	0,33

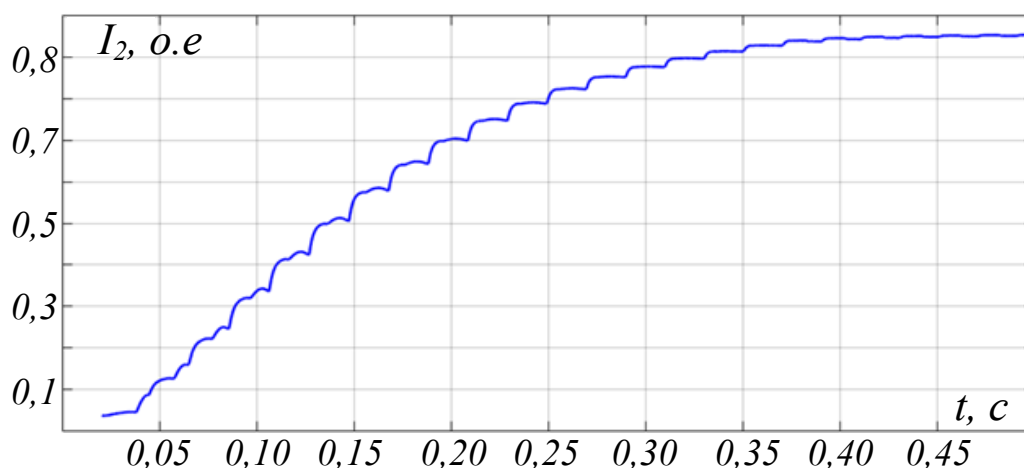


Рисунок 1.13 – Зависимость изменения действующего значения в долях вторичного тока КЗ от времени при номинальных параметрах ТТ с T_a равной 0,3 с

Измерение действующего значения вторичного тока КЗ актуально для работы защит МФТО и ТЗНП с нулевой выдержкой времени при близких КЗ в зоне их действия. То время, при котором ТТ начинает работать с допустимой погрешностью, является временем задержки срабатывания защиты. Контрольной точкой является момент, при котором доля величины вторичного тока при насыщении достигает параметра 90% от величины тока без учёта насыщения.

Так как при определении действующих значений током намагничивания является та доля первичного тока, которая не зафиксирована во вторичном токе, то условием для его определения является разность между величиной действующего значения первичного и вторичного тока $\dot{I}_\mu = \dot{I}_1 - \dot{I}_2$, как указано на рисунке 1.14. Измерение величины тока намагничивания актуально для электромеханических дифференциальных защит, так как в случаях внешних близких КЗ именно ток намагничивания является расчётным током небаланса в защите. Увеличение тока небаланса выше величины уставки может привести к ложному срабатыванию дифференциальной защиты [40].

Анализ изменения величины угла вторичного тока при работе ТТ в режиме насыщения является актуальным для действия защит, чувствительных к изменениям фазы тока. К таким защитам относятся ДЗ, ВЧБ, НВЧЗ, ДФЗ и т. д., как указано в таблице 1.3 и на рисунке 1.15.

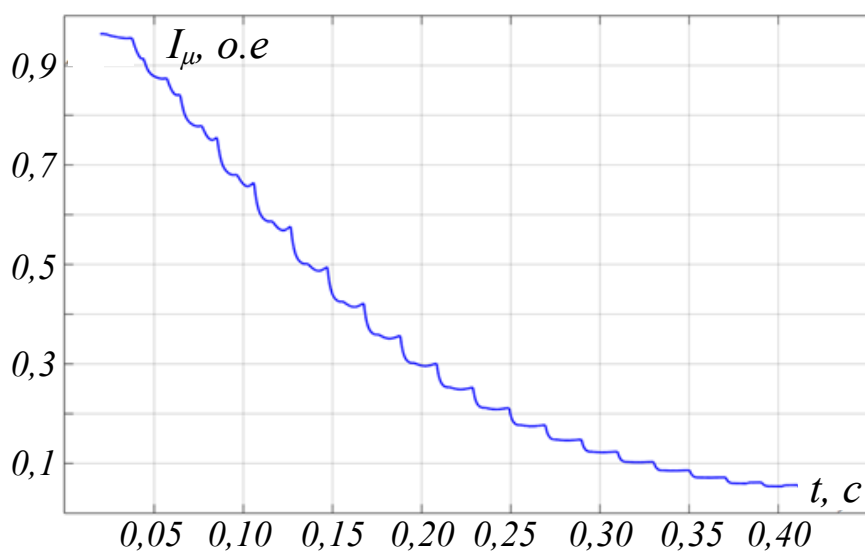


Рисунок 1.14 – Зависимость изменения тока намагничивания в долях при номинальных параметрах ТТ при T_a равной 0,3 сек

Таблица 1.3 – Максимальная наблюдаемая угловая погрешность в зависимости от величины T_a

T_a , сек	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
$\delta\varphi^\circ$, град	19	41	60	73	82	87	90

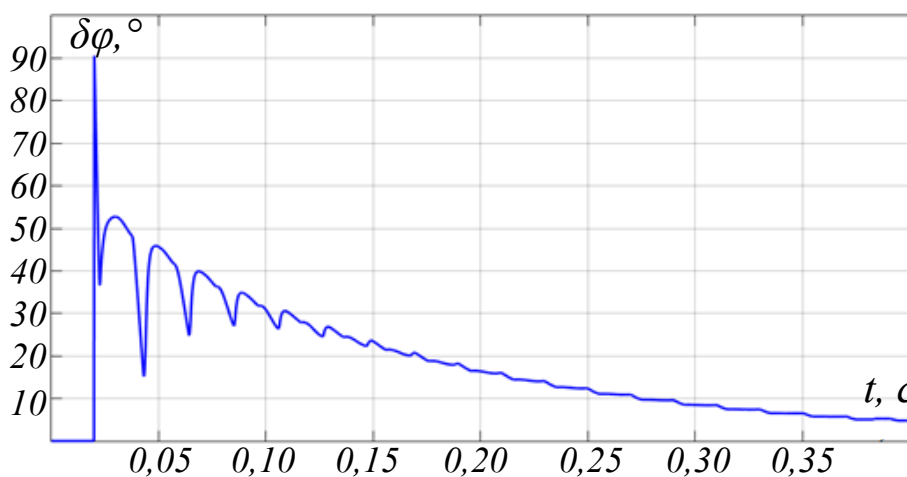


Рисунок 1.15 – Зависимость изменения угловой погрешности вторичного тока КЗ при номинальных параметрах ТТ при T_a равной 0,3 сек

Нарушение измерения угла происходит ввиду того, что искажается форма вторичного тока. Современные МП защиты работают по анализу первой гармоники входного сигнала. Посредством преобразования Фурье с извлечением

первой гармоники из искажённого сигнала фазовый сдвиг получается с результатом, отличным от действительного.

Для двух распространённых типов защит существуют следующие недостатки при наличии угловой погрешности в измерениях от ТТ в режиме насыщения: для ДЗ – выход замера сопротивления вне зоны характеристики защиты, что может привести к задержке на отключение, например при переходе из второй зоны в третью зону, или к отказу срабатывания в случае выхода из зоны действия самой чувствительной ступени. При КЗ в начале смежной ВЛ может случиться излишняя работа ДЗ при возможном попадании замера в первую зону характеристики. Для ДФЗ существует вероятность отказа защиты в случае образования промежутков в сигнале манипуляции по величине равных или превышающих уставку блокировки.

1.3 Влияние исправности цепей трансформатора напряжения на функционирование устройств релейной защиты

1.3.1 Принцип действия и существующие недостатки функции блокировки защиты при неисправностях в цепях напряжения

Существующий комплекс РЗ использует для получения информации из первичной сети замеры от вторичных обмоток измерительных ТТ и ТН. Замеры с ТТ являются основными ввиду того, что самым явным признаком возникновения КЗ является увеличение тока, и они используются абсолютно во всех функциях комплекса РЗ, тогда как замеры напряжения с ТН используются только для защит дистанционного и направленного принципа действия. В качестве дополнительного условия замеры напряжения могут использоваться на присоединениях с односторонним питанием при реализации МТЗ с пуском по напряжению, что позволяет снизить требования к выбору уставки МТЗ по условию отстройки от режима самозапуска двигателей и принять уставку более чувствительной. Следовательно, на транзитных линиях проблема неисправности

цепей напряжения наиболее актуальна для защит, основанных на дистанционном принципе работы, и для защит с органами направления мощности.

Одной из основных функций, которая позволяет выявить повреждение цепей напряжения, является блокировка при неисправности в цепях напряжения (БНН). Выходной сигнал данной функции может быть использован для различных целей. Это может быть блокировка тех функций защиты, которые при обрыве цепей напряжения могут отработать ложно или излишне, а также ввод дополнительных функций, позволяющих обеспечить защиту элемента от всех видов КЗ без использования цепей напряжения.

Существующие принципы реализации БНН широко распространены для всех устройств ДЗ. Основным принципом, применяемым в защитах как на электромеханической базе, так и на МП базе, является сравнение напряжений, получаемых с цепей напряжения «звезды» и «треугольника» ТН. Условием срабатывания БНН при этом является разница между данными напряжениями, как правило, больше 10% по величине. В электромеханических устройствах РЗ для создания БНН наиболее распространено реле КРБ-12 [41].

Схема подключения реле представлена на рисунке 1.16 (а), на рисунке 1.16 (б) представлены векторные диаграммы в результате подачи напряжения «звезды» и «треугольника» на обмотки реле в нормальном режиме. Реле реагирует на составляющие небаланса $U_{нб1}$ и $U_{нб2}$, указанные в формуле (1.7). В нормальном режиме составляющие компенсируют друг друга, и итоговый результат воздействия на реле практически равняется нулю.

В случае отсутствия цепи «треугольника» реализовать способ, основанный на сравнении с напряжением «звезды», становится невозможно, тогда для выдачи команды БНН применяется метод, основанный на сравнении симметричных составляющих, при котором чаще всего используются параметры обратной последовательности. Принцип метода заключается в выявлении тех факторов и условий, которые свойственны обрыву цепей ТН, при этом дополнительно ставится задача блокировки функции БНН при возникновении КЗ. Главным признаком обрыва цепей напряжения является возникновение напряжения U_2 из-за несимметрии во

вторичных цепях. При этом осуществляется контроль величины тока обратной последовательности I_2 , или приращения величины тока ΔI_2 , так как в нормальном нагрузочном режиме параметры тока I_2 не будут превышать величины уставки, выбранной по условию отстройки от небаланса. Существует также третий способ, основанный на контроле состояния предохранителей или автоматических выключателей в каждой фазе цепей напряжения во вторичных цепях, где сигнал от БНН появляется при перегорании или потере контакта.

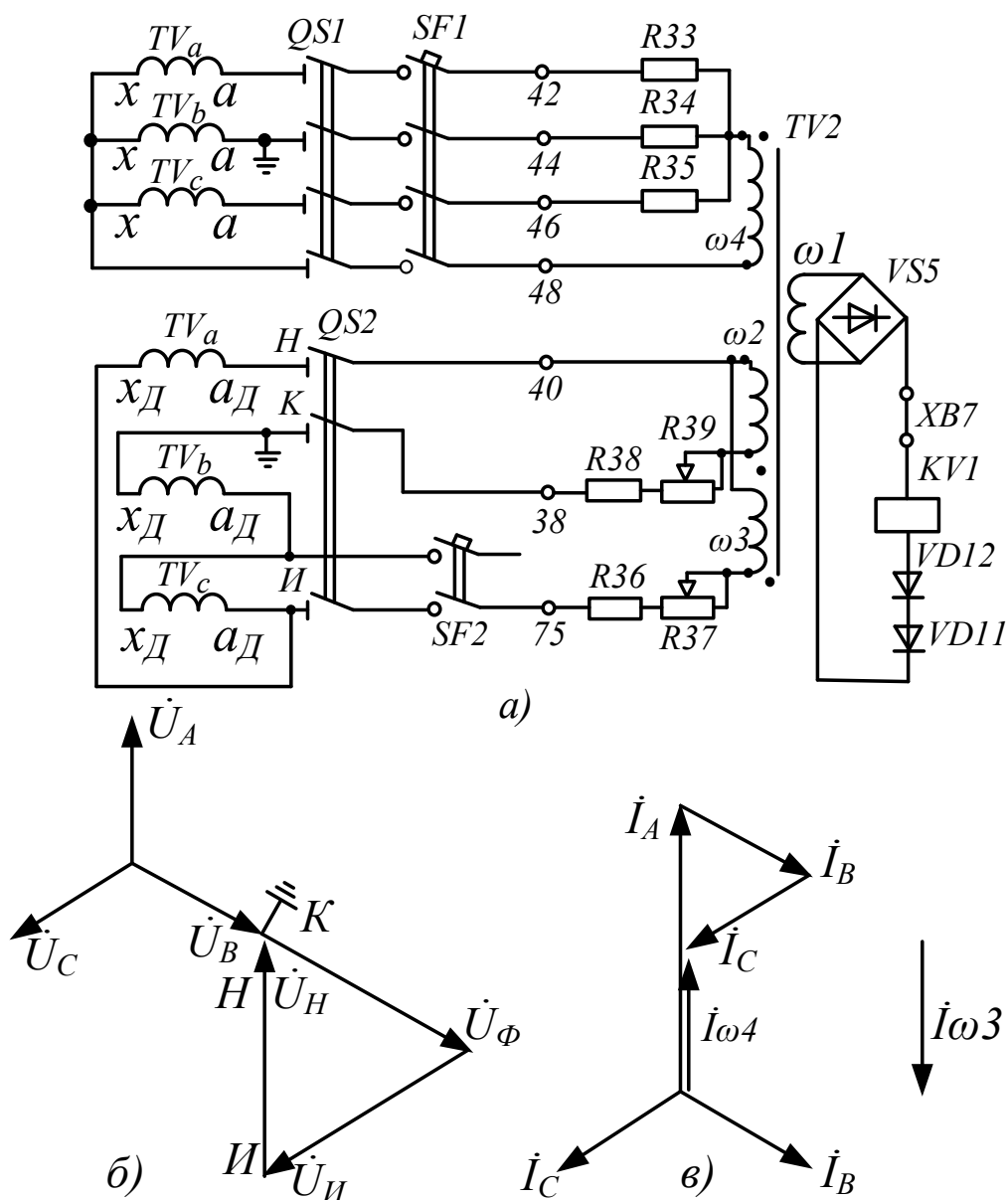


Рисунок 1.16 – БНН типа КРБ-12: а) принципиальная схема подключения к вторичным цепям ТН; б) векторная диаграмма напряжений; в) векторная диаграмма токов

$$\begin{aligned} \dot{U}_{нб} &= 2\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - \dot{U}_{НК} / \sqrt{3} - \dot{U}_{НИ} / \sqrt{3} = \dot{U}_{нб1} + \dot{U}_{нб2} \\ где \dot{U}_{нб1} &= (3\dot{U}_{0Y} - 3\dot{U}_{0\Delta} / \sqrt{3}); \dot{U}_{нб2} = (\dot{U}_A - 3\dot{U}_{НИ} / \sqrt{3}) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Возможна ложная работа ДЗ при БНН. Несмотря на все преимущества и простоту традиционных методов БНН существует ситуация, при которой происходит отказ как принципа сравнения «звезды» и «треугольника», так и способа через U_2 и I_2 с контролем состояния коммутационных аппаратов цепей напряжения. Это происходит при симметричном трёхфазном обрыве цепей ТН в первичной сети, например, при ошибочном размыкании разъединителя ТН от контролируемой системы (или секции) шин [41]. В этом случае системы напряжений на «звезде» и «треугольнике» остаются пропорциональными друг другу, параметров обратной последовательности не появляется, а предохранители остаются целыми. При этом команды БНН не поступает, что может привести к ложной работе ДЗ, так как измеряемое напряжение для данной защиты опускается практически до нуля. Для электромеханических устройств, например, комплекта ЭПЗ-1636, или микроэлектронных устройств (ШДЭ 2802) описанное последствие отказа БНН является неизбежным, так как реализовать иной принцип на данных комплексах защиты не представляется возможным [42]. В МП терминалах часть производителей решила эту проблему, и в логику работы устройств была включена функция выявления трёхфазного обрыва цепей напряжения. Один из представленных алгоритмов показан на рисунке 1.17 [43].

Уставка измерительного органа (ИО) «I1» определяет максимальный нагрузочный ток по прямой последовательности. ИО «I1мин» осуществляет контроль протекания тока через выключатель. В том случае, если при включении терминала подводимое напряжение близко к нулю и ток I1 находится в пределах нагрузочного, происходит срабатывание БНН. Время, на которое схема вводится в работу, определяется фиксированной уставкой «ТобрывВыкл», равной 200 мс. Логика определения обрывов при включении введена постоянно, и программная накладка зафиксирована в положении «НобрывВкл» = 1.

Недостатком данной схемы является наличие ИО « $I_{\text{мин}}$ » ввиду того, что задание данной уставки дискретное и отличное от нуля; как правило, уставка задаётся в долях от номинального тока ТТ, и ограничена по минимальному диапазону. Линия может опробоваться в одностороннем режиме, и если в этом случае произойдет трёхфазный обрыв цепей напряжения, то схема логики не выдаст сигнал на БНН ввиду отсутствия достаточного тока и, как следствие, сигнала «1» в схеме логики «И» от « $I_{\text{мин}}$ » не будет, что может привести к ложной работе пусковых органов ДЗ [44].

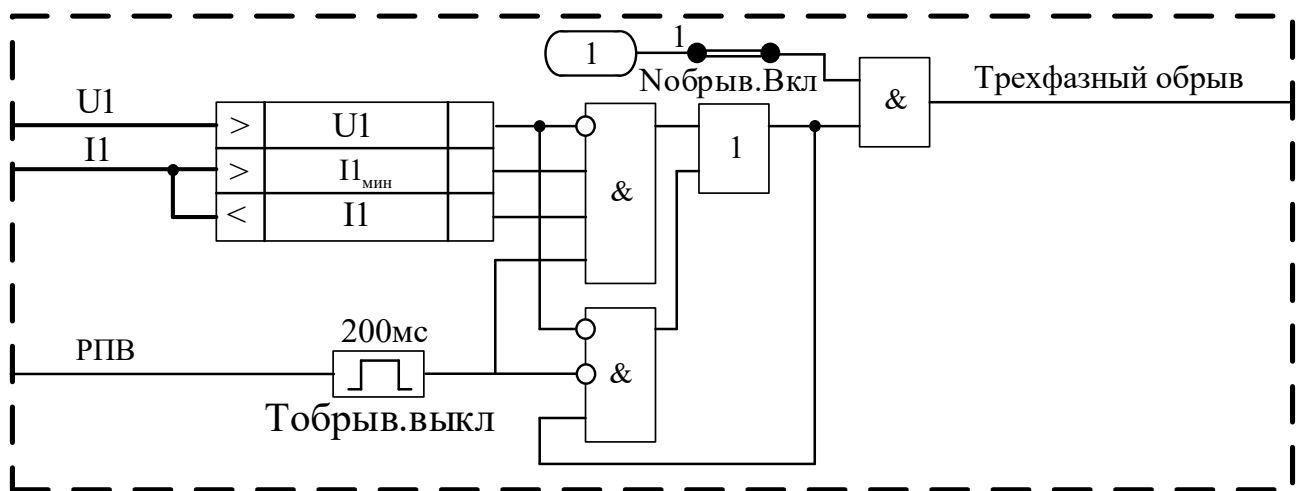


Рисунок 1.17 – Определение обрыва цепей напряжения при включении

Для реализации логики БНН от трёхфазного обрыва предлагается применение способа по приращению составляющей прямой последовательности тока ΔI_1 и ΔU_1 , а также действующего значения напряжения U_1 . Логика работы алгоритма заключается в следующем. При трёхфазном обрыве цепей напряжения, как правило, значение величины нагрузки по ЛЭП остаётся неизменным, при этом U_1 опускается до околонулевых значений без учета небольшого напряжения небаланса. Похожим режимом, при котором напряжение на шинах опускается до нулевых величин, является близкое трёхфазное КЗ. Однако при КЗ, особенно близком, величина тока I_1 изменяется значительно, что может служить условием блокировки БНН при трёхфазном обрыве. Следующим похожим условием, при котором отсутствует изменение тока, но при этом величина напряжения близка к

нулю, является отключённое состояние ВЛ в схеме, когда цепи напряжения для ДЗ подводятся не от шинных ТН, а от ТН, находящегося на самой ЛЭП. Тогда при постановке ЛЭП под напряжение защита изначально может находиться в заблокированном состоянии из-за действия БНН.

В этом случае актуально использовать дополнительный орган, фиксирующий изменение приращения напряжения ΔU_1 , так как при обрыве цепей напряжения в рабочем режиме данное изменение напряжения присутствовать будет (рисунок 1.18).

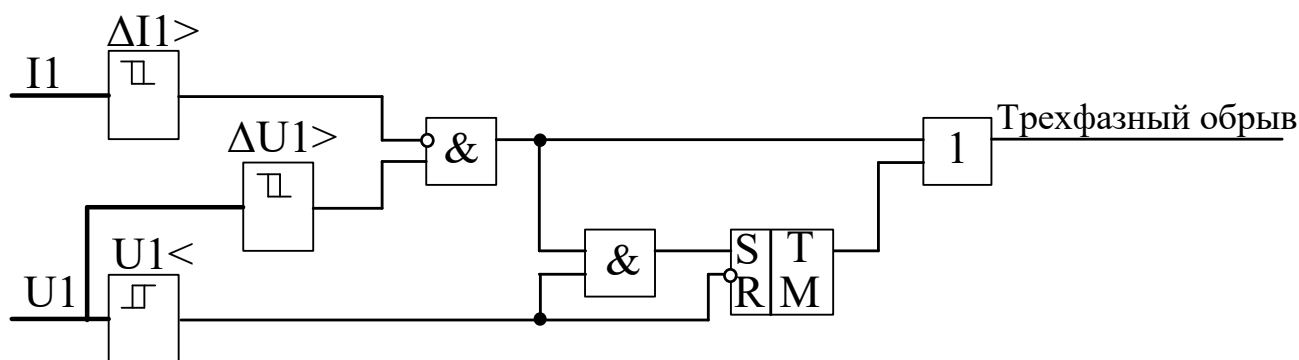


Рисунок 1.18 – Определение трехфазного обрыва цепей напряжения по приращению составляющих прямой последовательности

Проблем, связанных с неисправностями цепей напряжения, практически полностью лишены комплексы РЗ присоединений 330 кВ и выше. В соответствии с п. 20 приказа Минэнерго России № 101 [45] регламентируется применение двух ТН для ЛЭП классом напряжения от 500 кВ, что приводит к существенному снижению вероятности потери цепей напряжения.

Также в соответствии с требованием п. 48 приказа № 101 на ЛЭП напряжением от 330 кВ необходимо реализовывать две независимые основные защиты. Одной из таких защит чаще всего оказывается ДФЗ либо ДЗЛ, которые по своему принципу действия не требуют наличия цепей напряжения. Указанные требования приводят к значительному росту затрат собственников объектов энергетики 500 кВ и выше, но в конечном итоге позволяют существенно снизить

вероятность как ложной работы защит, так и отказа защит при потере цепей напряжения.

1.3.2 Способы предотвращения неправильных срабатываний релейной защиты, при отказе устройства блокировки при неисправностях в цепях напряжения

Потеря цепей напряжения является актуальной проблемой, способной привести к серьёзным последствиям от перерыва электроснабжения из-за ложного действия устройств РЗ или к потере защиты ЛЭП, так как большей части устройств РЗ необходимы цепи напряжения для правильной работы. Главный недостаток по возможной ложной работы в основном распространяется на ДЗ. Поскольку ДЗ является защитой минимального действия, то при потере цепей напряжения замер сопротивления становится практически равным нулю и попадает в зону характеристики срабатывания защиты, что и приводит к её ложной работе. Одним из возможных способов снизить вероятность неправильного действия является применение дополнительных контролирующих органов по току. Чаще всего в качестве такого контролирующего органа может использоваться блокировка при качаниях (БК), так как она идет в составе любой ДЗ и осуществляет контроль наличия тока I_2 . Пусковая уставка по току I_2 выбирается по условию обеспечения отстройки от небаланса при нормальном нагрузочном режиме, и, следовательно, в нормальном режиме при обрыве цепей напряжения срабатывания БК не произойдет. В основном под данную блокировку заводятся первые ступени ДЗ либо вторые быстродействующие ступени, уставка по времени которых не превышает 1,5 секунды [46]. Однако для полного предотвращения ложных отключений под БК могут быть заведены все ступени ДЗ, включая вторую медленнодействующую и третью.

Для большей части МП устройств РЗ имеются грубые и чувствительные органы по приращению тока для функции БК. Уставка для грубых органов выбирается по условию обеспечения требуемой чувствительности при КЗ в конце

защищаемой ЛЭП и отстройки от тока небаланса при качаниях и асинхронном ходе. Под грубые органы заводятся первые ступени ДЗ. Уставка чувствительных органов выбирается только по условию обеспечения чувствительности в конце зоны дальнего резервирования для защиты смежного элемента. Уставку по условию отстройки для последних ступеней ДЗ производить не требуется, так как от режима качаний они уже отстроены по времени. Для электромеханических комплектов РЗ имеются следующие недостатки при заведении всех ступеней ДЗ под БК. Первым недостатком является использование в качестве устройства, на котором реализуется принцип БК, реле КРБ-126 или КРБ-125. КРБ-125 по принципу функционирования использует для своей работы цепи напряжения и в качестве блокировки от их обрыва подойти не может. В КРБ-126 используется фильтр тока обратной последовательности, что подходит под требования блокировки. Однако при применении только тока I_2 существует вероятность отказа защиты при трёхфазных симметричных КЗ в зоне действия защиты, при которых несимметрия отсутствует. Это может компенсироваться тем фактом, что даже при симметричных КЗ в начальный момент времени возникает небольшая несимметрия, вызванная либо неоднородностью самой сети, либо неодновременностью замыкания контактов выключателя при включении, например, ЛЭП на заземляющий нож [47]. Однако даже само наличие данного явления не является надежным условием для срабатывания БК, так как оно является нерасчетным и непрогнозируемым. Следующим недостатком заведения всех ступеней ДЗ под БК для устройств ЭПЗ-1636 является отсутствие грубого и чувствительного пускового органа. В отличие от МП устройств применяется только реле КРБ-126, и, следовательно, реле должно удовлетворять требованию чувствительности уже в зоне дальнего резервирования и быть отстроенным от небаланса при качаниях, чего добиться значительно сложнее. Последним недостатком такого способа защиты от обрыва цепей напряжения является то, что реле КРБ-126 после срабатывания вводит ДЗ в работу на непродолжительное время, после этого оно снова блокирует защиту [48]. Поэтому существует возможность полной блокировки защиты, например, при переходе однофазного

КЗ в междуфазное, когда в случае однофазного КЗ хватило тока I_2 для пуска блокировки, при этом пустившейся ступени ТЗНП не хватило времени, чтобы отработать, а во время наличия междуфазного КЗ ДЗ уже заблокирована от БК.

Следующим недостатком заведения последних ступеней ДЗ под БК является проблема обеспечения требуемой чувствительности при дальнейшем резервировании смежных элементов. Как известно, современные МП терминалы РЗ используют в своих алгоритмах не полные значения токов I_1 и I_2 , а составляющие их приращения ΔI_1 и ΔI_2 . Как правило к крупным подстанциям (ПС) может подключаться более десятка присоединений, следовательно, в случае отказа защиты на одном из присоединений смежные элементы электрической сети будут отключаться не одновременно, а каскадно, так как не на всех защитах уставки по времени для последних ступеней выбраны одинаковыми, а также в связи с тем, что после каждого следующего отключения образуется новая схема сети с новыми параметрами. Например, уставка по приращению тока $\Delta I_2 = 100$ А. После первого отключения установившееся значение тока I_2 стало 75 А, после второй коммутации значение установившееся значение тока I_2 стало 150 А, однако приращение с 75 до 150 А составило $\Delta I_2 = 75$ А, что меньше уставки рассматриваемой защиты, следовательно, происходит отказ её срабатывания.

1.3.3 Обоснование применения аварийной максимальной токовой защиты

Помимо блокировки функций комплекса РЗ, которые могут сработать ложно или излишне при обрыве ЦН, п. 43 Приказа №101 регламентирует применение в составе комплекса РЗ ЛЭП аварийной МТЗ (АМТЗ), вводимой в работу при наличии команды БНН [49, 50, 51].

АМТЗ должна обеспечивать чувствительность при всех видах КЗ в конце защищаемого элемента. Требование к чувствительности для токовых защит обеспечивается при $K_{\text{ч}} \geq 1,5$ с учётом отключения присоединения со смежной стороны. При этом уставка АМТЗ должна проверяться по условию отстройки от

длительно допустимого тока нагрузки (ДДТН) и аварийно допустимого тока нагрузки (АДТН). Алгоритм ввода АМТЗ представлен на рисунке 1.19.

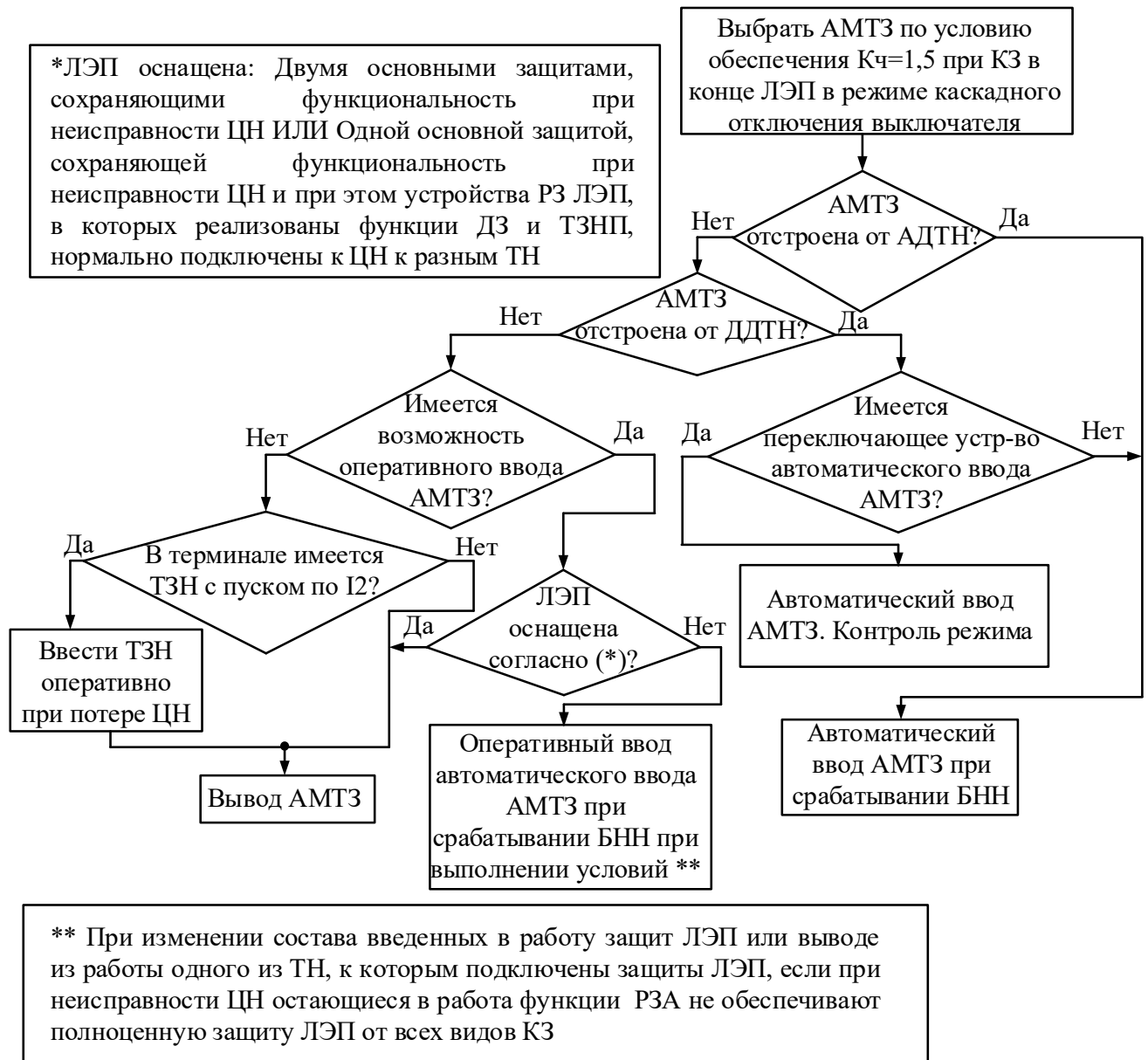


Рисунок 1.19 – Алгоритм условий ввода АМТЗ

АМТЗ может включать в свой состав классическую МТЗ, использующую фазные замеры токов, линейные замеры токов, а также ТЗОП и ТЗНП, реагирующие на составляющие обратной и нулевой последовательности I_2 и $3I_0$. При использовании только классической МТЗ необходимо обеспечение чувствительности для всех видов КЗ. При комбинировании защит однофазные КЗ можно отключать от ТЗНП, несимметричные КЗ выявлять при помощи ТЗОП, а

уставку для фазной или линейной МТЗ выбрать только для трёхфазных КЗ. Это позволит повысить величину уставки, сохранив требуемую чувствительность.

На основании рисунка 1.19 предполагаются ситуации, когда АМТЗ может вводиться оперативно или автоматически. Автоматический ввод АМТЗ возможен при гарантированной отстройке уставки от токов максимального нагрузочного режима. Если АМТЗ от них не отстроена, например, для обеспечения защиты линии большой протяжённости, где токи КЗ сопоставимы или даже меньше нагрузочных, то тогда осуществляется оперативный ввод АМТЗ по команде диспетчера. Диспетчер должен подготовить режим для ввода АМТЗ во избежание её ложной работы. Для этого в диспетчерских центрах должны формироваться таблицы с указанием того, на каких присоединениях АМТЗ не отстроена от нагрузки и где нужно вести режим, ограничением для которого является величина уставки АМТЗ. Это может привести к большой сложности работы, особенно если неисправность произошла с ТН на объекте, на котором находится много присоединений. К тому же главное отличие оперативного ввода АМТЗ от автоматического заключается в том, что при использовании оперативного ввода ЛЭП на некоторый промежуток времени находится без защиты. Это может быть критичным в случае отсутствия на ПС дежурного оперативного персонала, и время ввода АМТЗ будет определяться временем приезда оперативно-выездной бригады.

1.4 Влияние переходного сопротивления электрической дуги на работу дистанционной защиты

1.4.1 Анализ влияния переходного сопротивления дуги на замеры сопротивления

Применение ДЗ позволяет реализовать более стабильный тип защиты линий, в отличие от токовых, однако ДЗ для своей работы необходимо использовать цепи напряжения. В связи с тем, что сопротивление ВЛ довольно статичный параметр и не зависит от мощности системы, то даже при увеличении

тока КЗ будет наблюдаться бóльшее уменьшение напряжения на шинах ПС и общий параметр измеряемого сопротивления останется без изменений согласно закону Ома $\underline{Z} = \dot{U}/\dot{I}$. При этом помимо сопротивления линии в измеряемой величине, которая сравнивается с уставкой характеристики ДЗ, может также быть заложено дополнительное переходное сопротивление в месте возникновения КЗ в виде статического сопротивления опоры ЛЭП или сопротивления дуги между фазными проводниками. Так как сопротивление дуги является переменным нестабильным параметром, то необходимо произвести оценку его влияния при использовании динамической модели и сравнить результаты с классическими методами расчёта дуги.

Вопросу влияния дуги на работу ДЗ посвящены исследования [52, 53, 54], где указывается, что дуга может оказывать негативное влияние на работу ДЗ, однако в действующей нормативной документации в соответствии с п. 11 приказа Минэнерго № 546 [46] указывается, что «при оценке выполнения требований чувствительности устройств РЗ в качестве расчетного должно приниматься металлическое КЗ с величиной переходного сопротивления в месте КЗ, равной нулю».

Основной особенностью измерения сопротивления защитой при КЗ через переходное сопротивление является различие токов, протекающих в месте установки защиты и в месте повреждения. Указанное иллюстрируется на рисунке 1.20, где $\dot{E}_{c1}$, $\dot{E}_{c2}$, $\underline{Z}_{c1}$, $\underline{Z}_{c2}$ – эквивалентные ЭДС и сопротивления систем; $\underline{Z}_{ВЛ1}$, $\underline{Z}_{ВЛ2}$ – сопротивления участков защищаемой ВЛ до места повреждения; R_δ – переходное сопротивление в месте повреждения.

При КЗ в конце ЛЭП через переходное сопротивление ток $\dot{I}_1$ на входе ДЗ, установленной в точке 1, является долей суммарного тока $\dot{I}_1 + \dot{I}_2$, протекающего через переходное сопротивление R_δ . Значение замера сопротивления $\underline{Z}_{зам}$ в месте установки ДЗ:

$$\underline{Z}_{зам} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{I}_1 \underline{Z}_{ВЛ1} + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) R_\delta}{\dot{I}_1} = \underline{Z}_{ВЛ1} + \left(1 + \frac{|\dot{I}_2| e^{j\varphi_2}}{|\dot{I}_1| e^{j\varphi_1}} \right) R_\delta. \quad (1.8)$$

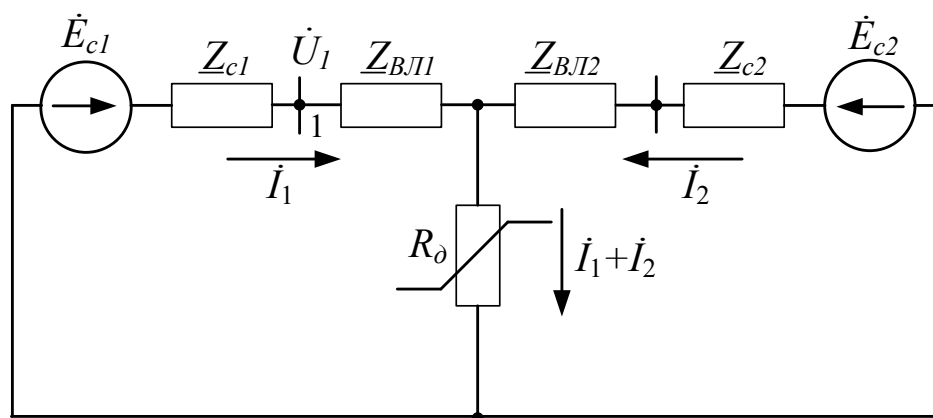


Рисунок 1.20 – Эквивалентная схема замещения электрической системы при КЗ через переходное сопротивление

Из формулы (1.8) следует, что на замер сопротивления в месте установки защиты оказывают влияние как величины токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$, так и их начальные фазы φ_1 и φ_2 . При использовании классического подхода основой расчёта является определение параметров токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$, расчёт сопротивления дуги по классической модели в соответствии с формулой (1.10), а затем подстановка расчётных значений в формулу (1.8) для определения итогового замера сопротивления. При этом не учитывается влияние сопротивления R_d на параметры режима системы и изменение токов в связи с появлением этого сопротивления, что является первым недостатком применения классического метода. Вторым недостатком является допущение о том, что сопротивление R_d является линейным, в то время как согласно исследованиям [53, 55, 56] ВАХ дуги имеет нелинейный вид. Применение динамической модели дуги позволяет избавиться от указанных недостатков и произвести анализ показаний замеров ДЗ, близких к действительным.

В работах [57, 58] указано, что электрическая дуга оказывает особое влияние на защиты, реализованные на дистанционном принципе действия, так как дуга влияет сразу на два условия правильности работы защиты: на возможность отказа защиты и на возможность ее излишнего срабатывания. В меньшей мере сопротивление дуги оказывает влияние на защиты, основанные на измерении тока, так как наличие переходного сопротивления, вызванного дугой, приводит

только к уменьшению тока КЗ, и может вызвать только отказы в действии, но не излишнее срабатывание.

Так как электрическая дуга представляет собой ионизированное вещество или среду, возникшую под влиянием внешнего электромагнитного поля, то дуговые явления рассматриваются не только в части их влияния на ток КЗ и работу РЗ, но и во многих других применениях, например, исследование гашения дуги в коммутационных аппаратах, дуга при электросварке и в сталеплавильных печах, модели частичных разрядов при исследовании слабых дуговых явлений для реализации диагностических методов и др. При этом основа модели остается практически неизменной и базируется на известном уравнении Касси (1.9), используемом при анализе устойчивости горения дуги в электрических цепях [59]:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right), \quad (1.9)$$

где g – проводимость столба электрической дуги, 1/Ом; τ – постоянная времени, с; U_c – характеристическое напряжения столба дуги, В; u – мгновенное значение напряжения на столбе дуги, В; t – время, с.

1.4.2 Описание и верификация динамической модели электрической дуги

Имитация дугового разряда осуществляется с применением метода пространства состояний - математического аппарата, предназначенного для анализа и моделирования линейных динамических систем. Данный подход позволяет характеризовать и анализировать изменение системы во времени через задание её переменных состояния, входных и выходных параметров. Внутреннее состояние системы определяется совокупностью переменных состояния, отражающих её динамические свойства. Вся динамика модели описывается системой уравнений состояния, устанавливающих взаимозависимости между аргументами и выходными параметрами. Взаимодействие между компонентами системы реализуется через систему структурных блоков. Модель дуги на

рисунке 1.21 основана на модели [60], которая изначально предназначалась для сварочных процессов и технологий.

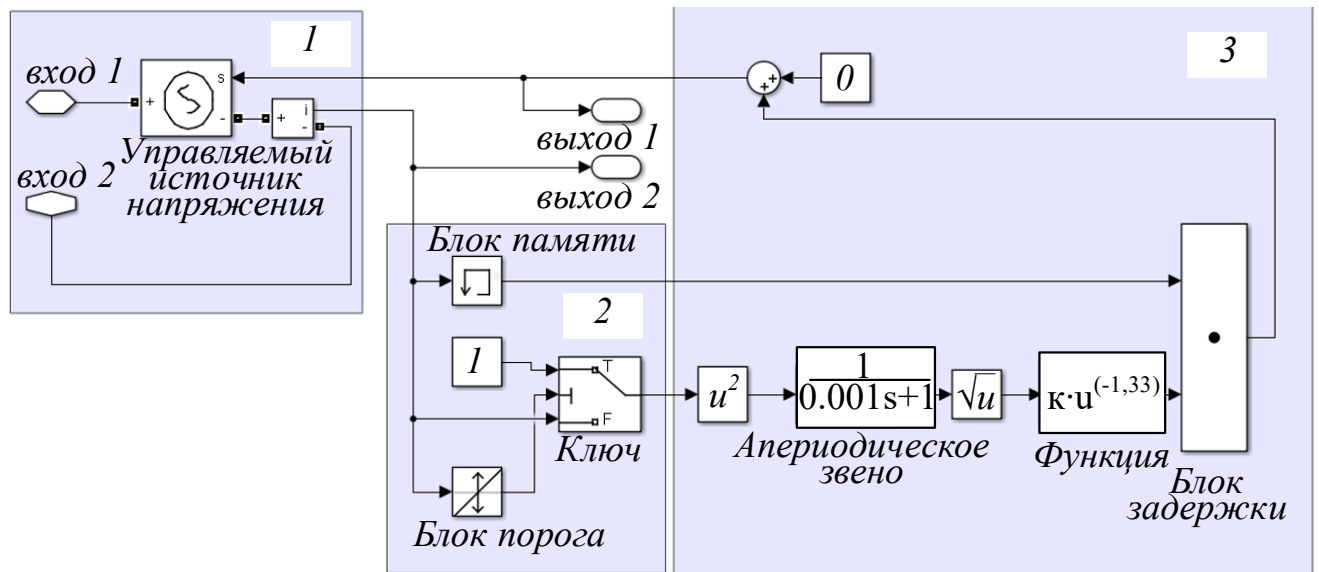


Рисунок 1.21 – Динамическая модель дуги в MATLAB Simulink

Однако, как уже отмечено ранее, данная модель пригодна и для моделирования дуги в качестве переходного сопротивления в месте КЗ. Модель дуги состоит из трёх основных блоков: первый – блок взаимодействия с первичной сетью, в которую помещается разрабатываемая модель. На вход модели подаётся ток первичной сети через входы 1 и 2. Также в первичную цепь подключён управляемый источник напряжения, выдающий в первичную сеть искажённое напряжение дуги. Источник управляется посредством сигнала обратной связи, реализуемого в самой модели далее. На вход управляемого источника подаётся сигнал, моделирующий суммарное напряжение дуги, выраженное уравнением (1.10):

$$u_o = \kappa \frac{i_\theta^n}{i_\theta} i + U_{a-\kappa} \approx \kappa i_\theta^{n-1} i, \quad (1.10)$$

Первое слагаемое является преобразованным уравнением Касси, где коэффициент κ – это комплексный показатель, характеризующий итоговую величину сопротивления дуги, параметр i_θ представляет собой ток состояния

дуги, n – показатель нелинейности плазмы дуги [61], степень которого для свободногорящих дуг принимается $n = -1/3$, i – подаваемый ток первичной сети, а U_{a-k} представляет собой катодно-анодное падение напряжение на дуге, выраженное константой, равной нулю при первичном рассмотрении. Второй блок содержит дополнительные элементы, предназначенные для стабилизации работы модели, устранения сингулярности при её запуске и синхронизации процессов. Третий блок является вычислительным, в котором выполняются основные математические операции, представленные в уравнении (1.10).

Верификация модели дуги производится посредством сравнения полученной ВАХ с известными для дуги. Формы петель ВАХ на рисунке 1.22 полностью соответствуют характеристикам, приведенным в публикациях [53, 55, 56], что говорит об успешной верификации и возможности применения модели для дальнейших исследований.

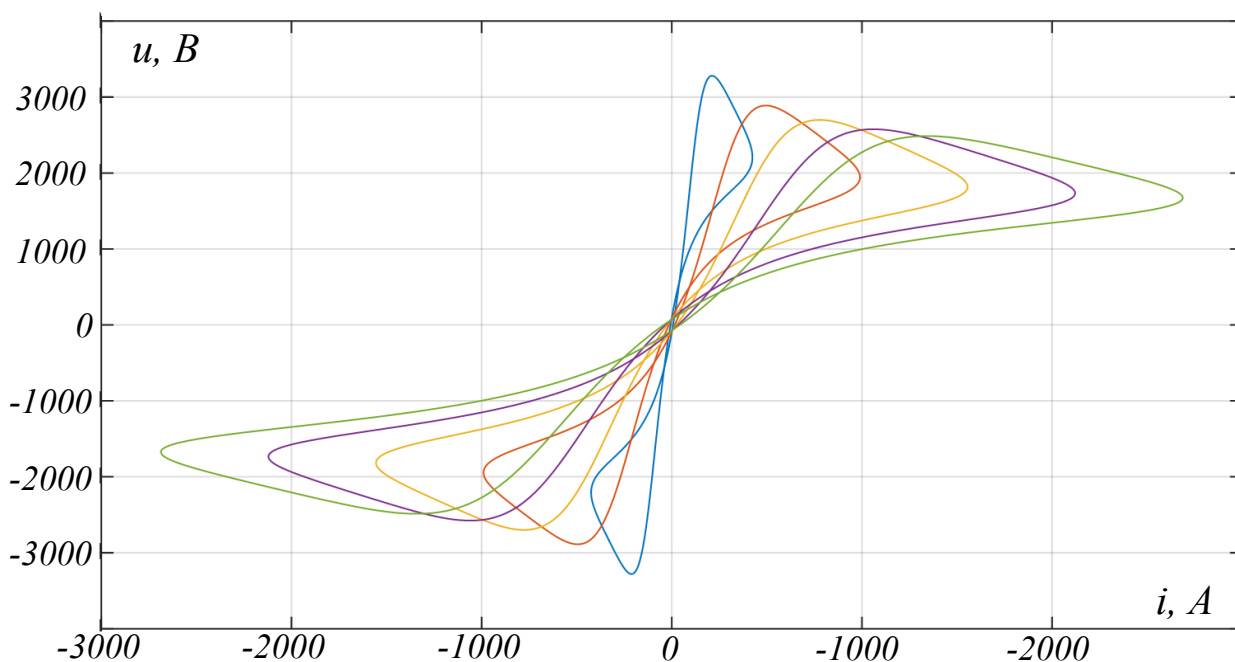


Рисунок 1.22 – Семейство ВАХ дуги для мгновенных значений напряжения и тока

Для использования и интеграции модели в первичную сеть были эмпирически определены параметры коэффициента k из выражения (1.10). На основании [62] в классическом представлении переходное сопротивление дуги R_0 определяется по формуле (1.11):

$$R_{\partial} = 2200 \frac{l_{\partial}}{I_{\partial}}, \quad (1.11)$$

где l_{∂} – длина дуги, м; I_{∂} – действующее значение тока через дугу, А; 2200 – коэффициент пропорциональности. При этом согласно [53, 63] значение коэффициента пропорциональности может варьироваться от 1050 до 8160.

В графическом представлении (рисунок 1.23) отображены зависимости сопротивления дуги от действующего значения тока КЗ. Пунктирной линией представлены графики, составленные на основании формулы, при изменении длины дуги от 3 до 7,5 м. Представленные значения длин обоснованы нормируемыми расстояниями между токоведущими частями (таблица 1.4). Сплошной линией представлены значения сопротивлений, полученные на динамической модели дуги в MATLAB.

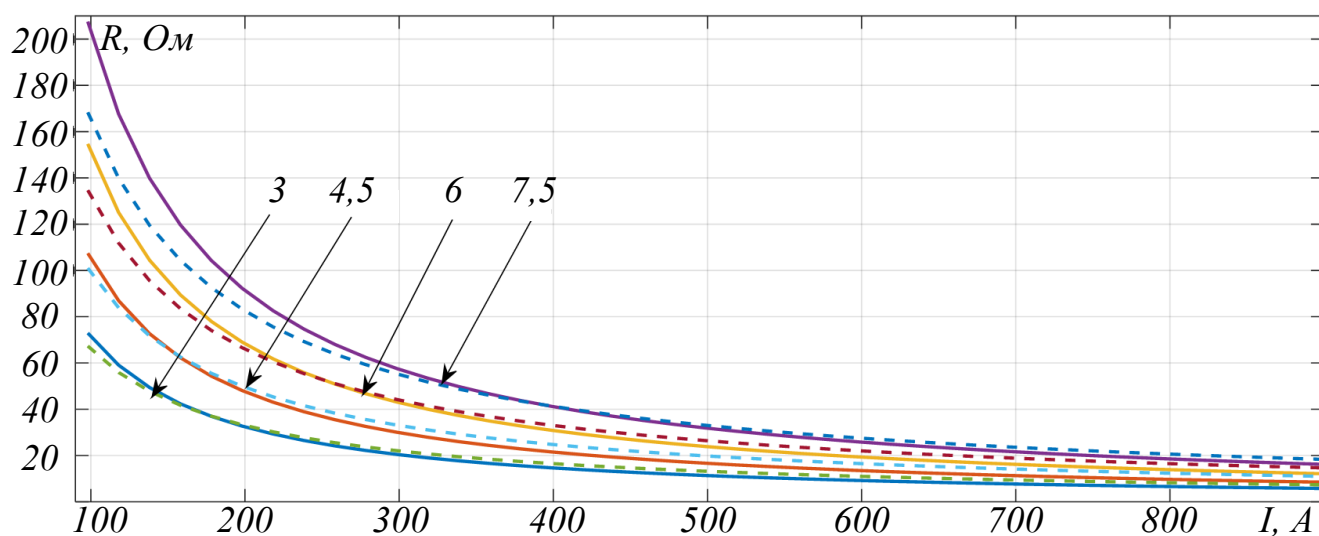


Рисунок 1.23 – Зависимость сопротивления дуги от действующего значения тока КЗ при длинах дуги 3; 4,5; 6 и 7,5 метров

Получено, что для длин дуги от 3 м до 4,5 м наблюдается практически полное совпадение результатов динамической модели и эмпирической формулы, тогда как для длины дуги от 6 м до 7,5 м можно заметить расхождение, связанное с повышением сопротивления дуги на динамической модели. Однако при бóльших значениях тока КЗ (более 200 А) разница становится незначительной.

Таблица 1.4 – Нормированные величины минимальных расстояний между проводами для различных классов напряжения

Напряжение ВЛ, кВ	Наименьшее расстояние между проводами, м; при стрелах провеса, м		
	3	5	6
110	3,0	3,5	3,5
220	-	4,25	4,5
500	-	-	7,0

Для интеграции динамической модели дуги в модель первичной сети 110 кВ принимается характеристика дуги с показателями, соответствующими сопротивлению при расстоянии 3 м, имеющая наименьшее значение переходного сопротивления. Если при минимальных сопротивлениях будут наблюдаться существенные искажения замеров сопротивления ДЗ, то при больших сопротивлениях дуги искажения будут иметь ещё более значительный характер.

1.4.3 Интеграция модели дуги с нелинейным сопротивлением в модель первичной электрической сети и анализ замеров сопротивления

Модель для проведения исследований разработана в программном комплексе MATLAB Simulink и состоит из следующих элементов: двух последовательно включенных ЛЭП; двух систем с каждой стороны ЛЭП; сопротивления нагрузки, предшествующей режиму КЗ; двух ступеней ДЗ с реле сопротивления с полигональными характеристиками; модели электрической дуги, ВАХ которой является нелинейной и динамически изменяющейся.

В исследовании задействована оценка четырёх возможных состояний с разными длинами линий 1 и 2: а) 1-100 км, 2-10 км; б) 1-10 км, 2-10 км; в) 1-100 км, 2-100 км; г) 1-10 км, 2-100 км

Моделируется режим двухстороннего питания с учётом наличия эквивалентов системы с каждой стороны транзитных ЛЭП. Нагрузка на промежуточной ПС моделируется через шунт и позволяет реализовать предаварийный нагрузочный режим. Фазовый угол между модулями ЭДС систем по разным концам позволяет смоделировать переток мощности, а также

определяет углы токов подпитки с каждой стороны в первый момент возникновения КЗ. КЗ происходит на промежуточной ПС между двумя ЛЭП. Тогда характеристика 1 ступени должна быть отстроена от КЗ в конце ЛЭП с $K_{отс}$ порядка 0,85, а характеристика 2 ступени должна охватывать измеряемую величину сопротивления ВЛ с $Kч=1,25$. Характеристика 3 ступени должна обеспечить дальнейшее резервирование смежных элементов, но в данной работе не рассматривается.

Применяемое реле сопротивления имеет полигональную характеристику на комплексной плоскости, заданную шестью вершинами $\underline{Z}_1... \underline{Z}_6$ (рисунок 1.24), описываемыми следующей системой уравнений (1.12) в соответствии с [64]:

$$\begin{cases} \underline{Z}_1 = 0; \\ \underline{Z}_2 = \frac{R_{уст.} \operatorname{tg} \varphi_{м.ч}}{\operatorname{tg} \varphi_{м.ч} - \operatorname{tg} \alpha_3} (1 + j \operatorname{tg} \alpha_3); \\ \underline{Z}_3 = X_{уст.} (\operatorname{ctg} \varphi_{м.ч} + j) + \frac{R_{уст.} \operatorname{tg} \varphi_{м.ч}}{\operatorname{tg} \varphi_{м.ч} - \operatorname{tg} \alpha_1} (1 + j \operatorname{tg} \alpha_1); \\ \underline{Z}_4 = X_{уст.} (\operatorname{ctg} \varphi_{м.ч} + j); \\ \underline{Z}_5 = X_{уст.} (\operatorname{ctg} \varphi_{м.ч} + j) - R_{уст.}; \\ \underline{Z}_6 = \frac{R_{уст.} \operatorname{tg} \varphi_{м.ч}}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \varphi_{м.ч}} (1 + j \operatorname{tg} \alpha_2); \end{cases} \quad (1.12)$$

где $R_{уст.}$ – активное сопротивление уставки, Ом; $X_{уст.}$ – реактивное сопротивление уставки, Ом; $\varphi_{м.ч}$ – угол максимальной чувствительности; α_1 – угол скоса характеристики в первом квадранте; α_2 – угол наклона во второй квадрант; α_3 – угол наклона в четвертый квадрант.

Помимо того, что дуга имеет собственное сопротивление, она также представляет собой добавочного сопротивление в месте КЗ по аналогии с сопротивлением длинной отпайки на ВЛ. Значит в случае многостороннего питания места КЗ замер сопротивления для ДЗ с одной из питающих сторон будет дополнительно искажаться из-за тока подпитки с другой стороны на долю через коэффициент токораспределения. Влияние будут оказывать как величина тока подпитки, так и отличие в фазах токов с двух сторон относительно друг друга. Если величина тока характеризуется мощностью системы и протяжённостью

ЛЭП, то величина углового сдвига δ ограничена в пределах $-67^\circ \leq \delta \leq 67^\circ$ по условию сохранения статической устойчивости передачи. Диапазон выбран по условию обеспечения запаса по устойчивости в послеаварийном режиме не менее 0,08 [65]. В соответствии с данным условием предельный угол передачи определяется как $\arcsin(0,92) \approx 67^\circ$.

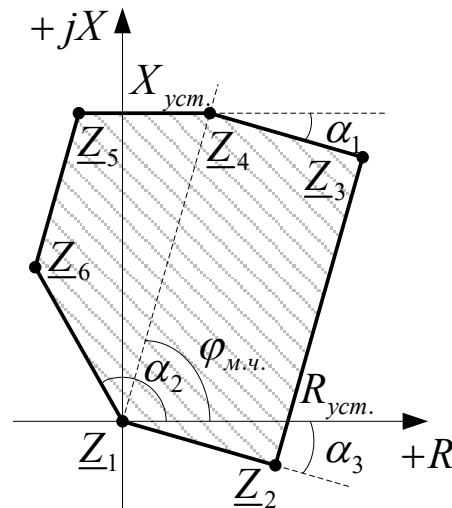


Рисунок 1.24 – Характеристика моделируемого реле сопротивления

На рисунке 1.25 представлена модель ЛЭП и её ДЗ в среде MATLAB Simulink, а на рисунке 1.26 – результаты замера сопротивления в режиме КЗ при нулевом сопротивлении дуги.

Одним из определяющих факторов, оказывающих влияние на замеры сопротивления через переходное сопротивление, является величина тока КЗ от каждой питающей стороны. Величины тока КЗ, помимо сопротивления самой ВЛ и сопротивления дуги, во многом определяется мощностью системы. В данном примере приняты системы малой мощности с током КЗ в узле эквивалентирования в 1,25 кА. При малых токах через дугу наблюдаются наибольшие переходные сопротивления, что может вызывать значительные искажения замеров сопротивления на коротких ЛЭП, где величина переходного сопротивления будет сопоставима, или даже превышать сопротивления самой линии. Такие замеры можно увидеть по рисунку 1.27: чёрный годограф

представляет КЗ через дугу, когда смежная ЛЭП имеет протяжённость 10 км, красный годограф – смежная ЛЭП 100 км.

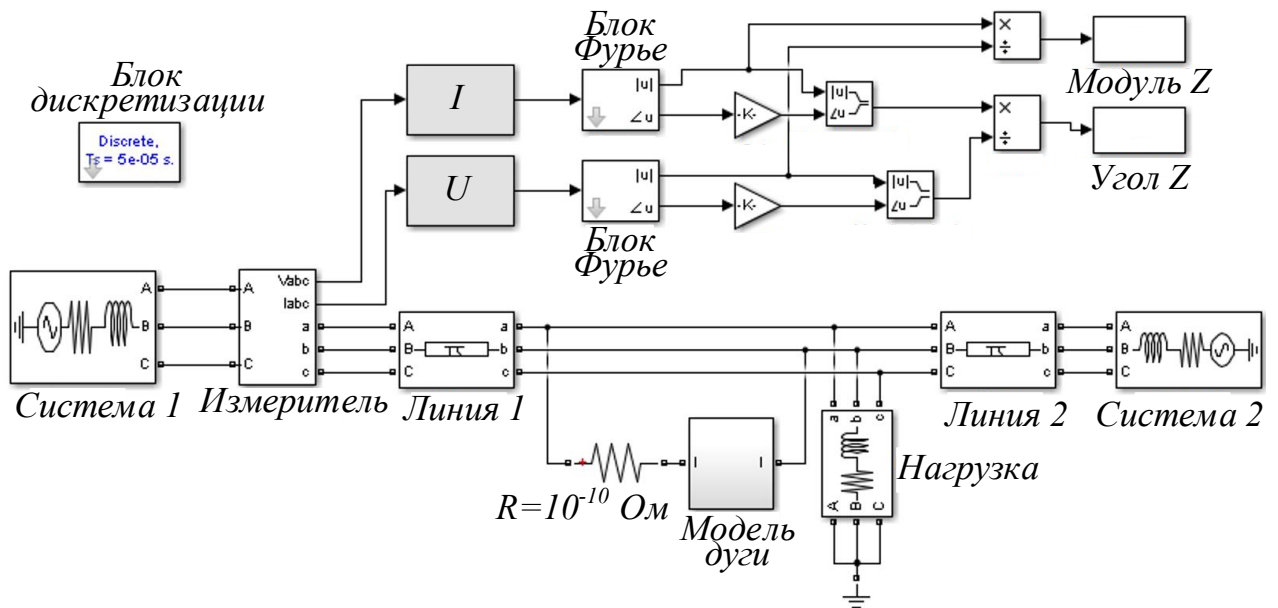


Рисунок 1.25 – Модель линии электропередачи с двухсторонним питанием в MATLAB Simulink

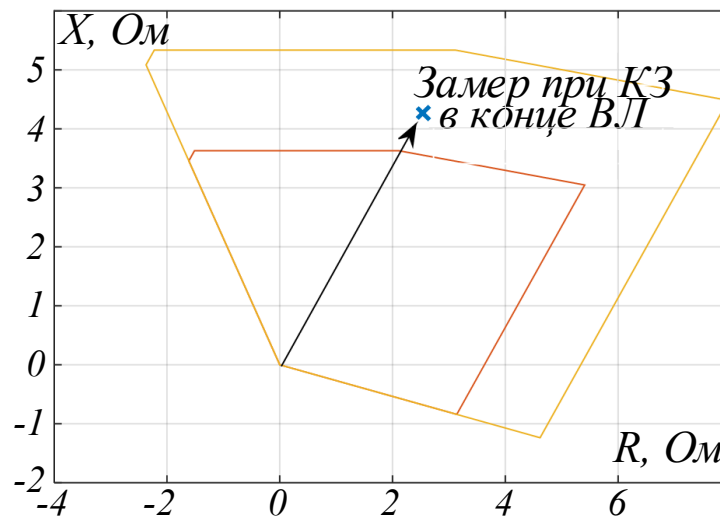


Рисунок 1.26 – Замер сопротивления в режиме КЗ в конце ЛЭП при нулевом сопротивлении дуги R_d

При увеличении протяженности смежной ВЛ увеличивается её сопротивление и уменьшается ток КЗ со стороны смежного участка. В соответствии с формулой (1.8) при уменьшении тока со стороны второй системы

искажение замера будет действительно меньшим, однако данное утверждение будет справедливым, если сопротивление R_d будет оставаться константой. Это подтверждается рисунком 1.27 а, где приведены замеры годографов, учитывающих переходное сопротивление дуги в месте КЗ по классической модели. Если сопротивление R_d будет изменяться динамически в соответствии с заданной для неё ВАХ и эти изменения будут оказывать влияние на параметры самого режима, то изменение сопротивления смежной ВЛ оказывает меньшее влияние на замеры сопротивления (рисунок 1.27 а). Для ВЛ большой протяжённости (100 км) результаты замеров как для классической, так и для динамической модели сходятся примерно в одной точке, соответствующей замеру при КЗ в конце ВЛ (на рисунке 1.27 б).

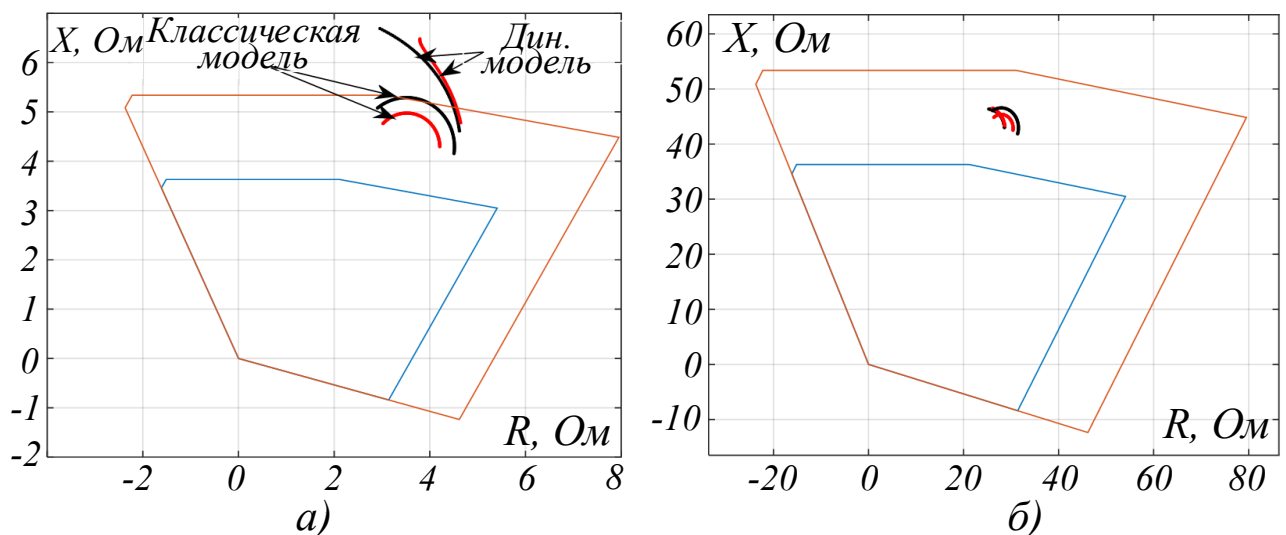


Рисунок 1.27 – Результаты замера сопротивления при имитации КЗ на шинах противоположной ПС при изменении угла сдвига фаз между ЭДС систем по концам линии в диапазоне $-67^\circ \leq \delta \leq 67^\circ$ и при токе трёхфазного КЗ на шинах обеих систем по 1,25 кА: а) протяжённость защищаемой ВЛ 10 км, б) протяжённость защищаемой ВЛ 100 км

При изменении угла δ в пределах по условиям статической устойчивости, определено, что замеры сопротивления не попадают в границы первой зоны ступени защиты и не приводят к ложной работе, однако при использовании

динамической модели для короткой ЛЭП до 10 км, было определено, что замеры выходят за пределы второй зоны защиты, что может привести к задержке отключения.

1.5 Достоинства и недостатки существующих каналов связи для устройств релейной защиты линий электропередачи

Одним из основных отличий резервных ступенчатых защит ВЛ с относительной селективностью (МТЗ, МФТО, ТЗНП, ТЗОП, ДЗ и т. д.) от основных защит с абсолютной селективностью (НВЧЗ, ВЧБ, ДФЗ, ДЗЛ и т. д.) заключается в наличии у вторых ограниченной зоны действия, определяющей границы защиты в области защищаемого элемента. В традиционном исполнении оборудованием, определяющим данную зону, являются ТТ, установленные с обеих сторон защищаемой ВЛ. Однако помимо ограничения зоны действия основным защитам необходимо производить обмен информацией между полуккомплектами. В соответствии с приказом Минэнерго № 97 [66] регламентируется использование двух типов каналов связи: высокочастотного (ВЧ) канала через фазные провода первичной сети или волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Основными данными, передаваемыми между полуккомплектами, являются сигналы о необходимости блокировки защиты (ВЧБ), получение разрешения на срабатывание (НВЧЗ), также может быть реализована передача данных о фазе тока с противоположной стороны посредством метода модуляции (ДФЗ), но так как количество используемых каналов ограничено, то передаётся информация о параметрах не каждой фазы, а эквивалентного сигнала, выраженного через сумму симметричных составляющих $I_1 + kI_2$, где k – коэффициент манипуляции. Все вышеперечисленные параметры передаются посредством ВЧ связи.

Помимо ВЧ связи основные защиты через ВОЛС могут осуществлять непосредственный обмен данными о модуле и фазе тока, измеряемого с противоположной стороны ВЛ. В случае, если канал связи по ВОЛС имеет

большую пропускную способность, а терминалы защит обладают требуемой частотой дискретизации сигнала и имеется привязка к меткам времени, то обмен может быть осуществлен данными о мгновенных значениях каждого из фазных токов. Такой вид обмена информацией используется в защитах ДЗЛ.

Преимущества применения ВЧ каналов связи:

1) Затраты на сооружение ВЧ канала в малой степени зависят от протяженности ВЛ, так как основным путем передачи данных является фазный провод токоведущих частей первичной сети ВЛ. Основные затраты при увеличении протяженности обоснованы выбором ВЧ аппаратуры в части передачи и приёма сигнала;

2) Как правило, передача данных во ВЧ канале является кратчайшим возможным путем за исключением случая строительства ЛЭП по обходным трассам из-за особенностей местности, когда прямое расстояние между объектами будет меньше протяжённости самой ЛЭП;

3) Отсутствие необходимости затрат на найм специального обслуживающего персонала для ВЧ канала связи, так как его обслуживанием может заниматься линейная служба, в ответственности которой находится эксплуатация самой ЛЭП.

Недостатки применения ВЧ каналов связи:

1) Необходимость проведения расчетов на затухание ВЧ сигнала и последующий выбор рабочей частоты передачи данных. Согласование выбранной частоты необходимо производить с государственной комиссией по радиочастотам, главным радиочастотным центром, которые в свою очередь производят проверку совместимости с частотами, используемыми в оборонном секторе, авиационном, судоходном и т. д;

2) Ввиду того что для канала связи задействовано высоковольтное оборудование, усложняется возможность его эксплуатации. Это проявляется в необходимости отключения ЛЭП для проведения проверки контроля исправности ВЧ тракта, если обнаружился проблемы с его состоянием. Проблемы также

закljučаются в том, что последующие параметры ВЧ тракта могут быть искажены после возникновения КЗ или обрывов на токоведущих частях;

3) Проблема взаимного влияния ВЧ каналов связи друг на друга. Ситуация осложняется, когда разные каналы связи проходят по проводам одной ЛЭП. Появляются трудности для выбора частот для данных каналов, а также ограничивается общее количество каналов связи, которые могут быть осуществлены в пределах нескольких объектов;

4) В связи с тем, что структура ЭЭС вблизи ЛЭП, на которой реализован ВЧ канал, со временем будет изменяться и не сохранит свои предыдущие характеристики, это окажет влияние и на параметры трактов ВЧ связи, которые в будущем могут требовать пересчета и замены ВЧ оборудования;

5) При грозовых явлениях волны перенапряжения могут вызывать высокочастотные резонансные процессы и выводить из строя ВЧ аппаратуру, что приводит к увеличению затрат на создание защиты ВЧ тракта от импульсных грозовых перенапряжений [67].

Данные о количестве случаев неправильной работы ДФЗ-201 из-за неполадок в канале связи или её аппаратуре указаны в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Количество случаев неправильной работы ДФЗ-201 из-за неполадок в канале связи или её аппаратуре за период 2019-2024 года [68]

Год	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Общее число случаев неправильной работы ДФЗ-201	65	94	80	81	59	42
Из-за дефектов или неисправностей аппаратуры, предназначенной для обеспечения функционирования взаимосвязанных устройств РЗ						
Число случаев неправильной работы по указанной причине	15	13	16	12	12	4
Доля неисправностей, %	23,08	13,83	20,00	14,81	20,34	9,52
Из-за дефектов или неисправностей аппаратной части средств связи и их компонентов в цепи организации каналов связи, используемых для обмена сигналами между терминалами РЗ						
Число случаев неправильной работы по указанной причине	8	11	7	13	14	4
Доля неисправностей, %	12,31	11,70	8,75	16,05	23,73	9,52
Общая доля неисправностей, %	35,39	25,53	28,75	30,86	44,07	19,05

Преимущества применения ВОЛС:

- 1) Высокая частота пропускания и высокая скорость передачи данных оптического канала, что обусловлено малой величиной затухания светового сигнала и позволяет установить связь без ретрансляции на расстояния до 200 км;
- 2) Наличие гальванической развязки, неэлектрический тип передачи сигнала. Это способствует устранению проблемы влияния электрических помех, наведенного напряжения и шумов, а также обеспечивает безопасную работу с линиями ВОЛС как в части эксплуатации, так и в плане отсутствия взрывов и пожаров;
- 3) Меньший вес и объем провода при сравнении с медными проводами той же длины, а также высокая защищённость в части несанкционированного доступа к проводу;
- 4) Возможность прокладки кабеля ВОЛС в грозозащитном тросе, в виде навиваемого или отдельно подвешенного провода.

Недостатки применения ВОЛС:

- 1) Для каналов связи ДЗЛ по ВОЛС разрешается аренда жил оптических кабелей, уже находящихся в эксплуатации, например, у телекоммуникационных компаний. Из этого появляется недостаток в виде отсутствия прямого канала связи между объектами, а также применения мультиплексного оборудования для подключения и внедрения передачи данных для ДЗЛ в существующую сеть. Всё это в конечном итоге приводит к увеличению пути передачи данных, задержке и увеличению затуханий в оптическом канале, а также к добавлению посредников и дополнительных передаточных узлов, что сказывается на параметрах надежности системы.
- 2) Затраты с прокладкой увеличиваются от расстояния. Следовательно, чем больше протяженность защищаемой ВЛ, тем больше затраты, связанные с прокладкой ВОЛС.
- 3) В случае прокладки ВОЛС в грозозащитном тросе при повреждении канала связи необходимо производить отключение ВЛ для устранения неисправности.

4) В случае прокладки ВОЛС в кабельном канале имеется вероятность повреждения кабеля при проведении в месте прокладки трассы других земляных работ. Кабель может быть поврежден строительной техникой, что приведет к обрыву канала связи.

5) Высокая стоимость интерфейсного оборудования, а также сложность и дороговизна работ по восстановлению и пайке ВОЛС при повреждении и обрыве. Существуют ограничения на радиус изгиба ВОЛС, что приводит к увеличению длины и стоимости прокладки оптического тракта [69].

Выводы по первой главе

В данной главе указаны основные причины возникновения КЗ в первичной сети, а также перечислены признаки КЗ, на которые реагируют существующие традиционные устройства РЗ токового, дистанционного, дифференциального принципа действия и направленные защиты. В связи с тем, что одним из признаков КЗ является вспышка электрической дуги, отмечена оптическая фиксация наличия дуги как один из способов выявления КЗ. Также при возникновении переходных процессов в высоковольтных проводах наблюдаются волновые процессы, на которые реагируют волновые защиты.

Произведено описание математической модели ТТ, реализованной в программной среде MATLAB Simulink. Выполнено сравнение ВАХ, полученной по модели ТТ, с ВАХ ТТ типа ТПЛ-10-50/5, разница результатов составила не более 5%, что является успешной верификацией модели. Главной особенностью используемой модели является возможность задания остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ, при этом ТТ способен размагничиваться при протекании тока КЗ или нагрузочного тока со скоростью, определяемой постоянной времени вторичного контура ТТ. Результаты моделирования показали, что помимо величины кратности тока КЗ и вторичной нагрузки на ТТ основными

факторами, влияющими на переход ТТ в режим насыщения являются величина остаточной магнитной индукции, а также наличие в первичном токе КЗ апериодической составляющей. К параметрам, на которые оказывает негативное влияние насыщение ТТ, относятся: величина действующего значения тока ТТ, угловая погрешность измеряемого вторичного тока, наличие тока небаланса в дифференциальных защитах. Влияние указанных факторов способно привести к отказу срабатывания или излишней работе устройств РЗ. Время, за которое действующее значение восстанавливалось до параметра 90% от величины замеров без искажения сигнала, могло достигать до 0,3 с, при этом время задержки на срабатывание прямо пропорционально величине постоянной времени первичной сети. Такое замедление можно сравнить с временем работы вторых ступеней резервных защит на МП элементной базе. При этом современные стандарты в части насыщения ТТ регламентируют учитывать только время первого момента насыщения ТТ без учёта степени данного насыщения и без учёта времени размагничивания ТТ при протекании через него тока КЗ. Применение ТТ, у которых величина остаточной магнитной индукции ограничена (PR, TPZ, TPY), способно частично снизить влияние негативных факторов, но даже они подвержены переходу в режим насыщения при больших кратностях и величинах апериодической слагающей тока КЗ. К тому же их внедрение связано с проведением реконструкций и замен традиционных ТТ класса точности Р, что влечет изменение сложившейся инфраструктуры и затраты по замене дорогостоящего первичного оборудования. Следовательно, ввиду того что существующие электромагнитные ТТ обладают подобными недостатками, актуально рассмотрение альтернативных способов получения информации о параметрах режима первичной сети для выявления КЗ.

Рассмотрены проблемы, связанные с цепями напряжения ТН. Безусловно, с применением информации от ТН можно создать более совершенные ДЗ /и защиты, использующие принцип направленности. Их зона действия более

стабильна и имеет больший охват защищаемой ВЛ, чем у токовых защит. Однако их применение связано с усложнением общего функционирования и со снижением надежности работы устройств РЗ в случае обрыва цепей напряжения и потери данных функций, от которых оказываются зависимыми существующие комплексы РЗ. Методы, ликвидирующие ложную работу устройств РЗ посредством заведения последних ступеней ДЗ под БК, несут в себе опасность отказа защиты при различных ситуациях, связанных с трёхфазными КЗ, переходом однофазных КЗ в двухфазные, а также проблемой обеспечения дальнего резервирования. Следовательно, актуальной задачей остаётся улучшение алгоритмов функционирования защит токового дифференциального принципа действия, а также разработка устройств РЗ, использующих иные способы получения информации об аварийном процессе в первичной электрической сети.

Также рассмотрена проблема влияния электрической дуги на искажение замеров сопротивления для устройств ДЗ. Выполнена работа по созданию динамической модели электрической дуги на основе дифференциальных уравнений Касси, где сопротивление дуги выражено в виде нелинейной ВАХ. Разработана модель характеристики ДЗ, которая внедрена в модель сети с двухсторонним питанием, созданную в среде MATLAB Simulink. Использование динамической модели позволяет более точно воспроизвести физические процессы, возникающие при неметаллических КЗ, так как изменение параметров дуги влияет на изменения параметров тока, что создаёт замкнутую систему с обратной связью. Проведено сравнение замеров сопротивления при КЗ через дугу с использованием классического метода и с применением динамической модели дуги. На основании проведенных испытаний определено, что существуют режимы, при которых замеры сопротивления выходят за пределы характеристики срабатывания ДЗ, и обнаружить это удастся только при применении динамической модели дуги. Указанные искажения можно заметить только на ЛЭП малой протяжённости до 10 км; в случае исследования КЗ для длинных линий

протяженностью более 100 км классические эмпирические формулы расчёта переходного сопротивления показали результат, аналогичный расчетам с помощью динамической модели.

Рассмотрены преимущества и недостатки использования существующих каналов связи ВЧ и ВОЛС для устройств РЗ. У устройств ДФЗ-201, на основании статистических данных, представленных на сайте АО «СО ЕЭС», доля неправильной работы по причине неисправности в канале связи или аппаратуры, предназначенной для обеспечения её функционирования, может составлять до 44% от всех случаев неправильной работы. Затраты на создание ВЧ канала связи не зависят от протяжённости ВЛ в отличие от ВОЛС, однако недостатки, связанные с работой непосредственно через первичную сеть, обслуживанием ВЧ аппаратуры и периодическими отказами, подтверждают, что для линий малой протяженности актуально рассматривать иные варианты создания канала связи, например, через систему АОЛС.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С АБСОЛЮТНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

2.1 Теоретические основы расчета напряжённости магнитного поля многопроводной системы

В отличие от ТТ, где магнитный поток, создаваемый током проводника каждой конкретной фазы первичной токоведущей части, пересекает вторичную обмотку ТТ по пути сердечника из ферромагнитной стали, измерение магнитного поля проводников ЛЭП в произвольной точке пространства несет в себе ряд сложностей. Физическая основа этих двух явлений является одинаковой и подчиняется закону Био-Савара-Лапласа [70], который сформулирован следующим образом: магнитное поле, создаваемое бесконечно малым элементом проводника с током, пропорционально величине тока, длине элемента проводника и синусу угла между направлением тока и радиусом-вектором, проведенным от элемента проводника к точке наблюдения, и имеет вид формулы (2.1) в соответствии с рисунком 2.1. В общем случае электрическое и магнитное поле связаны воедино – в электромагнитное поле, и для их определения необходимо решать систему уравнений Максвелла. Однако при частоте 50 Гц, когда выполняются условия квазистационарного электромагнитного поля в его ближней зоне, электрическое и магнитное поля могут исследоваться независимо друг от друга [71, 72, 73, 74]. Закон Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I \arg(d\vec{l} \vec{r})}{4\pi r^3}, \quad (2.1)$$

где $d\vec{l}$ – вектор, представляющий единичную длину элемента проводника и совпадающий по направлению с током I ; $\vec{r}$ – радиус-вектор, представляющий кратчайшее расстояние от рассматриваемой точки с током до точки А. Параметр μ представляет магнитную проницаемость, равную единице для воздуха (о. е.). Магнитная постоянная принимается равной ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

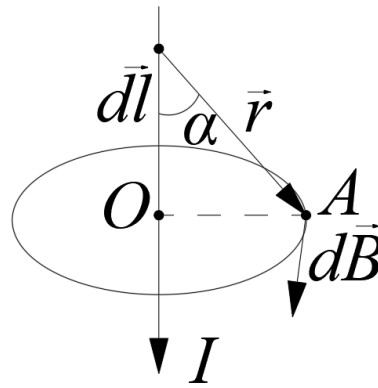


Рисунок 2.1 –Определение магнитной индукции вдоль проводника единичной длины

Связь между вектором НМП и вектором магнитной индукции может быть представлена как $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$. При соотношении протяжённости ЛЭП и габаритов измерителя в виде ДМП получится, что датчик можно рассматривать единичной точкой в пространстве, а длину провода ЛЭП относительно него – бесконечной, тогда справедливо выражение (2.2) в соответствии с рисунком 2.2.

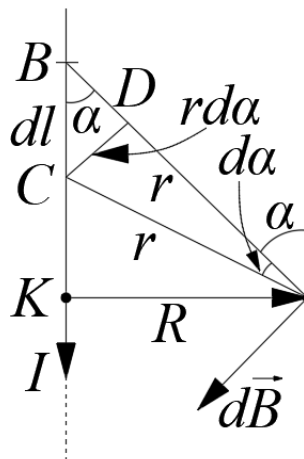


Рисунок 2.2 – Определение магнитной индукции вдоль проводника бесконечной длины

$$d\vec{H} = \frac{I \cdot dl \cdot \sin(\alpha)}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

Можно выразить следующее из $\triangle ABCD$: $dl = CD/\sin \alpha$; $CD = r d\alpha$, отсюда $dl = r d\alpha/\sin \alpha$. Из $\triangle ACK$: $r = R/\sin \alpha$. Подставив эти значения в (2.2), можно

получить формулу (2.3), выраженную через перпендикуляр R расстояния до токоведущей части.

$$d\vec{H} = \frac{\dot{I} \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha}{4\pi R} \quad (2.3)$$

Угол α будет изменяться в пределах от нуля до π , тогда проинтегрировав (2.3) по углу в указанных пределах, можно получить выражение (2.4):

$$\dot{H} = \int d\vec{H} = \frac{\dot{I}}{4\pi R} \int_0^\pi \sin\alpha d\alpha = \frac{\dot{I}}{2\pi R} \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) будет справедливо для проведения замеров НМП для единичного проводника через перпендикуляр кратчайшего расстояния от датчика и измеряемое действующее значение тока.

Основная трудность, возникающая при измерении токов высоковольтных ЛЭП по их магнитному полю, заключается в том, что ДМП, произвольно размещенный под проводом ЛЭП, реагирует на магнитное поле токов всех проводов линии. Единичные вектора НМП $\dot{H}_1$ и $\dot{H}_2$ пропорциональны соответствующим токам в проводниках $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$, кратчайшим расстояниям r_1 и r_2 от проводников до точки измерения магнитного поля, а также они сдвинуты в пространстве на произвольный угол.

Суммарный вектор НМП является векторной суммой составляющих $\dot{H}_1$ и $\dot{H}_2$, как указано на рисунке 2.3, с учётом взаимного расположения проводов в пространстве. Вектор НМП $\dot{H}_1$ может быть разложен на вертикальные и горизонтальные ортогональные составляющие $\dot{H}_{1x}$ и $\dot{H}_{1y}$ (рисунок 2.4). При этом, если использовать формулу (2.4) и выражать вектор НМП $\dot{H}_1$ через вектор расстояния от точки замера до провода, необходимо учесть по аналогии с комплексной плоскостью угол поворота на 90° через составляющую $-j$, как это указано в системе (2.5), с учётом разложения вектора $\dot{H}_1$ на две составляющие. Так как в составляющей $\dot{H}_{1y}$ используется функция косинуса в силу того, что она является четной, знаком минус можно пренебречь. Аналогичные действия можно произвести с вектором $\dot{H}_2$.

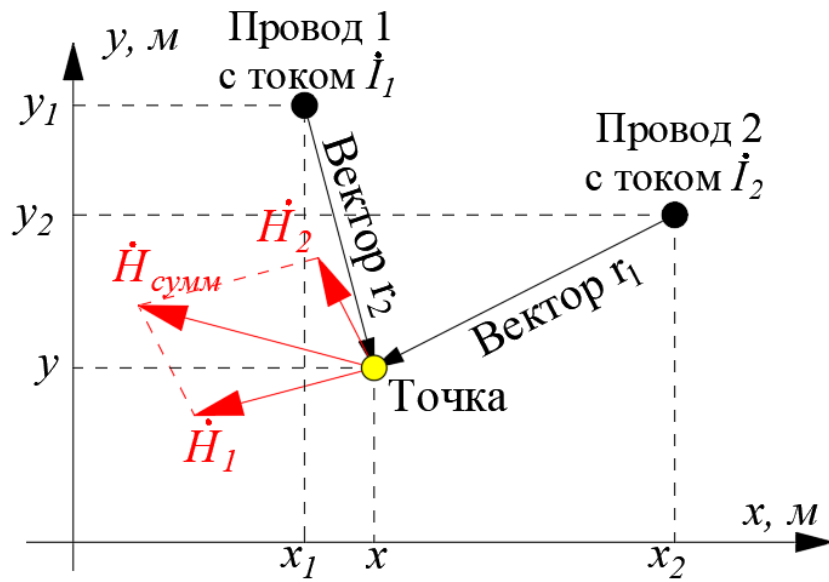


Рисунок 2.3 – Определение результирующего вектора НМП с двумя проводниками

$$\begin{cases} \dot{H}_1 = \dot{H}_{1x} + \dot{H}_{1y}; \\ \dot{H}_1 = -j \frac{\dot{I}_1 \cdot e^{j \arg(\vec{r}_1)}}{2\pi |r_1|} = \frac{\dot{I}_1 \cdot \sin(\arg(\vec{r}_1))}{2\pi |r_1|} - j \frac{\dot{I}_1 \cdot \cos(\arg(\vec{r}_1))}{2\pi |r_1|}; \\ \dot{H}_{1x} = \frac{\dot{I}_1 \cdot \sin(\arg(\vec{r}_1))}{2\pi |r_1|}; \\ \dot{H}_{1y} = \frac{\dot{I}_1 \cdot \cos(\arg(\vec{r}_1))}{2\pi |r_1|}. \end{cases} \quad (2.5)$$

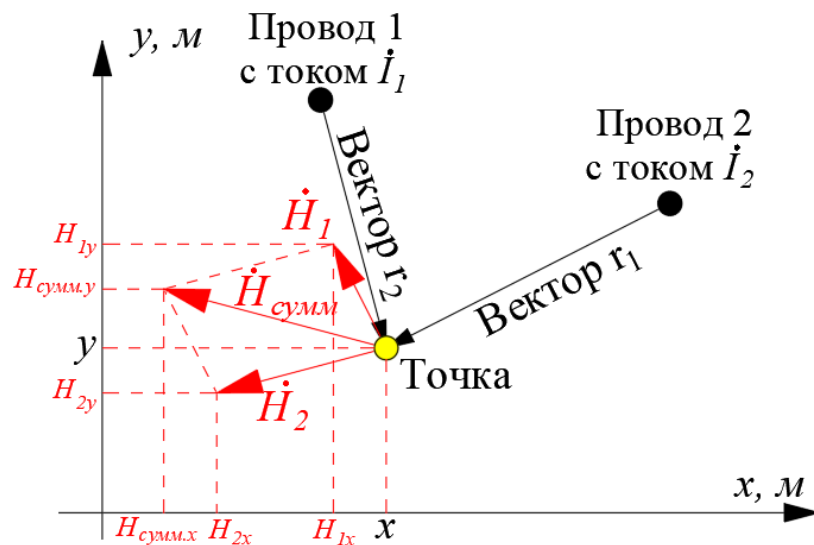


Рисунок 2.4 – Определение вертикальных и горизонтальных составляющих НМП

Суммарный вектор НМП может быть найден через сумму отдельных составляющих от каждого проводника по выражению (2.6) для частного случая двух проводников. При этом полный замер будут фиксировать трехкомпонентные датчики.

$$\begin{cases} \dot{H}_{XY} = \dot{H}_{1x} + \dot{H}_{2x} + \dot{H}_{1y} + \dot{H}_{2y}; \\ |\dot{H}_{XY}| = \sqrt{(\dot{H}_{1x} + \dot{H}_{2x})^2 + (\dot{H}_{1y} + \dot{H}_{2y})^2}. \end{cases} \quad (2.6)$$

Аналогичные действия могут быть выполнены для любого количества токоведущих частей по выражению (2.7). Можно обозначить суммарный полный вектор НМП как $\dot{H}_{XY}$, его вертикальную составляющую как $\dot{H}_X$, а горизонтальную составляющую как $\dot{H}_Y$.

$$\begin{cases} \dot{H}_{XY} = \sum_{S=1}^n (\dot{H}_{XS} - j\dot{H}_{YS}); \\ |\dot{H}_{XY}| = \sqrt{\sum_{S=1}^n [(\dot{H}_{XS})^2 + (\dot{H}_{YS})^2]}; \\ \dot{H}_X = \frac{1}{2\pi} \sum_{S=1}^n \frac{\dot{I}_S \cdot \sin(\arg(\vec{r}_S))}{|r_S|}; \\ \dot{H}_Y = \frac{1}{2\pi} \sum_{S=1}^n \frac{\dot{I}_S \cdot \cos(\arg(\vec{r}_S))}{|r_S|}; \end{cases} \quad (2.7)$$

где S – индекс конкретно взятого проводника (1,2,3... n), а n – общее количество проводников, рассматриваемых в системе. Для трехфазной системы можно записать фазные обозначения: 1 – фаза А, 2 – фаза В, 3 – фаза С.

В вышеуказанных формулах необходимо учитывать, что используется переменный ток, следовательно, помимо расстояния до измерителя и величины тока на параметры НМП будет также оказывать влияние и начальная фаза тока, что должно быть учтено при рассмотрении различных видов КЗ.

2.2 Исследование составляющих магнитного поля одноцепной и двухцепной линий электропередачи

В части исследования НМП трёхфазной ЛЭП существует ряд работ, описывающих происходящие процессы, а также демонстрирующих картины

НМП [71, 72, 73, 74]. В основном результат таких работ сводится к получению модели магнитного поля ЛЭП для обеспечения требуемых норм охраны труда и санитарно-гигиенических норм, поэтому по большей части в них моделируются симметричные режимы трехфазной нагрузки. В работе [75] приводится описание режимов с учетом разных видов КЗ. При исследовании магнитного поля ЛЭП приводятся следующие допущения: провода имеют форму бесконечных линейных проводников с равномерно распределенным током; процессы перераспределения тока внутри поперечного сечения проводов не рассматриваются; магнитное поле системы токов ЛЭП синусоидально; отсутствует искажение магнитного поля от ферромагнитных сред, например, порталов и опор; датчики считаются точечными. Предлагается рассмотреть НМП вблизи одноцепной трёхфазной ВЛ с учетом ортогональных составляющих поля на примере опоры ПМ-110-1 [76], показанной на рисунке 2.5. На первом этапе производится расчёт НМП промышленной частоты в каждой точке сечения возле проводников.

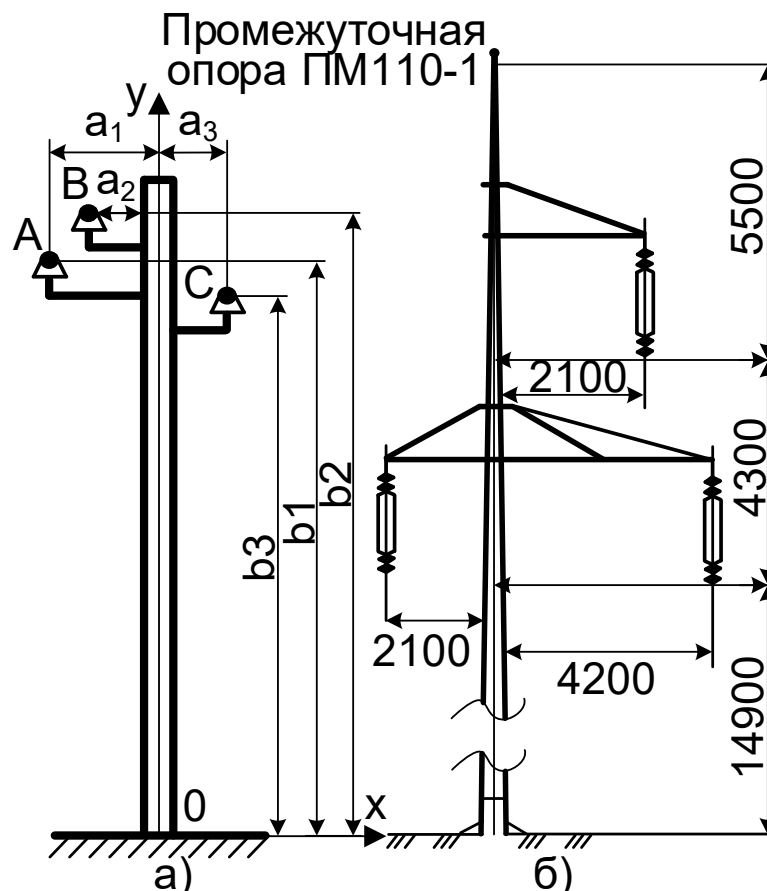


Рисунок 2.5 – Схема расположения проводов ВЛ:

а) в общем виде; б) для опоры ПМ-110-1

Рассматривается первый случай, идентичный трёхфазному КЗ и режиму нагрузки, для этого необходимо задаться аргументом первой фазы А с нулевым значением в соответствии с системой (2.8)

$$\begin{cases} \dot{I}_{1A} = I_{paб}; \\ \dot{I}_{2B} = I_{paб} e^{-j120^\circ}; \\ \dot{I}_{3C} = I_{paб} e^{j120^\circ}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Расстояния от фазных проводов до произвольной точки пространства (х, у) будут определяться в соответствии с (2.9):

$$\begin{cases} r_A = \sqrt{(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2}; \\ r_B = \sqrt{(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2}; \\ r_C = \sqrt{(x - a_3)^2 + (y - b_3)^2}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Тогда карта НМП возле проводников представляется в следующем виде для всех составляющих магнитного поля при условном токе 100 А: на рисунке 2.6 для трёхфазных КЗ, на рисунке 2.7 при двухфазных КЗ, на рисунке 2.8 для двухфазного КЗ на землю, на рисунке 2.9 для однофазного КЗ. Цвет градиента НМП представлен в левой части изображений и позволяет визуально определить её уровень. Плавный переход от холодных синих цветов к тёплому желтому обозначает рост НМП поля от минимальных значений к максимальным.

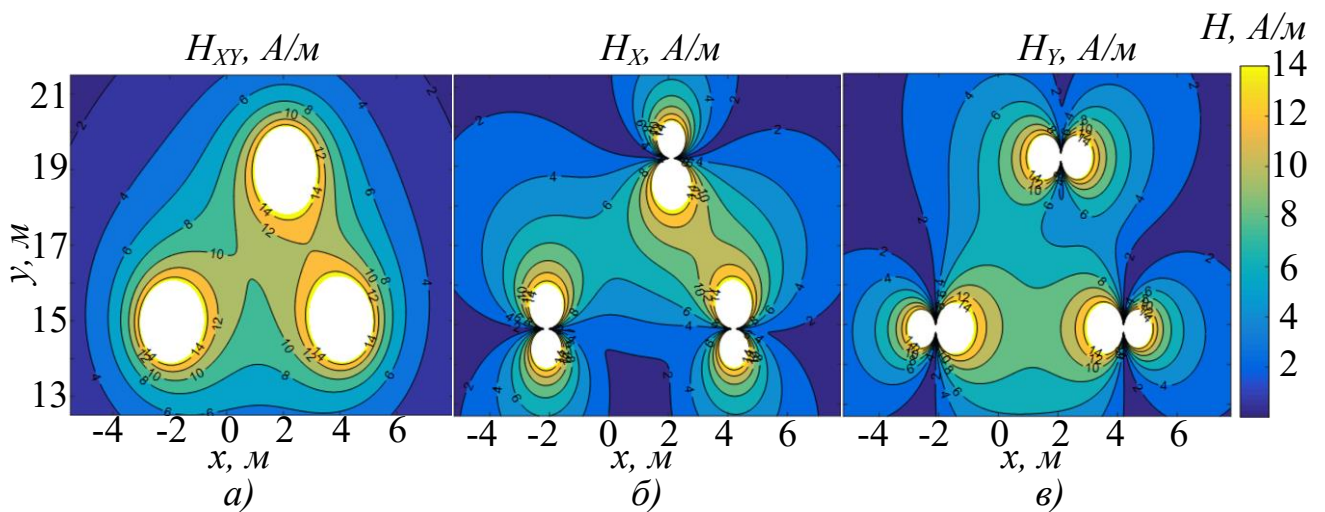


Рисунок 2.6 – Карта для составляющих НМП возле проводников при трехфазном КЗ: а) для $\dot{H}_{xy}$, б) для $\dot{H}_x$, в) для $\dot{H}_y$

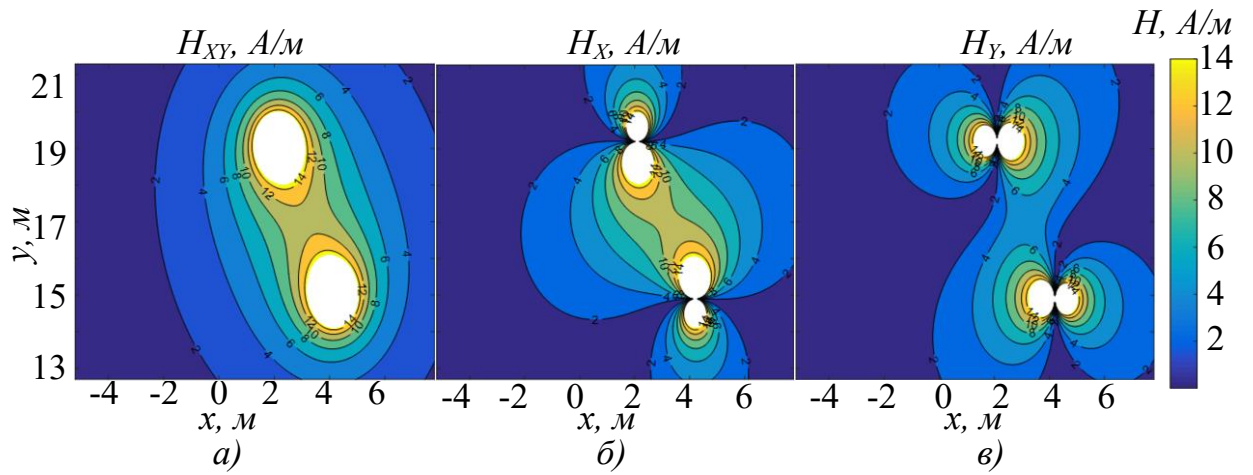


Рисунок 2.7 – Карта для всех составляющих НМП возле проводников при двухфазном КЗ фаз ВС: а) для $\dot{H}_{xy}$, б) для $\dot{H}_x$, в) для $\dot{H}_y$

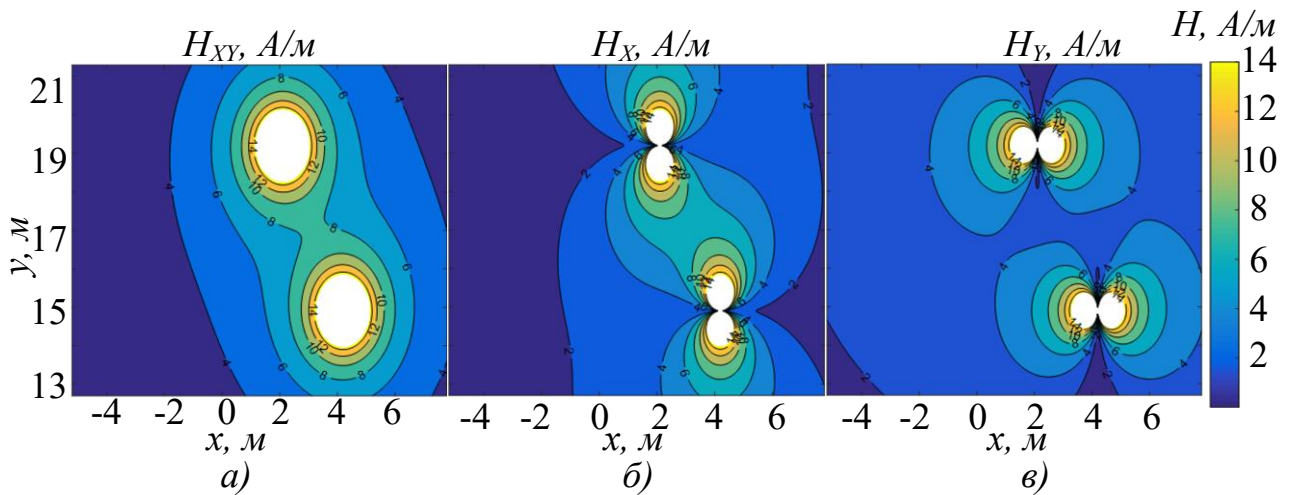


Рисунок 2.8 – Карта для всех составляющих НМП возле проводников при двухфазном КЗ на землю фаз ВС: а) для $\dot{H}_{xy}$, б) для $\dot{H}_x$, в) для $\dot{H}_y$

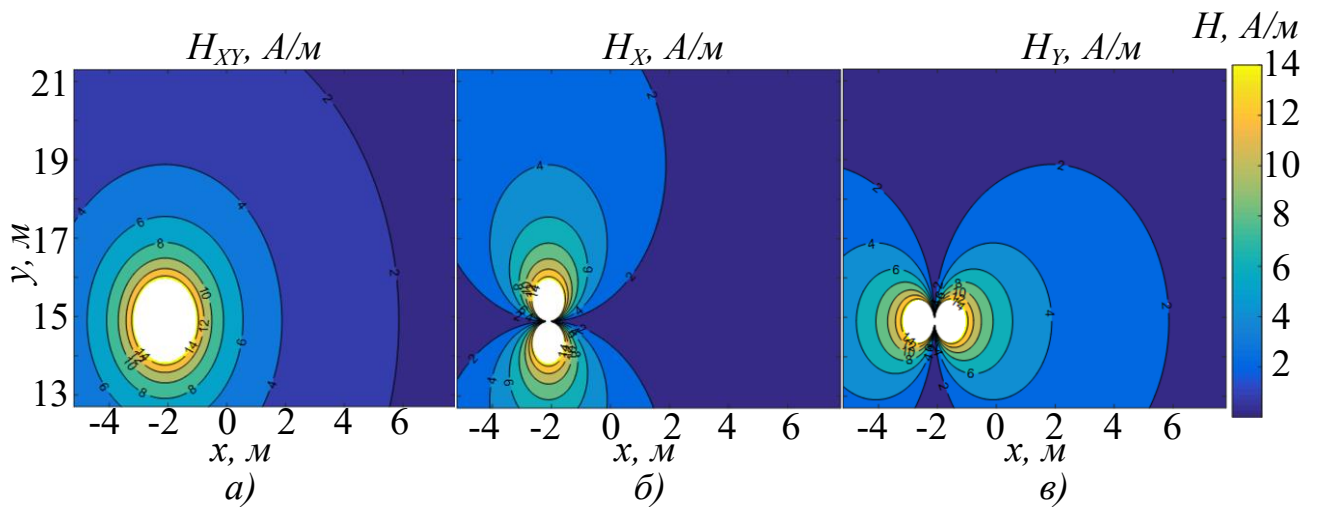


Рисунок 2.9 – Карта для всех составляющих НМП возле проводников при однофазном КЗ фазы А: а) для $\dot{H}_{xy}$, б) для $\dot{H}_x$, в) для $\dot{H}_y$

В случае если токи двух фаз будут сонаправлены, то образуется следующая карта с «мертвой зоной» между проводниками, представленная на рисунке 2.10, где НМП по всем составляющим будет близка к нулю в случае, если в проводниках будет протекать одинаковый ток. Показанная картина является теоретической верификацией расчетной модели.

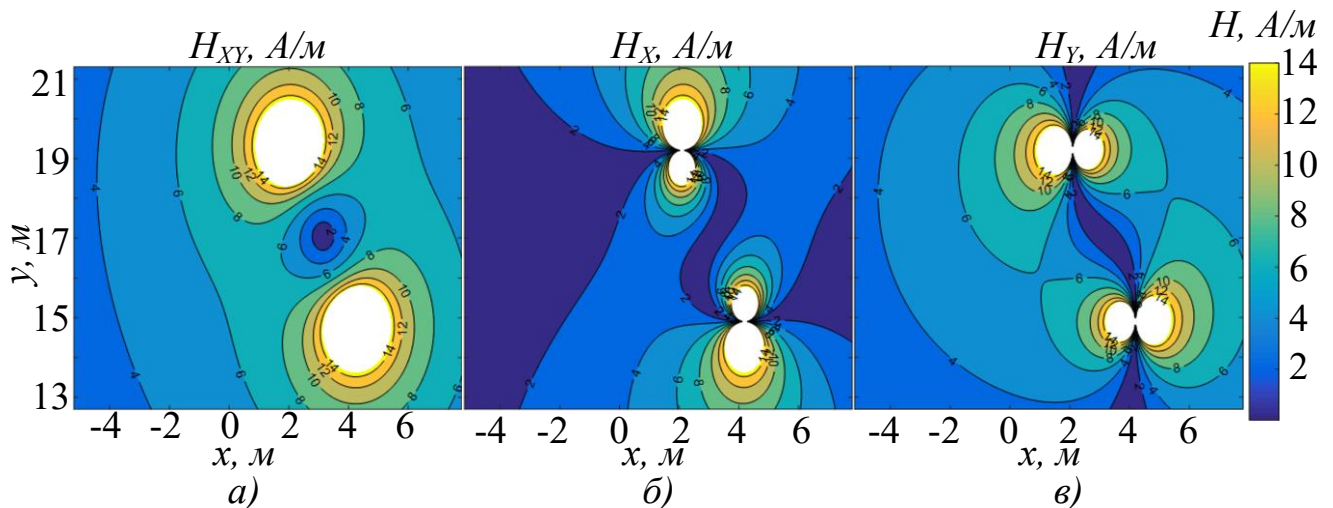


Рисунок 2.10 – Карта для всех составляющих НМП возле проводников при сонаправленных токах в двух фазах: а) для $\dot{H}_{xy}$, б) для $\dot{H}_x$, в) для $\dot{H}_y$

Карты НМП для двухцепной ЛЭП будут рассматриваться на примере опоры ПС-35-2. Для расчетов принята наихудшая структура опоры с точки зрения замеров НМП с расстояниями по высоте между токоведущими частями в 4 метра в соответствии с рисунком 2.11. Так как чем больше расстояния между токоведущими частями, тем на большем расстоянии от проводников будут размещены измерители НМП при прочих равных условиях. Соответственно сами замеры НМП также будут значительно меньше, что может затруднить выбор уставок основываясь на малых замерах.

Для двухцепной опоры будет произведена индексация проводов для фаз первой цепи А (1-А_А, 2-В_А, 3-С_А) и второй цепи Б (4-А_Б, 5-В_Б, 6-С_Б). Далее карта НМП будет формироваться в соответствии с формулой (2.7) для шести проводников, представленных на рисунке 2.12. Токи по одноименным фазам двух ЛЭП сонаправлены.

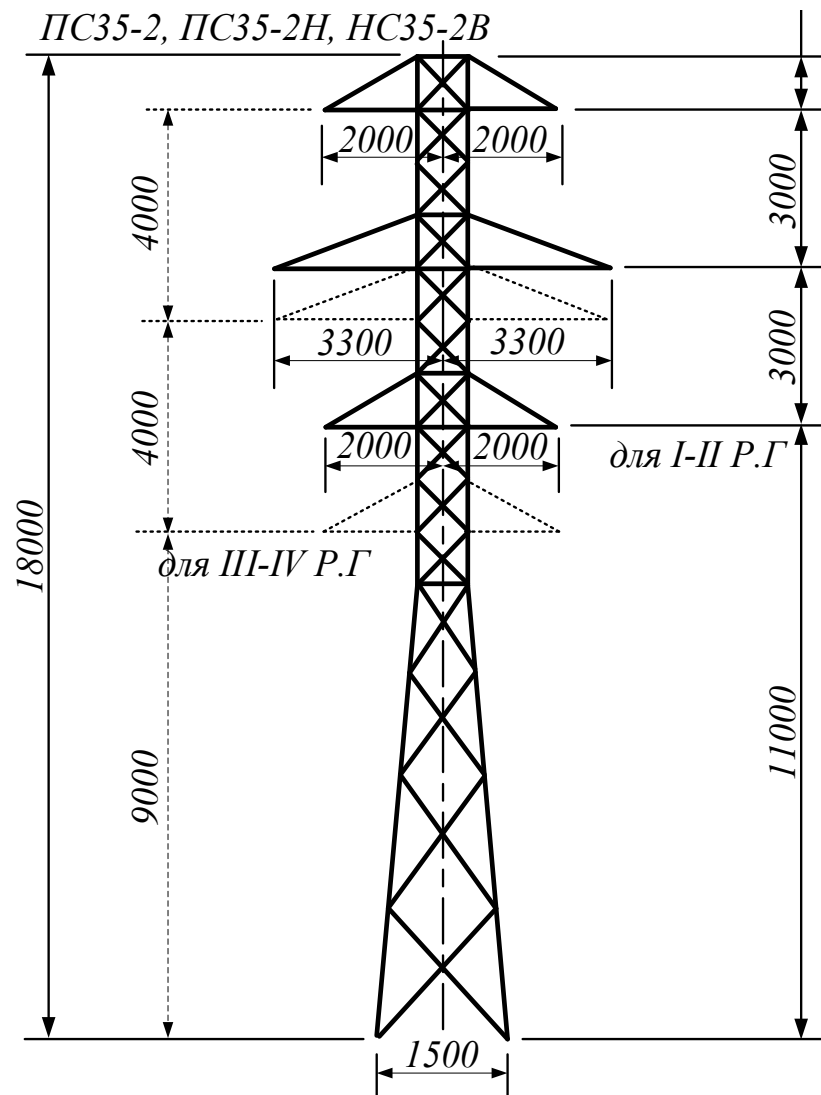


Рисунок 2.11 – Двухцепная опора ПС-35-2

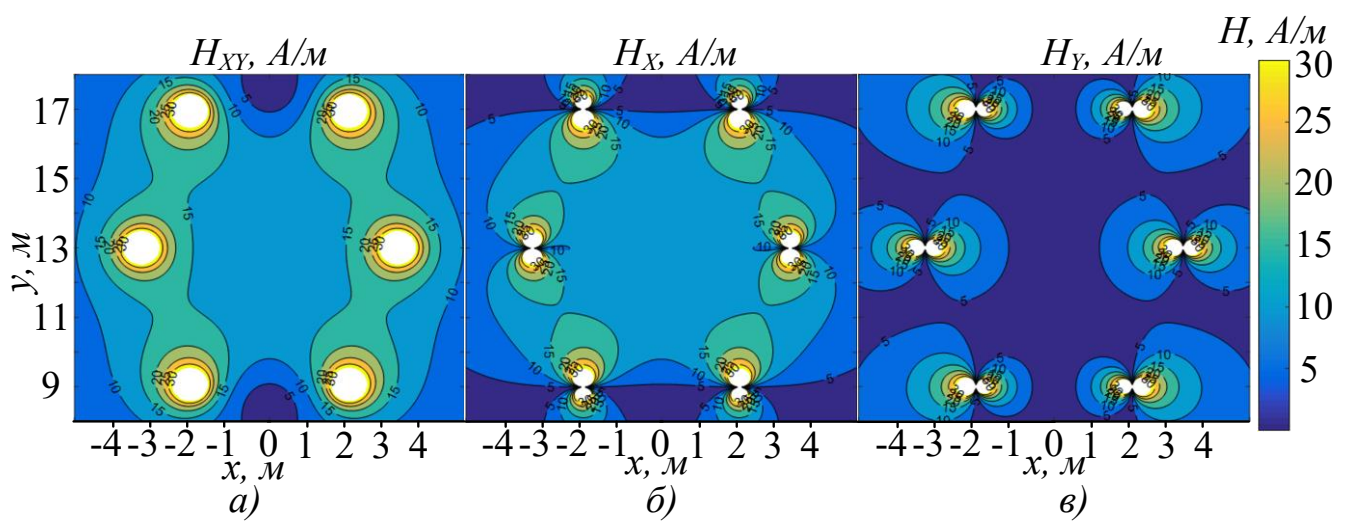


Рисунок 2.12 – Карта для всех составляющих НМП для двухцепной ЛЭП трёхфазном КЗ при однонаправленных одноимённых токах двух ЛЭП: а) для $\dot{H}_{xy}$, б) для $\dot{H}_x$, в) для $\dot{H}_y$

В случае же, если КЗ происходит на одной из параллельных ЛЭП, то с одной из сторон линии будут наблюдаться разнонаправленные токи для одноименных фаз. Названная картина показана на рисунке 2.13.

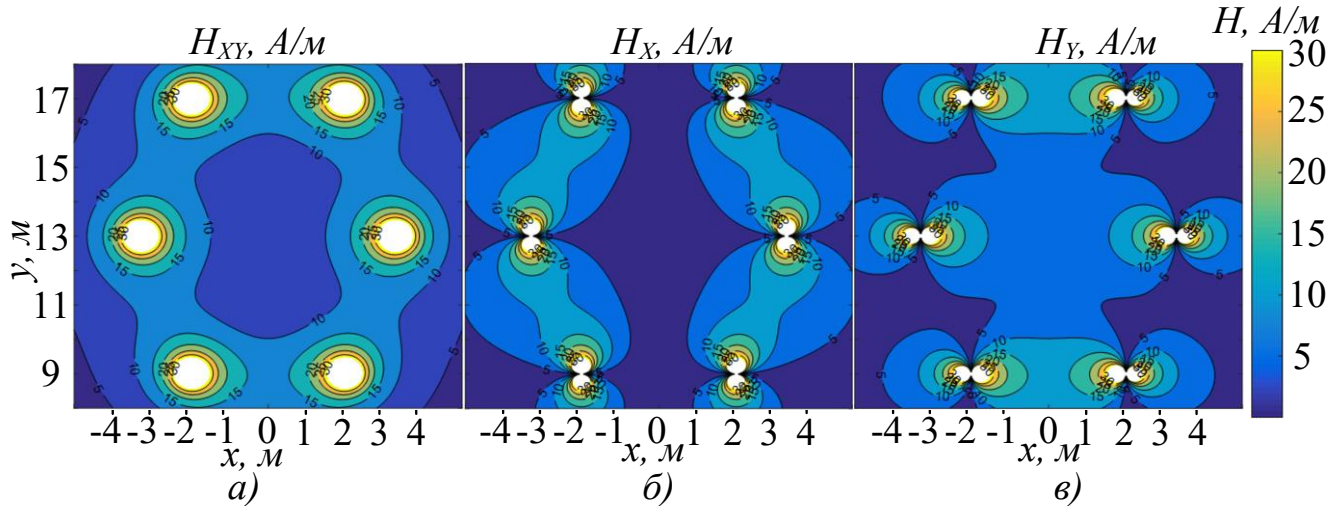


Рисунок 2.13 – Карта для всех составляющих НМП для двухцепной ЛЭП трёхфазном КЗ при разнонаправленных токах двух ЛЭП: а) для $\dot{H}_{xy}$, б) для $\dot{H}_x$, в) для $\dot{H}_y$

Представленные графики созданы в программно-вычислительном комплексе MATLAB с применением встроенного языка программирования для визуализации происходящих процессов изменения НМП возле одноцепной и двухцепной ЛЭП. Исследование магнитного поля двухцепных ЛЭП имеет особую актуальность, так как линии, выполненные на данных опорах, более распространены, поскольку такое выполнение ЛЭП позволяет сократить затраты на строительство линии в части экономии места, в особенности если линии размещены в пределах городской черты.

2.3 Измерение тока в линии электропередачи путём применения датчиков магнитного поля

Вопросам проведения бесконтактных замеров токов проводников без использования ТТ посвящены работы многих отечественных и зарубежных

ученых. Так, в работе [77] рассматривается способ измерения токов каждой фазы трёхпроводной линии сверхвысокого напряжения 750 кВ через замеры НМП ЛЭП посредством применения ДМП.

В качестве ДМП рассматривается одна или несколько параллельно расположенных пластин гальваномагнитных преобразователей Холла. Мгновенное значение суммарного напряжения на выходных электродах можно принять пропорциональным значению нормальной к поверхности пластин слагающей вектора НМП в средней точке расположения ДМП. Коэффициент пропорциональности в этом случае характеризует чувствительность ДМП и может плавно регулироваться изменением управляющего тока.

В случае линейной среды (воздух) вектор НМП в некоторой точке представляет собой геометрическую сумму векторов НМП, возбуждаемого каждым из токов в проводах линии, и представлен в выражении (2.10):

$$\dot{H} = \sum_{S=1}^3 \dot{H}_S; \quad (2.10)$$

где $\dot{H}$ - суммарный вектор результирующей НМП, $\dot{H}_S$ - вектор НМП, возбуждаемого током провода с индексом S .

Измерительный однокоординатный ДМП, представленный в работе [77], реагирует лишь на нормальную к плоскости его пластин составляющую результирующего магнитного поля, как показано в формуле (2.11):

$$\dot{H}_n = \sum_{S=1}^3 \dot{H}_{Sn} = \sum_{S=1}^3 \frac{i_S \sin(\vec{r}_S \hat{n})}{2\pi r_S}; \quad (2.11)$$

где r_S – расстояние от провода с током i_S до точки расположения ДМП, $(\vec{r}_S \hat{n})$ – угол между радиус-вектором и положительным направлением нормали к пластинам датчика, необходимый для моделирования поворота вектора НМП от радиус-вектора расстояния до токоведущих частей на угол 90° . Выходной сигнал ДМП в виде ЭДС при отсутствии других токов и каких-либо помех равен

$$e = \gamma \dot{H}_n = \frac{\gamma}{2\pi} \sum_{S=1}^3 \frac{i_S}{r_S} \sin(\vec{r}_S \hat{n}); \quad (2.12)$$

где γ – чувствительность к магнитному полю для конкретного датчика. Если предположить, что значения токов неизвестны, а геометрические параметры, входящие в правую часть выражения (2.12), известны, и ЭДС Холла поддается измерению, то (2.12) можно рассматривать как алгебраическое уравнение с несколькими неизвестными.

В работе указано, что в общем случае для определения токов в проводах необходимо иметь столько датчиков, расположенных в различных точках пространства, сколько имеется неизвестных токов. Таким образом, с помощью вычислительного устройства можно выделить сигналы, пропорциональные мгновенным значениям токов и их любым линейным комбинациям. Однако этого можно добиться и схемным способом путем соответствующего соединения между собой выходных электродов преобразователей Холла и выбора их чувствительности.

В работе рассмотрена возможность определения фазного тока для одного провода трехфазной линии с помощью двух ДМП с индексами n и m . При произвольном расположении ДМП под ЛЭП (рисунок 2.14) уравнение (2.12) принимает вид, представленный в (2.13):

$$\begin{cases} e_n = \gamma_n \sum_{S=1}^3 i_S \beta_{S,n} \\ e_m = \gamma_m \sum_{S=1}^3 i_S \beta_{S,m} \end{cases}; \quad (2.13)$$

где $\beta_{S,n}$, $\beta_{S,m}$ – функционалы, определяемые расположением и ориентацией ДМП n и m относительно провода с индексом S , сочетающие в себе величины, обратные расстоянию от ДМП до провода, и все сопутствующие константы.

За положительное направление токов фаз принято направление, перпендикулярное плоскости чертежа и обозначенное соответственно через y_m , y_n , x_m , x_n – координаты расположения ДМП под ЛЭП, через α_n , α_m – углы между положительным направлением оси x и нормальными ДМП, отсчитываемым против часовой стрелки ($\dot{H}_m$, $\dot{H}_n$)

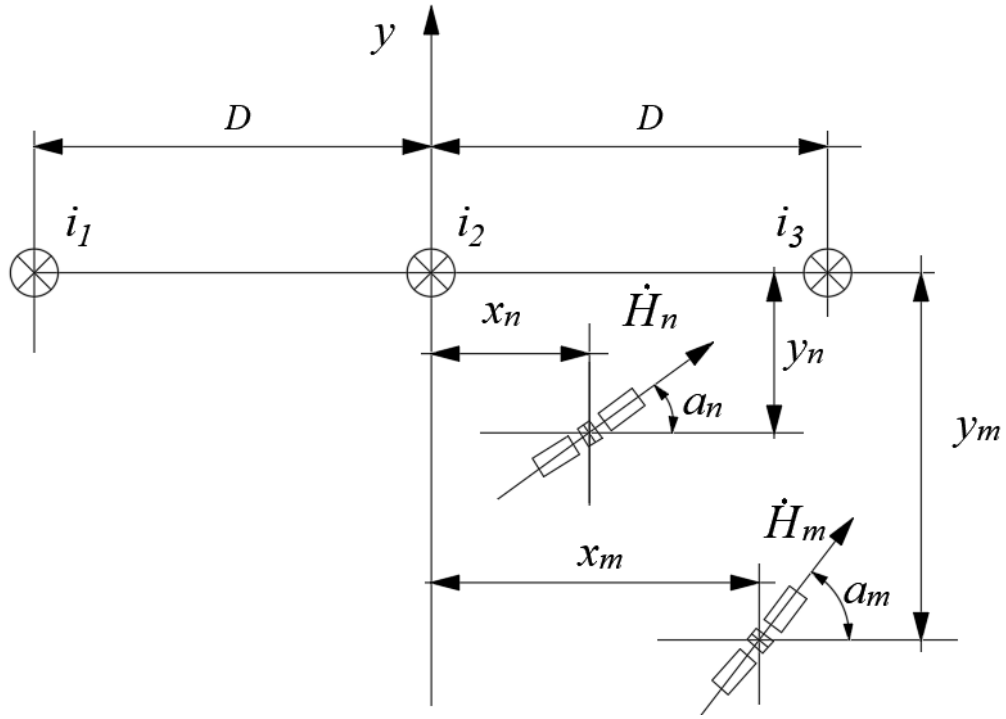


Рисунок 2.14 – Произвольное расположение ДМП под трёхфазной ЛЭП

При этом для ДМП с индексом i величины $\beta_{S,i}$ выразятся в системе (2.14):

$$\begin{cases} \beta_{1i} = \frac{y_i \cos(\alpha_i) - (x_i + 1) \sin(\alpha_i)}{2\pi D [y_i^2 + (1 + x_i)^2]} \\ \beta_{2i} = -\frac{1}{2\pi D} \frac{x_i \sin(\alpha_i) - y_i \cos(\alpha_i)}{y_i^2 + x_i^2} \\ \beta_{3i} = \frac{1}{2\pi D} \frac{(1 - x_i) \sin(\alpha_i) - y_i \cos(\alpha_i)}{y_i^2 + (1 - x_i)^2} \end{cases} ; \quad (2.14)$$

где D – расстояние между близлежащими проводами ЛЭП.

Величины x_i , y_i , в уравнениях системы (2.14) выражены в долях от расстояния между проводами ЛЭП.

Если отношение чувствительностей ДМП к магнитному полю обозначить через $\varepsilon = \gamma_m / \gamma_n$, то выражение для разности ЭДС ДМП запишется выражением (2.15):

$$e = e_n - e_m = \gamma [(\beta_{1n} - \varepsilon \beta_{1m}) i_1 + (\beta_{2n} - \varepsilon \beta_{2m}) i_2 + (\beta_{3n} - \varepsilon \beta_{3m}) i_3] \quad (2.15)$$

Отсюда можно увидеть, что для измерения тока одной фазы необходимо, чтобы коэффициенты, стоящие перед токами других фаз, были равны нулю. В частности, для измерения тока i_1 необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\begin{cases} (\beta_{3n} - \varepsilon \beta_{3m}) = 0; \\ (\beta_{2n} - \varepsilon \beta_{2m}) = 0; \end{cases} \quad (2.16)$$

С учетом системы (2.14) уравнения (2.16) примут вид:

$$\begin{cases} \frac{x_n \cdot \sin \alpha_n - y_n \cdot \cos \alpha_n}{x_n^2 + y_n^2} - \varepsilon \cdot \frac{x_m \cdot \sin \alpha_m - y_m \cdot \cos \alpha_m}{x_m^2 + y_m^2} = 0; \\ \frac{(1-x_n) \cdot \sin \alpha_n - y_n \cdot \cos \alpha_n}{(1-x_n)^2 + y_n^2} - \varepsilon \cdot \frac{(1-x_m) \cdot \sin \alpha_m - y_m \cdot \cos \alpha_m}{(1-x_m)^2 + y_m^2} = 0. \end{cases} \quad (2.17)$$

Система уравнений (2.17) содержит семь неизвестных и, следовательно, имеет бесчисленное множество решений. Налагая ряд дополнительных условий (например, размещение ДМП на безопасном расстоянии от проводов ЛЭП, получение максимального выходного сигнала, минимизация помех от токов соседний ЛЭП), можно получить интересное решение. Например, если принять $x_m=0$, $\alpha_n = \alpha_m=0$, $y_n=y_m=y$, $x_n=-D$, то решение (2.17) имеет вид $y=D/\sqrt{2}$, $\varepsilon=1/3$, как указанное расположение на рисунке 2.15. На данном рисунке указаны положительные направления ЭДС Холла, соответствующие направления магнитных полей.

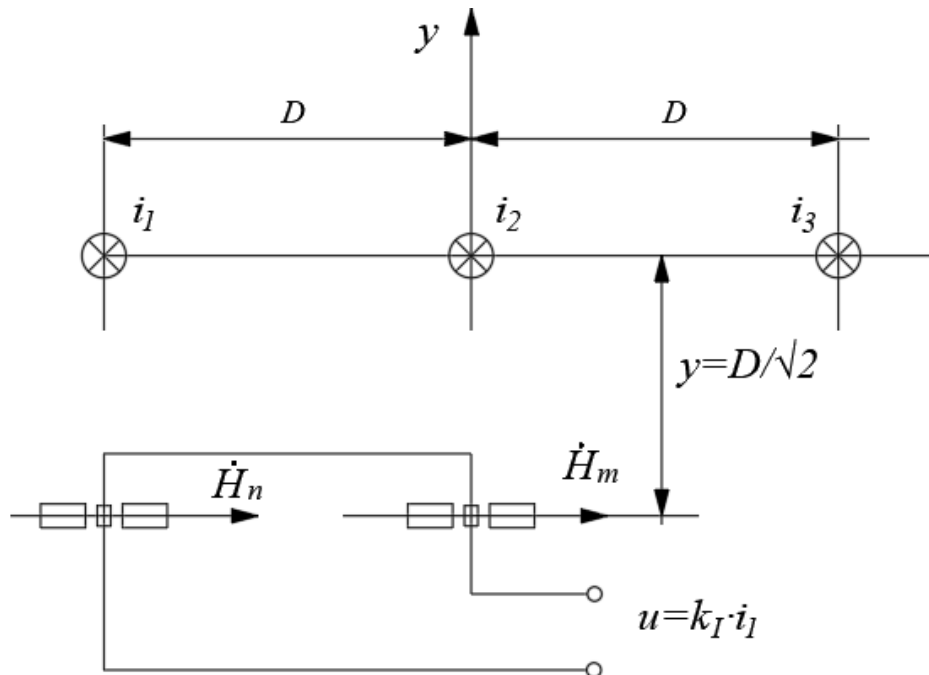


Рисунок 2.15 – Дистанционное измерение тока i_1 двумя ДМП

При этом, как указывалось ранее, бесконтактное измерение токов линии и их симметричных составляющих может быть произведено при различных способах размещения ДМП под ЛЭП, удовлетворяющих соответствующим уравнениям. Поэтому при решении вопроса о размещении ДМП под линией можно накладывать дополнительные ограничения. В них целесообразно принять условия получения максимального сигнала, минимизации влияния магнитных полей токов соседних ЛЭП на показания бесконтактной системы измерения. При этом ДМП должны располагаться на достаточном удалении от высоковольтных проводов ЛЭП, т. е. их координаты размещения должны удовлетворять уравнению (2.18):

$$\begin{cases} \sqrt{x^2 + y^2} \geq R_{don} \\ \sqrt{(1-x)^2 + y^2} \geq R_{don} \end{cases}; \quad (2.18)$$

где R_{don} – допустимое расстояние от провода ЛЭП до датчика.

В работе указано, что с точки зрения безопасности обслуживания ДМП зона, в которой они могут быть установлены, определяется с помощью окружностей радиуса $R_{don} > 0,5D$, центрами которых являются высоковольтные провода.

Одним из недостатков, указанных в работе [77], является тот факт, что все аналитические выражения в части оптимального размещения ДМП под ЛЭП для необходимости измерения фазных токов, а также создания фильтров симметричных составляющих [78, 79] были выведены для частного случая относительно одноцепной трёхфазной линии, где все три провода расположены на одной горизонтальной плоскости. Безусловно, в работе указано, что «предлагаемый подход к решению остаётся верным и для многопроводной линии с проводами, не лежащими в одной плоскости», однако определение оптимальных точек размещения ДМП под линией иной конфигурации требует проведения более сложных вычислительных операций, не представленных в работе.

Работа устройства измерителей магнитного поля проверялась в цепях РЗ ЛЭП. В частности, была проверена работа бесконтактных систем в цепях

быстродействующей опытной РЗ. Указанная защита была разработана в лаборатории электросистем Энергетического института им. Г. М. Кржижановского, а опытная установка была смонтирована на ПС 750 кВ Белый Раст для защиты ВЛ 750 кВ Опытная – Белый Раст [77] (рисунок 2.16).

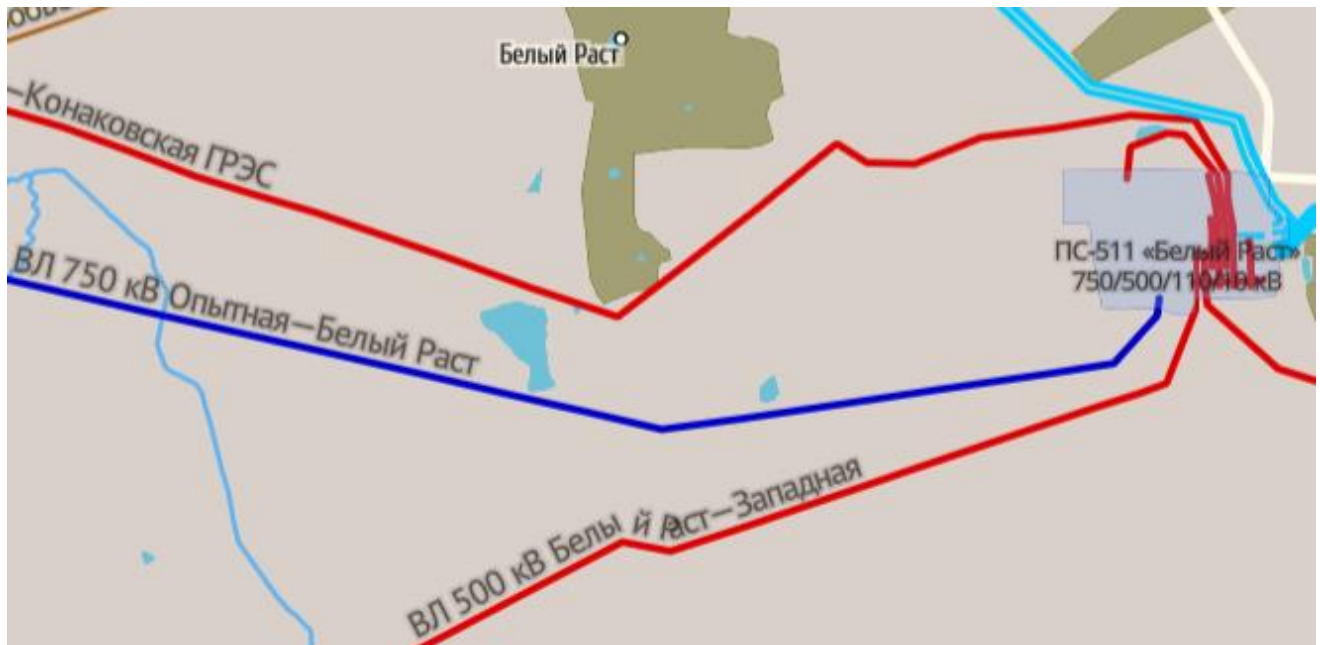


Рисунок 2.16 – Расположение ВЛ 750 кВ Опытная – Белый Раст

Однако представленная ЛЭП сверхвысокого напряжения являлась «идеальным» случаем ЛЭП, когда каждая фаза располагалась на своей опоре (рисунок 2.17).

Одним из обоснований проведения исследований замеров тока и симметричных составляющих для ЛЭП сверхвысокого напряжения 750 кВ был тот факт, что измерения тока на данных ЛЭП проводятся посредством многокаскадных ТТ, и при переходных процессах в первичной сети такие ТТ в дополнение ко всему будут фиксировать во вторичной обмотке собственные переходные процессы [80]. Поэтому погрешности при переходных процессах и инерционность этих ТТ ещё больше, чем у ТТ обычной конструкции. В связи с этим, как альтернатива многокаскадным ТТ, была предложена и рассмотрена концепция замера токов первичной сети с помощью бесконтактной системы измерения, основанной на ДМП.



Рисунок 2.17 – Конструкция однофазных опор ВЛ 750 кВ Опытная – Белый Раст

Аналогичные упрощения и допущения встречаются в работах зарубежных авторов, занимающихся задачей получения замеров токов ВЛ через ДМП, как показано на рисунке 2.18 [81, 82, 83, 84].

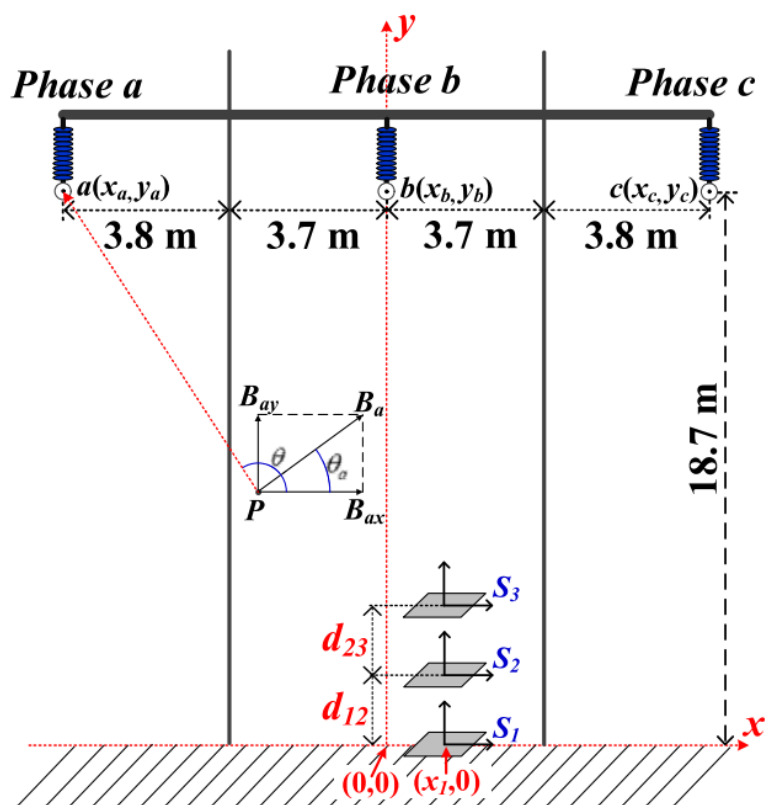


Рисунок 2.18 – Геометрия опоры ЛЭП 240 кВ в Канаде с размещением под ней ДМП

Безусловно, исследование замеров токов с помощью ДМП для линий данного типа тоже является актуальной задачей, но более распространенными являются ВЛ более низких классов напряжения, выполненные либо на одноцепных опорах с разной конфигурацией расположения проводников, либо на двухцепных опорах с симметричным расположением токоведущих частей относительно центра опоры с учётом шести проводников на одной опоре.

Следовательно, разработка способов и алгоритмов, позволяющих реализовать устройство РЗ, базирующейся на замерах от ДМП для двухцепных и одноцепных ВЛ с разной конфигурацией расположения фаз на опоре, а не только в одной горизонтальной плоскости, также представляет собой актуальную задачу.

2.4 Способы и устройства измерения напряжённости магнитного поля промышленной частоты

Одним из самых распространённых «контактных» способов измерения параметров токов в первичной сети является традиционный индуктивный ТТ. Самыми значимыми недостатками данного способа измерения являются такие эффекты ТТ как гистерезис, насыщение, остаточное намагничивание, резонанс [85]. Если сравнивать их характеристики с системами бесконтактного измерения, то можно выявить следующее: ТТ дороже в производстве, установке и проведении проверки, так как присутствуют затраты на создание изоляции между вторичной и первичной сетью, они имеют большую вероятность повреждения при КЗ в месте их установки, как следствие, при возникших повреждениях больше время замены и возобновления работы ТТ с учетом необходимости аварийного отключения ЛЭП и прекращения электроснабжения потребителей. ТТ могут являться ограничивающим элементом по пропускной способности в части максимально допустимого тока ЛЭП, когда нет возможности увеличить коэффициент трансформации ТТ из-за малых величин токов КЗ в минимальном режиме работы сети, когда МП терминалы уже не смогут адекватно воспринимать вторичный ток из-за ограничения диапазона измерения. Существует опасность для обслуживающего персонала при работе во вторичных цепях ТТ.

Как альтернатива традиционным контактным измерителям, появляются бесконтактные измерители, на основе которых можно реализовать бесконтактные системы измерения параметров первичной сети. Такими измерителями являются: индукционные катушки [86, 87, 88], бесконтактная измерительная система по радиоканалу [89, 90, 91], катушки Роговского [92, 93, 94], герконы [95, 96, 97], преобразователи Холла [98] в виде магнитотранзисторных датчиков [99, 100, 81].

В случае использования в качестве ДМП индукционной катушки получить достаточный выходной сигнал возможно только при значительном увеличении ее размеров. Поэтому ранние варианты этих датчиков имели вид проволочных рамок больших размеров [86].

Катушки больших размеров вносят погрешность в измерение и неудобны в эксплуатации. Наиболее перспективными являются ДМП, представляющие собой индукционные катушки, намотанные на ферромагнитные сердечники, служащие усилителями магнитного поля. При таком выполнении датчиков необходимая чувствительность достигается уже при малых размерах катушек.

Основной недостаток бесконтактного способа измерений токов высоковольтных установок с потенциала земли с помощью катушек индуктивности заключается в подверженности их влиянию магнитных полей от токов соседних проводов. Эти поля создают в обмотке датчика электродвижущие силы помех, снижающие точность измерений. Естественно, чем ближе расположен ДМП к проводу с контролируемым током и больше удален от соседних проводов, тем меньше помехи. Одним из основных недостатков индукционных бесконтактных систем для измерения токов ЛЭП является их инерционность. Последняя определяется в основном большим сопротивлением самоиндукции индукционных катушек.

Большое сопротивление самоиндукции индукционных катушек и зависимость указанного сопротивления от частоты измеряемого тока затрудняет применение этих устройств для точной передачи формы кривой токов линии в различных режимах работы ЛЭП и в схемах быстродействующих РЗ.

В части устройств, основанных на передаче информации о параметрах первичной сети со стороны высокого напряжения через радиоканал (рисунок 2.19), измерения реализуются следующим образом.

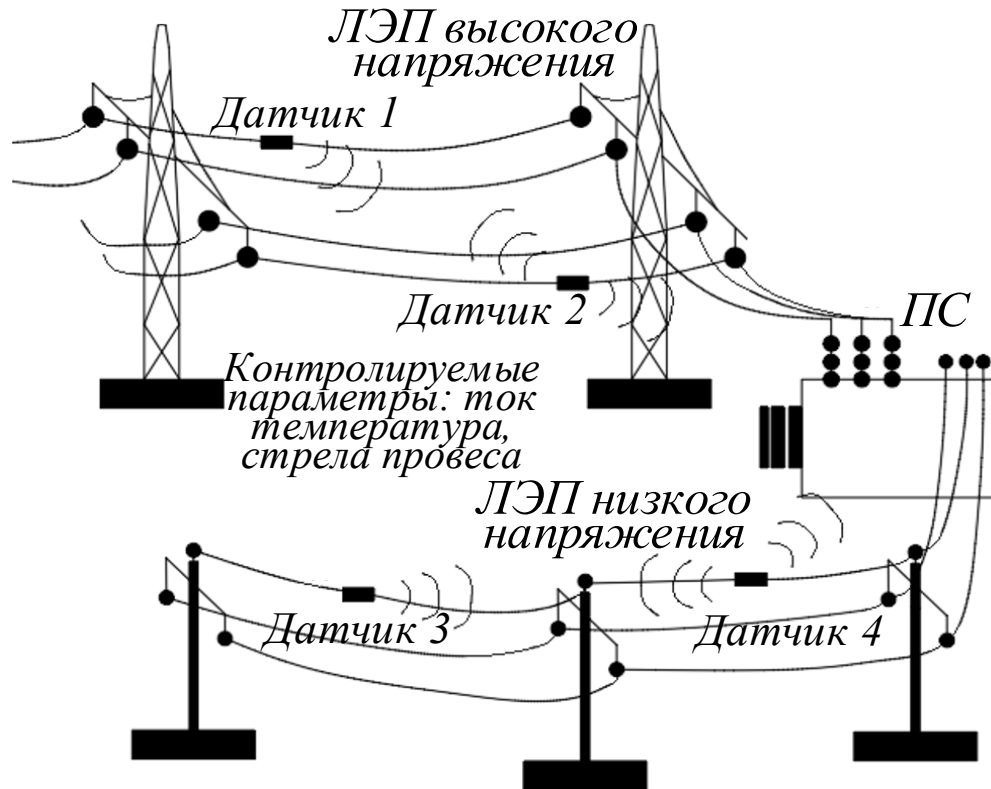


Рисунок 2.19 – Бесконтактная измерительная система по радиоканалу

Сигнал, пропорциональный измеряемому току, направляется с помощью передатчика, который полностью изолирован от земли и, следовательно, пригоден для использования при любом напряжении сети. Передатчик действует на принципе частотной модуляции в диапазоне 88-108 МГц и позволяет осуществлять надежный прием на расстоянии до 30 м, в то время как приемная антенна располагается обычно в 6 метрах от передатчика. Желательно, чтобы передающая и приемная антенны были удалены от коммутационных аппаратов. Антенна связана с приемником коаксиальным кабелем. Энергия для работы передатчика отбирается от тока линии, для чего применяются насыщающийся ТТ и стабилизатор. Время задержки сигнала составляет около 2 миллисекунд, а стоимость таких бесконтактных систем в несколько раз меньше покупки

традиционных ТТ. В результате полевых испытаний такой бесконтактной системы установлено, что точность измерения достаточна для устройств РЗ, но мала для измерительных приборов, в частности счетчиков [89].

Недостатки системы – трудность разделения соседних каналов; существенное влияние высокочастотных составляющих при переходных процессах на линии; влияние короны и внешних электромагнитных полей высокой частоты на радиоканал.

Катушка Роговского представляет собой измерительный прибор, используемый для бесконтактного измерения переменного тока в проводнике с помощью магнитного поля, создаваемого этим током. Она относится к подтипу ТТ, но, в отличие от традиционных ТТ, у неё отсутствует сердечник, и передача магнитного потока происходит непосредственно через воздушную среду, что позволяет охватывать токоведущую часть. Катушка Роговского представляет собой гибкий проводник, равномерно намотанный на непроводящий замкнутый каркас, обычно кольцо или петлю. Принцип действия катушки Роговского похож на индукционные катушки, однако отличительной её особенностью является то, что она должна быть закреплена непосредственно вокруг проводника (рисунок 2.20).

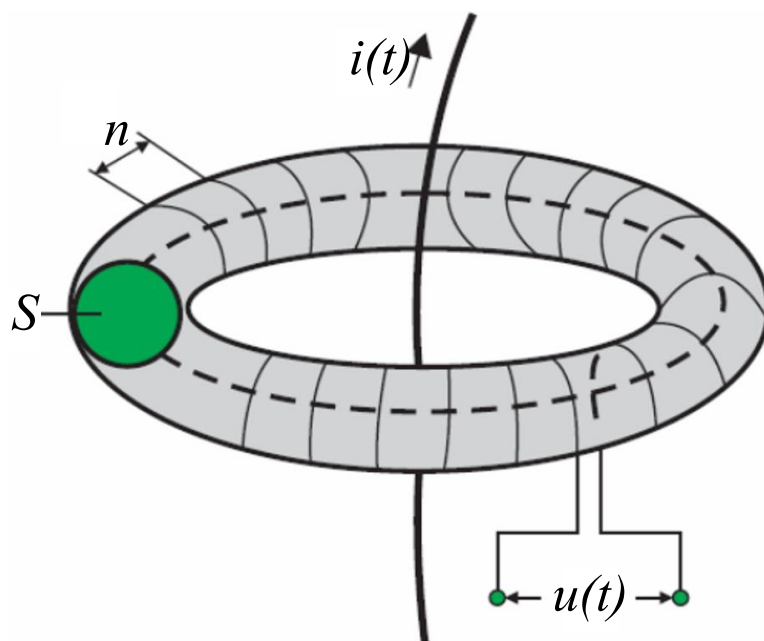


Рисунок 2.20 – Принцип работы измерителя на основе катушки Роговского

Основной недостаток катушки Роговского заключается в том, что так как она крепится непосредственно возле проводника, то в любом случае расстояние до токоведущих частей от данной катушки будет меньше безопасно допустимых, следовательно, при её монтаже или снятии для проведения проверки даже одной фазы необходимо будет производить отключение всей ЛЭП. Также для правильной работы измерителя необходимо, чтобы каждая составляющая окружности катушки находилась на одинаковом расстоянии от провода для создания равномерного и однородного поля от измеряемой фазы и компенсации помех от соседних фаз (рисунок 2.21). Следующую проблему для данной катушки составляет несовершенство замка измерительной петли, также вносящей ошибки в измерение.

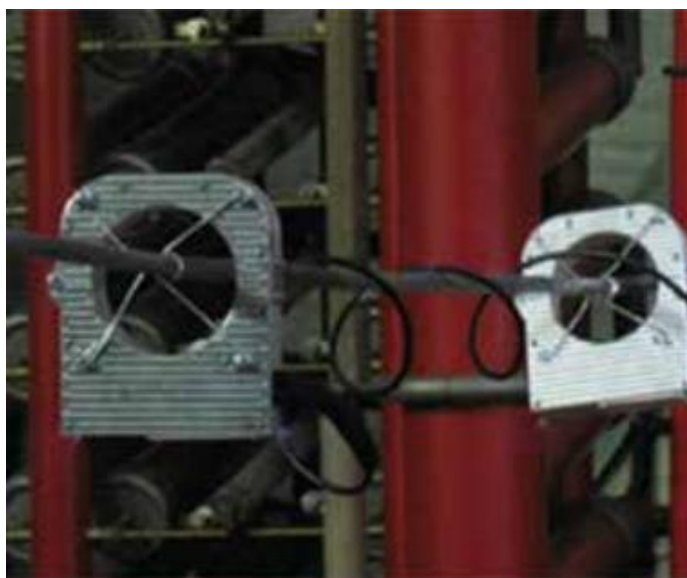


Рисунок 2.21 – Установка катушки Роговского возле проводника

РЗ на герконах описана в работах [95, 98, 101]. Герконы, или герметичные контакты, представляют собой запаянное, в изолированной от внешней среды колбе, коммутирующее устройство в виде двух контактов, подвижного и неподвижного, производящее коммутацию за счёт действия внешней магнитодвижущей силы, превышающей значение срабатывания и достаточной для замыкания контакта. Принцип работы устройства показан на рисунке 2.22, где при влиянии магнитного поля, создаваемого проводником 3 на контакт геркона 1,

находящегося в колбе 2, происходит его периодическое замыкание на промежутке времени t_1 и отпадание на промежутке t_2 .

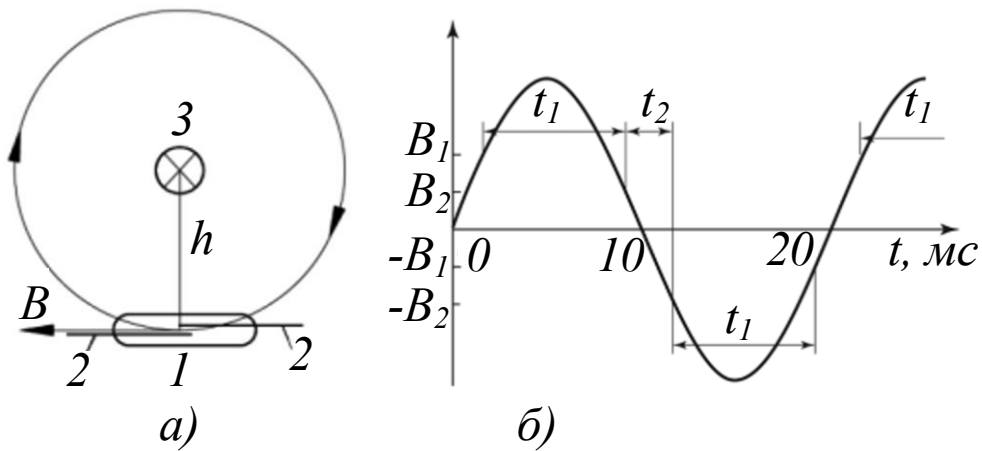


Рисунок 2.22 – Размещение геркона рядом с проводником: а) 1 колба геркона; 2 контакты геркона; 3 проводник б): момент срабатывания контакта геркона

Основным отличием герконов от остальных бесконтактных устройств измерения параметров режима первичной сети является то, что они относятся к аналоговым устройствам, производящим непосредственные реакции на воздействие магнитного поля в виде замыкания металлических контактов. Это позволяет упростить и удешевить их технологию изготовления, сделать их массово доступными и простыми в реализации. Время замыкания контактов зависит от величины протекающего в проводнике тока. Однако периодические коммутации геркона могут привести к износу контактной системы, что может потребовать их периодической замены. Ещё одним недостатком может стать эффект «залипания» контактов в результате их износа, когда при отсутствии внешнего воздействия магнитного поля контакты остаются в замкнутом состоянии. Также для них присутствует эффект дребезга контактов, что приводит к необходимости применения дополнительных технических решений для минимизации их влияния на систему измерения, созданную с применением герконов. Из-за частых коммутаций может происходить существенный разброс технических параметров в части возврата и срабатывания. В связи с тем, что герконы передают только дискретные сигналы замкнутого и разомкнутого

состояния, отсутствует возможность посредством герконов получать синусоидальные сигналы, создаваемые током промышленной частоты.

Стоит отметить использование датчиков Холла для измерения параметров первичной сети через магнитное поле. Датчик Холла – это устройство, способное фиксировать измерение магнитного поля через изменение параметров магниточувствительного низкоомного полупроводникового материала посредством замера падения напряжения на данном материале при протекании через него фиксированной величины тока. В настоящее время на основе эффекта Холла реализованы современные магнитотранзисторные датчики. Общий принцип действия датчика Холла показан на рисунке 2.23, где под C представлен магниточувствительный материал, I представляет собой постоянную величину тока, протекающую через полупроводниковый материал, B – индукция магнитного поля, E – выходная ЭДС, изменяющаяся пропорционально изменению индукции магнитного поля B .

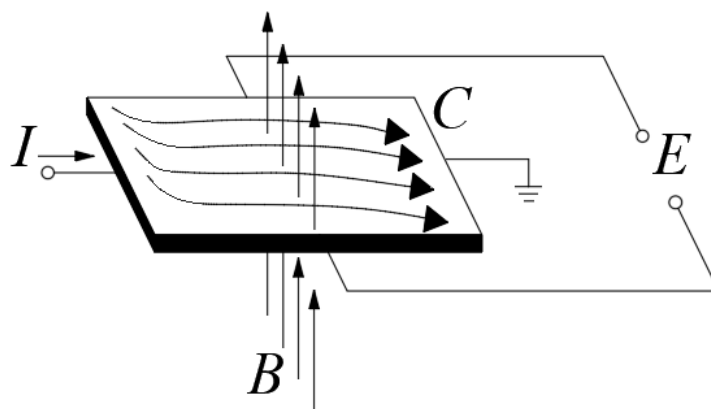


Рисунок 2.23 – Иллюстрация эффекта Холла

К достоинствам метода бесконтактного измерения токов, основанного на использовании преобразователей Холла, относятся:

- 1) Отсутствие задержки передачи данных, что делает датчики Холла безынерционными измерителями в отличие от индуктивных катушек и позволяет передавать параметры переходных процессов в их исходном виде;

2) Посредством эффекта Холла можно фиксировать изменения как постоянных магнитных полей, так и переменных, что наделяет данные датчики свойством универсальности применения для различных типов задач;

3) В случае стационарных параметров среды, в которой находится датчик, у него сохраняется свойство передачи выходного напряжения прямо пропорционально величине магнитного поля, где в роли связывающего коэффициента пропорциональности представленной линейной зависимости выступает постоянная Холла [103];

4) Произведение двух измеряемых параметров позволяет реализовать бесконтактное измерение не только токов линий, но и мощности и других электрических величин, характеризующих режим ЛЭП.

Применение концентраторов магнитного поля в качестве усилителей и способа суммирования выходных напряжений преобразователей Холла, предложенных в [104], позволили существенно увеличить чувствительность бесконтактной системы к магнитному полю при сохранении безынерционности и линейности измерителя в случаях больших кратностей токов КЗ. Обзор современных устройств на базе датчиков Холла, а также недостатки данных датчиков и способы борьбы с указанными недостатками представлены в «Приложение А – Описание существующих датчиков магнитного поля и факторов, влияющих на точность измерений».

Основное преимущество магнитотранзистронных датчиков Холла перед катушками индуктивности или катушками Роговского заключается в том, что хоть данные измерители тоже реагируют именно на НМП, выходной сигнал с катушек формируется $e = W \cdot d\Phi/dt$. Где ЭДС e определяется скоростью изменения магнитного потока Φ , создаваемым токами в проводниках ВЛ, с учётом количества витков W . У датчиков Холла же ЭДС на выходе прямо пропорциональна непосредственно действующему значению НМП $\dot{E} = \gamma \dot{H}$, где γ – коэффициент чувствительности к магнитному полю, следовательно, сигнал с датчиков Холла более стабилен, и менее подвержен влиянию резкопеременных помех. В случае $\gamma = 0,01$, ЭДС на выходе будет идентично величине НМП

(например, $10 \text{ В} \equiv 1000 \text{ А/м}$), что удобно для проверки защит. Проверка для соотношения $e=W \cdot d\Phi/dt$ будет проводиться значительно сложнее.

2.5 Разработка защиты с абсолютной селективностью для одноцепной линии с применением датчиков магнитного поля

2.5.1 Способ получения замеров магнитного поля для создания защиты с абсолютной селективностью

Исходя из вышеизложенного, благодаря существующим приборам, устройствам и методам, имеются способы получения замеров рабочих токов и токов КЗ ЛЭП с использованием ДМП на основе эффекта Холла в виде магнитотранзисторов, модифицированные таким образом, чтобы они были предназначены для проведения замеров для выбранной ЛЭП и имели максимальную помехозащищенность от воздействия внешних факторов. Однако существующие алгоритмы получения замеров фазных токов требуют для своей работы несколько ДМП под одной ЛЭП для исключения влияния магнитного поля смежных фаз. В общем случае для измерения тока одного провода в N -проводных системах с помощью ДМП и исключения влияния магнитных полей других проводов необходимо использовать $2N$ ДМП [77].

Из этого следует, что в случае если ДМП используются как промежуточные измерители для получения фазных токов, то для одноцепной ЛЭП в лучшем случае потребуется 6 ДМП с одной стороны ВЛ, а в совокупности с учётом другой стороны – 12 ДМП для создания защиты с абсолютной селективностью. Однако, исходя из ранее проведенного в данной работе исследования структуры магнитного поля ЛЭП по его ортогональным и полной составляющим, может быть сделан вывод, что при одинаковых токах с обеих сторон ЛЭП картины магнитных полей, а также замеры магнитного поля в точках одинаковой удаленности от ЛЭП в случае использования однотипных опор в начале и конце ЛЭП, также будут идентичны. Исходя из этого следует, что при внешних для рассматриваемого элемента КЗ токи, проходящие через элемент,

тоже будут идентичны друг другу по каждой из фаз. Тогда данное явление можно использовать для реализации защиты с абсолютной селективностью не через замеры токов по ДМП пофазно, а используя суммарный результирующий замер НМП от всех трёх фаз в определенной области пространства.

Используя дифференциальный принцип, можно сравнивать замеры магнитного поля возле идентичных опор ЛЭП по разным концам линии при установке ДМП симметрично относительно фазных проводов опоры с двух сторон, при этом для одноцепной опоры достаточно установить только по одному датчику с каждой стороны, как указано на рисунке 2.24.

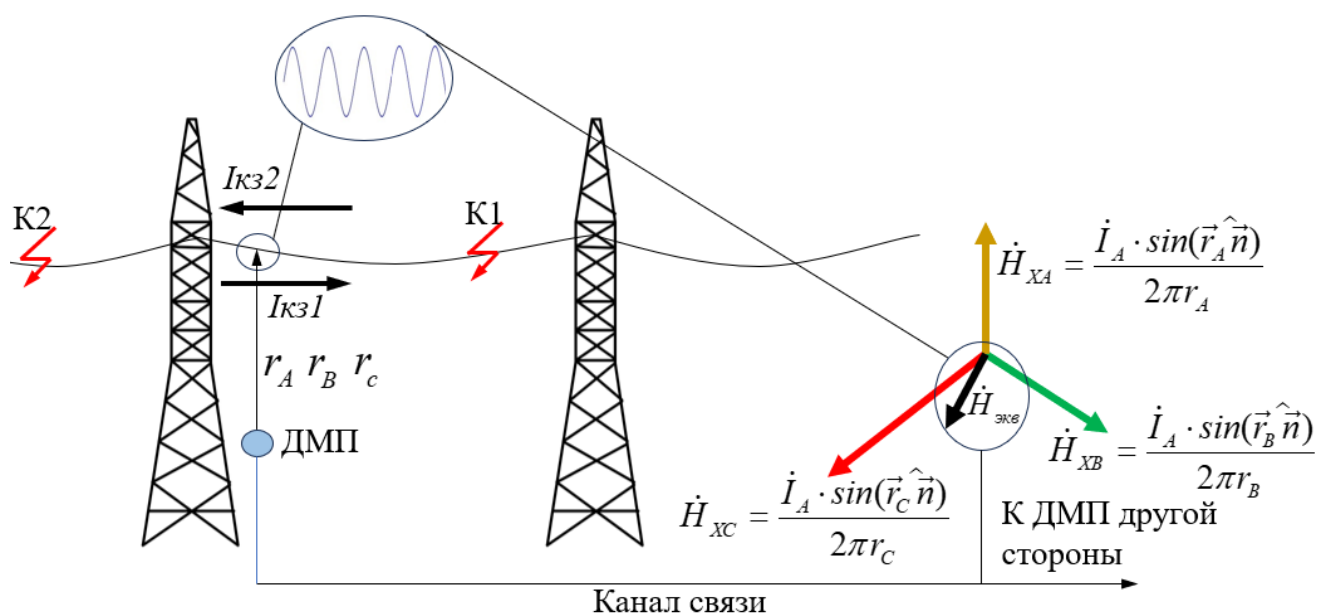


Рисунок 2.24 – Размещение ДМП рядом с опорой с одной стороны

Измерительные ДМП должны находиться на максимально близком расстоянии к защищаемой ВЛ для возможности получения максимальных величин НМП, но одновременно с этим должно соблюдаться противоположное условие по обеспечению безопасного расстояния до токоведущих частей для исключения вероятности перекрытия с фазы на ДМП, а также с целью безопасного для персонала обслуживания ДМП. Тогда данные датчики при соблюдении вышеуказанных условий будут по принципу размещения настроены именно на замеры магнитного поля самой близкой ЛЭП. Учитывая тот факт, что датчики

будут установлены возле первой опоры ЛЭП, с которой начинается линия, они также будут удалены на некоторое расстояние от самой ПС, где помехи от ближайших не параллельных ЛЭП будут многократно ниже, чем замеры поля своей ЛЭП.

После размещения ДМП рядом с опорой показания замеров от ДМП до главного щита управления ПС передаются через проложенный кабель, через которой одновременно обеспечивается и питание ДМП. Далее показания с ДМП заводятся в цифровой терминал защиты, способный производить обработку синусоидальных сигналов. Два терминала по концам ВЛ имеют канал связи, аналогичный современным устройствам ДЗЛ, для возможности обмена информацией [105] (рисунок 2.25).

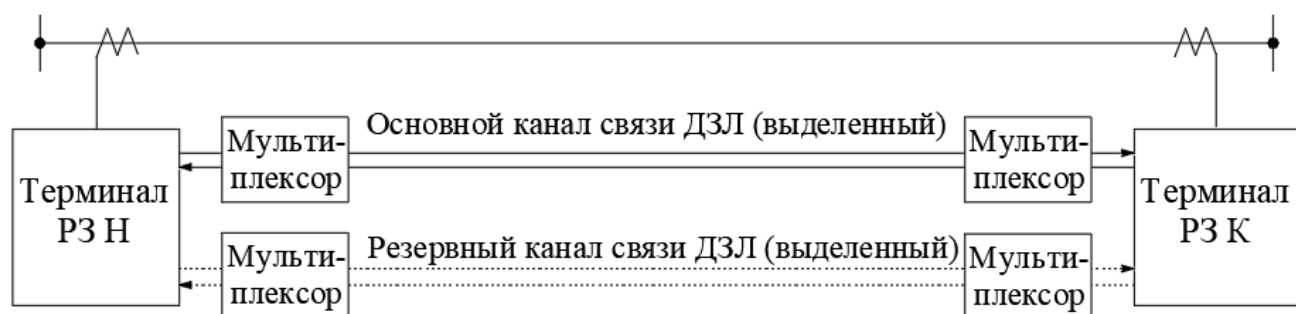


Рисунок 2.25 – Реализация канала связи для терминалов РЗ

Предлагается рассмотреть на примере рисунка 2.26 опору ПМ-110-1 при размещении ДМП симметрично с двух сторон относительно одноцепной опоры ЛЭП в произвольной точке пространства KLMN под опорой [75].

Будут сравниваться замеры НМП в точке с произвольными координатами с использованием уравнений НМП по системе (2.7) с учетом воздействия его ортогональных составляющих, которые способны измерять трёхкоординатные ДМП. Расстояние от точки установки ДМП до фазных проводов рассчитывается по формуле (2.9). Место установки ДМП задано координатами (2; 10) по оси x и y соответственно, в метрах. На данном примере предлагается рассмотреть функционирование защиты в режиме внешнего КЗ и при внутреннем КЗ. Первоначально рассматривается трёхфазное КЗ. Величина тока КЗ задана 1000 А.

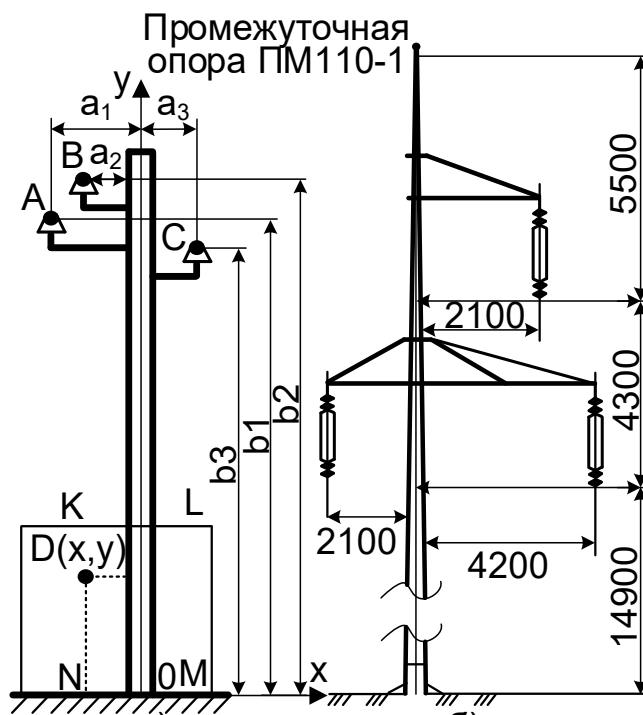


Рисунок 2.26 – Зона KLMN под опорой ПМ-110-1

Рассматривается более тяжёлый для защиты режим одностороннего питания. Зона действия защиты с абсолютной селективностью ограничена местом установки ДМП, а так как ДМП будут устанавливаться рядом с первыми опорами ЛЭП, то зона действия защиты также будет ограничена данными опорами. Расчеты замеров выполняются в динамической модели MATLAB Simulink (рисунок 2.27), на которой формируются замеры составляющих магнитного поля $\dot{H}_x$, $\dot{H}_y$, $\dot{H}_{xy}$ с каждой стороны защищаемой ВЛ.

Затем в соответствии с выражением (2.19) определяется результирующее среднеквадратичное значение суммарной НМП $\dot{H}_{xy,рез}$.

$$\dot{H}_{xy.H} + \dot{H}_{xy.K} = \dot{H}_{xy.рез} \quad (2.19)$$

где $\dot{H}_{xy.H}$ – комплексное значение пространственного вектора суммарной НМП от всех проводников в начале ВЛ; $\dot{H}_{xy.K}$ – комплексное значение пространственного вектора суммарной НМП от всех проводников в конце ВЛ. При внешнем для рассматриваемой защиты КЗ результирующее значение НМП будет приблизительно равно нулю $\dot{H}_{xy.рез} \approx 0$, а при КЗ в зоне по аналогии с ДЗЛ

результатирующий замер будет равен сумме замеров НМП со стороны начала и конца линии. В случае режима одностороннего питания сигнал защиты равен замеру НМП со стороны начала ВЛ $\dot{H}_{XY,рез} = \dot{H}_{XY,H.}$. Сначала будет произведено сравнение при идеальной симметрии расположения ДМП с двух сторон (рисунок 2.28).

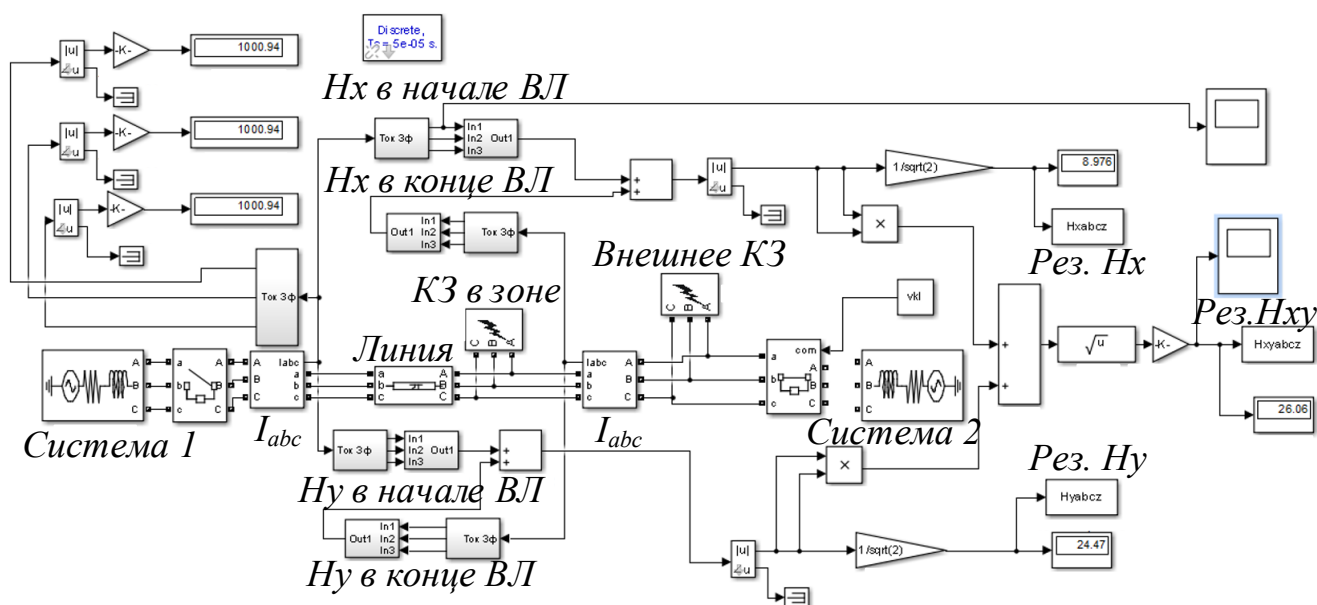


Рисунок 2.27 – Модель защиты с абсолютной селективностью для одноцепной ЛЭП с использованием ДМП в среде MATLAB Simulink

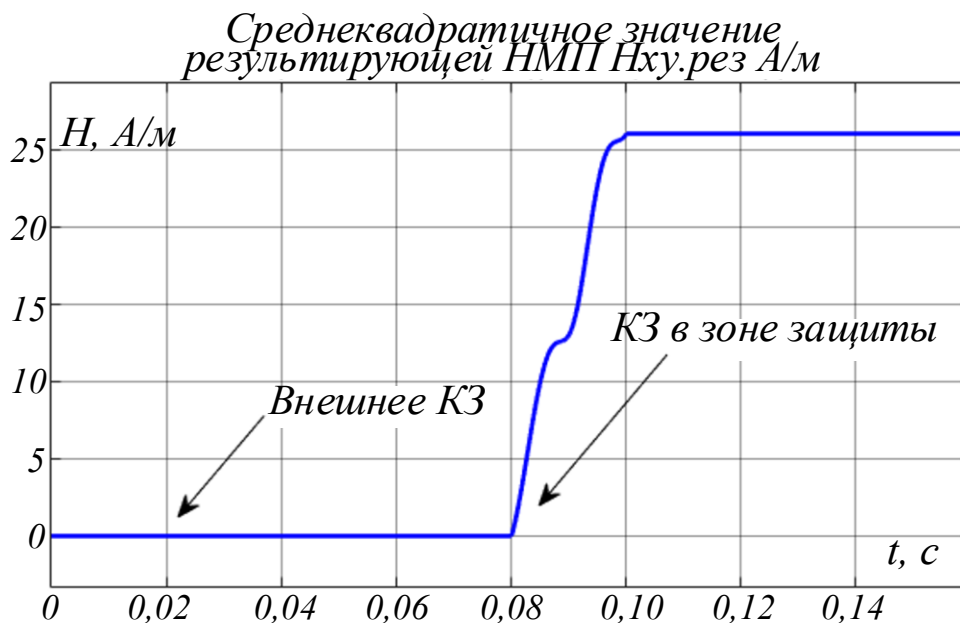


Рисунок 2.28 – Замер результирующей НМП $\dot{H}_{XY,рез}$ при идентично размещенных ДМП по концам ЛЭП

Если задаться небольшим небалансом в замерах при внешних КЗ с учетом того, что ДМП в конце ВЛ будет размещен в координатах (1,5; 9,5) с «промахом» установки в полметра по обеим осям координат, то будет получен немного иной результат (рисунок 2.29).

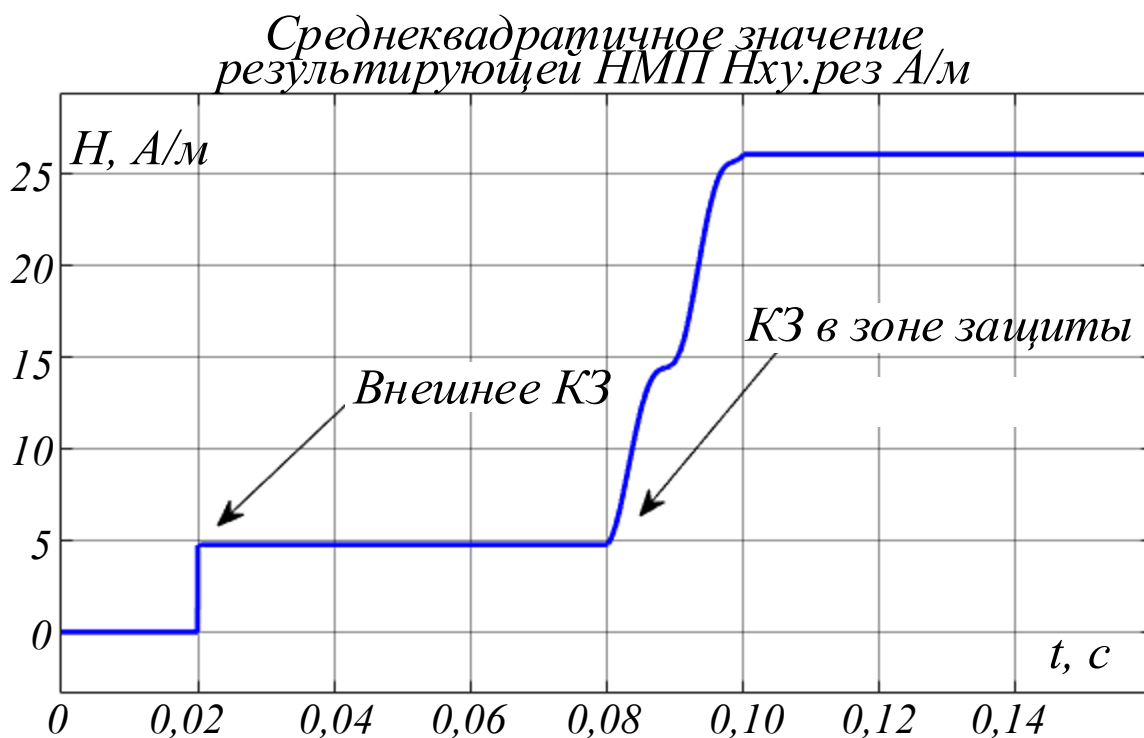


Рисунок 2.29 – Замер результирующей НМП $\dot{H}_{xy.рез}$ при погрешности размещения ДМП в 0,5 м

Как можно увидеть из вышеуказанных графиков, даже при ошибке размещения ДМП относительно друг друга на 0,5 м, где координаты размещения ДМП в начале ВЛ (2; 10), а координаты ДМП в конце ВЛ (1,5; 9,5), замер при КЗ в зоне действия защиты в пять раз превышает небаланс при внешнем КЗ. Все замеры проведены в произвольной точке размещения ДМП. В следующем разделе рассматриваются условия оптимального размещения ДМП относительно одноцепной опоры для получения максимального замера НМП при всех видах внутренних КЗ и обеспечения безопасного расстояния до токоведущих частей.

Технически при размещении возле опор симметрично не будет разницы размещать единичную катушки или датчик Холла в выбранной оптимальной

точке, если не считать условия, приведенные в разделе 2.4. Однако если сравнивать с катушкой Роговского, устанавливаемую в каждую фазу, то их потребуется суммарно 6 штук (против 2 ДМП Холла и обычных катушек), по данному условию катушка Роговского проигрывает.

2.5.2 Определение оптимальной траектории размещения датчиков магнитного поля возле одноцепной линии

Для выбора оптимального места размещения ДМП возле фаз одноцепной ЛЭП необходимо определиться с траекторией точек его возможного размещения на примере опоры ПМ-110-1, указанной на рисунке 2.30. Для напряжения 110 кВ регламентируется минимально допустимое расстояние, измеряемое техническими средствами в 4 метра [106]. Для визуализации этого расстояния в плоскости сечения трассы ЛЭП подойдет функция окружности, обеспечивающая равноудалённое расстояние от рассматриваемой точки до её центра, которым будет считаться фазный провод.

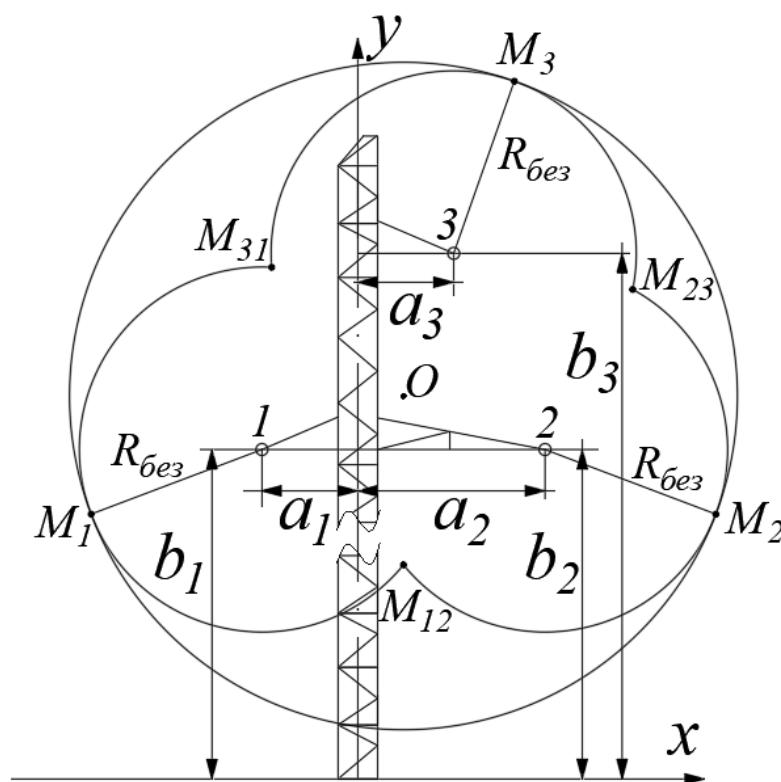


Рисунок 2.30 – Траектория максимально близкого размещения ДМП рядом с одноцепной опорой

На данном рисунке параметры a_1, a_2, a_3 – расстояния по оси абсцисс до соответствующих фаз на опоре. Точкой отсчета является середина опоры. Параметры b_1, b_2, b_3 – высоты по оси ординат от уровня земли до фазных проводов. $R_{без}$ – радиус описанной окружности, определяемый безопасным расстоянием от фазного провода. Значения M_{12}, M_{23}, M_{31} определяют собой точки пересечения окружностей, точка O – центр окружности, описанной вокруг окружностей безопасного расстояния возле фаз, определяемый как точка равноудалённого расстояния от всех фазных проводников. Точки M_1, M_2, M_3 являются местами касания окружностей одноименных фаз с внешней окружностью. Задачей является создание функции, которая сможет воссоздать траекторию движения по трём окружностям вокруг фазных проводов и впоследствии определить координату по оси x и y точки оптимальной установки ДМП. Точка должна быть выбрана таким образом, чтобы замеры НМП при всех видах КЗ были максимальными. Поскольку необходима работа с окружностями, то для удобства дальнейшего представления необходимо оперировать формулой Эйлера через параметр угла, который будет являться аргументом переменной функции. Используется угол описанной окружности $\varphi_{вн}$ с центром в точке O . Через него определяется расстояние от точки на данной окружности, затем по координатам данной точки и координатам размещения фазного провода будет определен угол для одной из трёх окружностей возле соответствующего номера фазы. Зная данный угол и радиус безопасного расстояния, можно определить координаты установки ДМП (рисунок 2.31).

Необходимо также задать ограничения, чтобы функции окружностей возле фаз выполнялись на определенном промежутке. Такими промежутками являются точки пересечения окружностей, следовательно, функция для 1 окружности должна выполняться в промежутках углов $\angle M_{31}OM_{12}$, соответственно для 2 и 3 окружностей на промежутках углов $\angle M_{12}OM_{23}$ и $\angle M_{23}OM_{31}$.

Однако при данном расположении фаз нельзя использовать радиус внешней окружности $R_{вн}$ как константу для задающего угла, иначе ввиду несимметричного расположения фазных проводов может образовываться зона, в которой будут выполняться и определяться точки одновременно для обеих функций

окружностей возле фаз при значениях задающего угла $\varphi_{вн}$ рядом с зонами $\angle M_{31}OM_{12}$, $\angle M_{12}OM_{23}$ и $\angle M_{23}OM_{31}$ (рисунок 2.32).

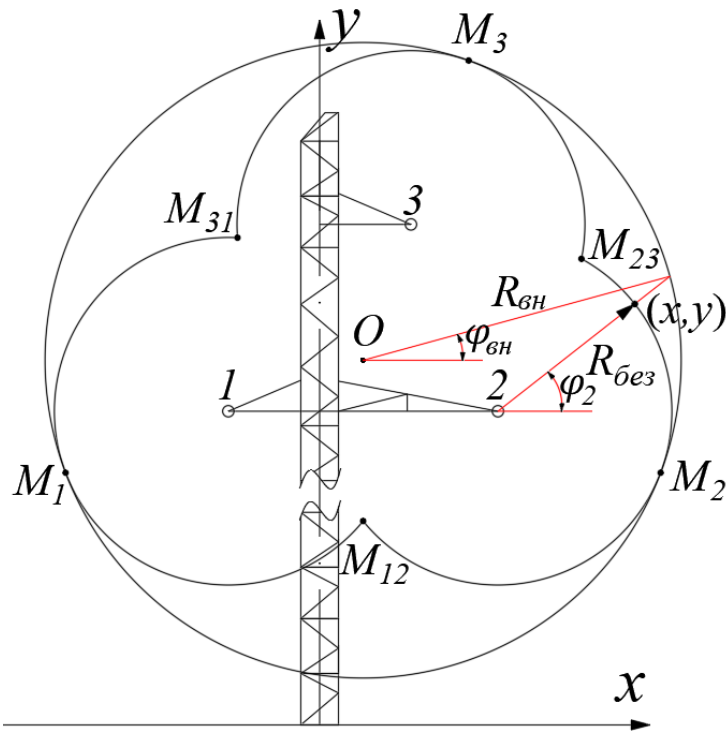


Рисунок 2.31 – Определение координат установки ДМП через угловые параметры

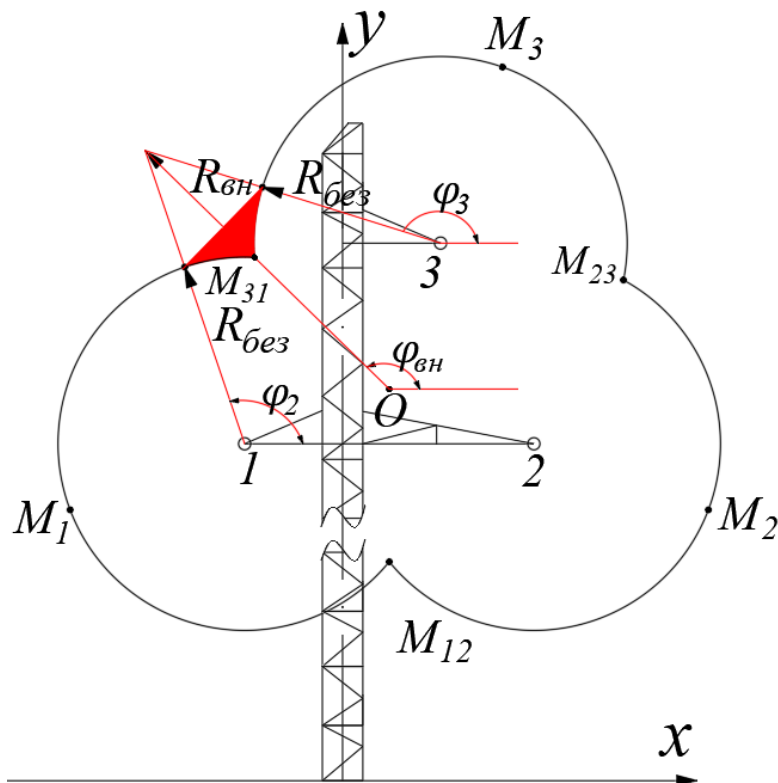


Рисунок 2.32 – Наличие зоны, в которой не определяются координаты установки ДМП на окружностях возле фаз

Тогда величина $R_{вн}$ задающего радиуса также должна изменяться исходя из того, на каком участке находится задающий угол $\varphi_{вн}$. Границами, определяющими изменения радиуса $R_{вн}$, будут являться углы $\angle M_1OM_2$ для $R_{12.вн}$, $\angle M_2OM_3$ для $R_{23.вн}$ и $\angle M_3OM_1$ для $R_{31.вн}$. Величины радиусов $R_{12.вн}$, $R_{23.вн}$, $R_{31.вн}$ будут определяться расстоянием от центральной точки O до соответствующих точек M_{12} , M_{23} , M_{31} для того, чтобы избежать зон, в которых не будут найдены координаты возможного размещения ДМП (рисунок 2.33).

С учётом вышеуказанных ограничений координаты точек будут определяться в соответствии с системой (2.20) на примере определения траектории около фазы 1, аналогичные системы будут формироваться для фаз 2 и 3.

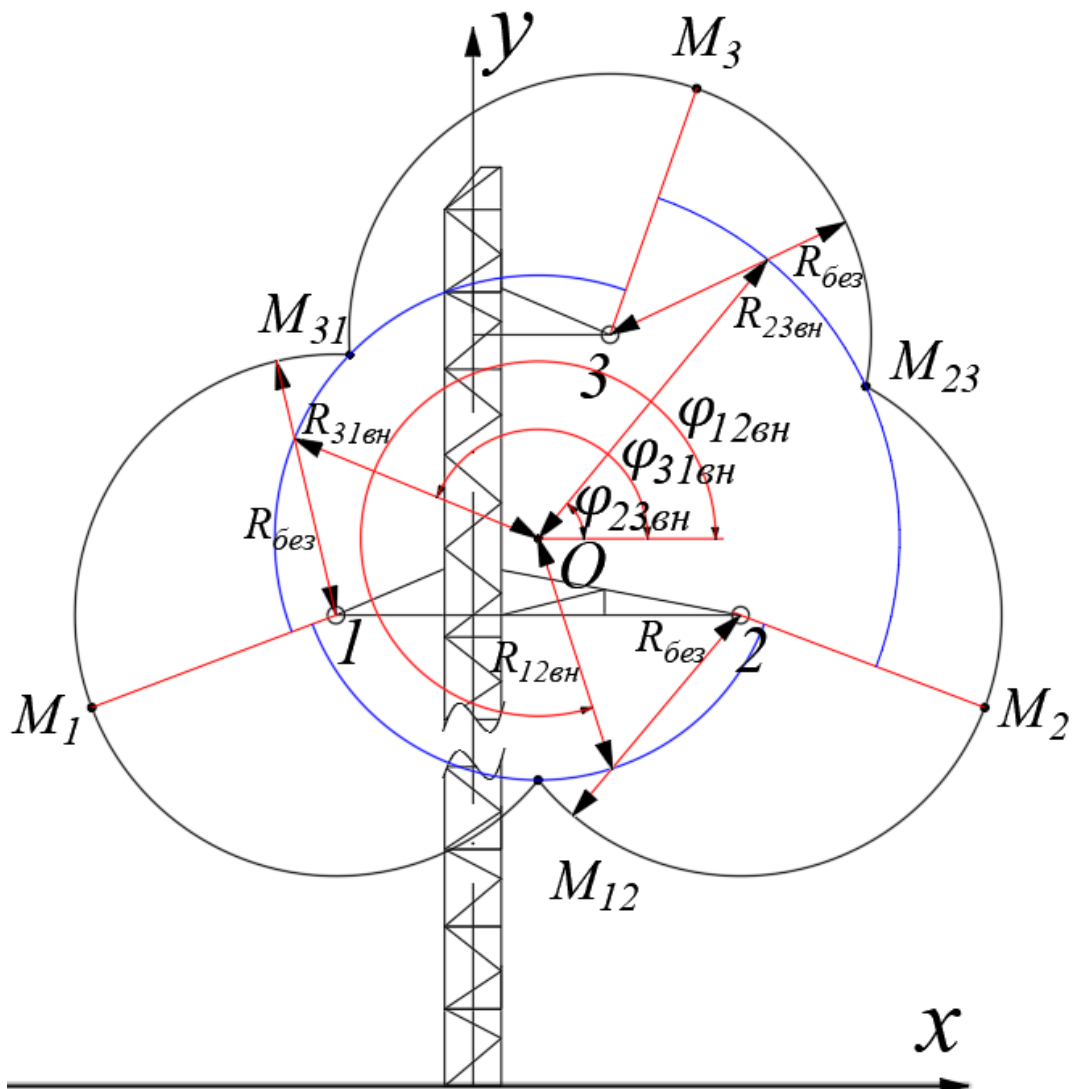


Рисунок 2.33 – Ограничения для окружностей радиусом $R_{12вн}$, $R_{23вн}$, $R_{31вн}$

$$\left\{ \begin{array}{l} npu \text{ } \vec{arg}(M_{12}) \leq \varphi_{\text{вн}} < \vec{arg}(M_{31}); \\ R_{\text{вн}} = R_{31\text{вн}}; \text{ } npu \text{ } \vec{arg}(M_{31}) \leq \varphi_{\text{вн}} \leq \vec{arg}(M_1); \\ R_{\text{вн}} = R_{12\text{вн}}; \text{ } npu \text{ } \vec{arg}(M_1) < \varphi_{\text{вн}} \leq \vec{arg}(M_{12}); \\ x_{\text{вн}} = R_{\text{вн}} \cdot \cos(\varphi_{\text{вн}}) + X_O; \\ y_{\text{вн}} = R_{\text{вн}} \cdot \sin(\varphi_{\text{вн}}) + Y_O; \\ \varphi_1 = \vec{arg}((x_{\text{вн}} - a_1) + (y_{\text{вн}} - b_1)); \\ x_1 = R_{\vec{oez}} \cdot \cos(\varphi_1) + a_1; \\ y_1 = R_{\vec{oez}} \cdot \sin(\varphi_1) + b_1. \end{array} \right. \quad (2.20)$$

При этом параметры $M_1, M_2, M_3, R_{12\text{вн}}, R_{23\text{вн}}, R_{31\text{вн}}, X_O, Y_O$, необходимые для решения системы (2.20), будут определяться по (2.21) через известные параметры координат размещения фазных проводов.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_O = \frac{b_1 - b_3 + \frac{a_1^2 - a_2^2}{b_1 - b_2} - \frac{a_2^2 - a_3^2}{b_2 - b_3}}{2 \left(\frac{a_1 - a_2}{b_1 - b_2} - \frac{a_2 - a_3}{b_2 - b_3} \right)}; \\ Y_O = \frac{X_O \cdot (a_2 - a_1) + 0,5 \cdot (a_1^2 - a_2^2 + b_1^2 - b_2^2)}{(b_1 - b_2)}; \\ \vec{arg}(M_1) = \vec{arg}((a_1 - X_O) + (b_1 - Y_O)); \\ \vec{arg}(M_2) = \vec{arg}((a_2 - X_O) + (b_2 - Y_O)); \\ \vec{arg}(M_3) = \vec{arg}((a_3 - X_O) + (b_3 - Y_O)); \\ R_{12\text{вн}} = \sqrt{(M_{12X} - X_O)^2 + (M_{12Y} - Y_O)^2}; \\ R_{23\text{вн}} = \sqrt{(M_{23X} - X_O)^2 + (M_{23Y} - Y_O)^2}; \\ R_{31\text{вн}} = \sqrt{(M_{31X} - X_O)^2 + (M_{31Y} - Y_O)^2}, \end{array} \right. \quad (2.21)$$

где X_O, Y_O – координаты центральной точки O ; $M_{12X}, M_{12Y}, M_{23X}, M_{23Y}, M_{31X}, M_{31Y}$ – координаты по x и y соответствующих точек M_{12}, M_{23}, M_{31} . Для значений M_1, M_2, M_3 в формулах используются только угловые аргументы данных параметров.

Определение точек пересечения окружностей M_{12}, M_{23}, M_{31} является отдельной задачей, так как смежные окружности пересекаются в двух точках,

следовательно, будет два решения для каждого набора x и y , что представлено в системе (2.22). Аналогичные системы будут формироваться для M_{23X} , M_{23Y} , M_{31Y} , M_{31X} . Параметр P введён для сокращения записи через промежуточные вычисления.

$$\begin{cases} P = \sqrt{\frac{4R_{\text{двз}}^2}{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} - 1}; \\ M_{121X} = 0,5((a_1 + a_2) + (b_1 - b_2) \cdot P); \\ M_{122X} = 0,5((a_1 + a_2) + (b_2 - b_1) \cdot P); \\ M_{121Y} = 0,5((b_1 + b_2) + (a_1 - a_2) \cdot P); \\ M_{122Y} = 0,5((b_1 + b_2) + (a_2 - a_1) \cdot P). \end{cases} \quad (2.22)$$

Из полученных корней решения уравнения – точек пересечения двух окружностей – необходимо выбрать те, что наиболее удалены от центральной точки O , для этого производится сравнение модуля разности координат полученных корней с координатой центра по x и y в соответствии с формулой (2.23). В таком случае получается больший модуль, и корень принимается как координата M_{12X} , M_{12Y} , аналогичные системы решаются для определения координат M_{23X} , M_{23Y} , M_{31X} , M_{31Y} .

$$\begin{cases} \Delta M_{121X} = |M_{121X} - X_O|; \\ \Delta M_{122X} = |M_{122X} - X_O|; \\ \Delta M_{121Y} = |M_{121Y} - Y_O|; \\ \Delta M_{122Y} = |M_{122Y} - Y_O|; \\ M_{12X} = M_{121X}; \text{ при } \Delta M_{122X} \leq \Delta M_{121X}; \\ M_{12X} = M_{122X}; \text{ при } \Delta M_{121X} \leq \Delta M_{122X}; \\ M_{12Y} = M_{121Y}; \text{ при } \Delta M_{122Y} \leq \Delta M_{121Y}; \\ M_{12Y} = M_{122Y}; \text{ при } \Delta M_{121Y} \leq \Delta M_{122Y}; \end{cases} \quad (2.23)$$

Произведя вышеуказанные вычисления, можно визуализировать наиболее близкую траекторию размещения ДМП возле токоведущих частей, представленную на рисунке 2.34.

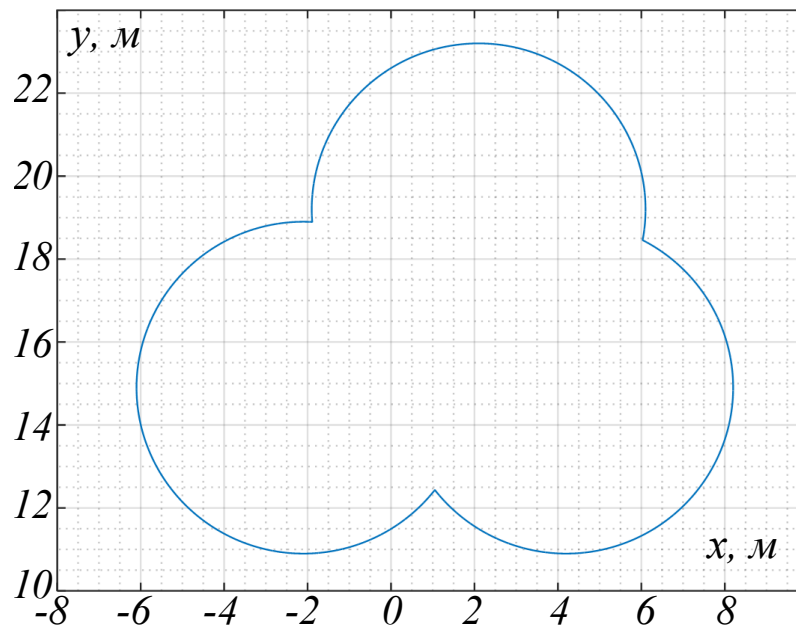


Рисунок 2.34 – Визуализация в MATLAB наиболее близкой траектории размещения ДМП

Вышеуказанные условия будут справедливы для случая, когда радиус безопасного расстояния больше расстояния от центральной равноудаленной точки до фазных проводов. В случае, если часть окружностей или они все остаются без пересечений, тогда центральная точка гарантированно лежит за пределами данных окружностей. Если же все окружности пересекаются, но радиус безопасного расстояния меньше расстояния от центральной равноудаленной точки до фазных проводов, то в этом случае также следует размещать ДМП в срединной точке (рисунок 2.35). Таким образом можно гарантированно минимизировать влияние посторонних проводов соседних ВЛ на замеры магнитного поля от защищаемой линии и обеспечить максимальную величину результирующей НМП. Это позволяет реализовать идеальный случай для защиты на ДМП, так как это производит максимальное удаление размещённых ДМП от токоведущих частей смежных параллельных линий и позволяет настроить защиту именно на замеры защищаемой ВЛ, между проводниками которой находится ДМП. Таким образом магнитное поле самой линии будет своего рода «экранировать» и производить самозащиту от внешних воздействий магнитных полей.

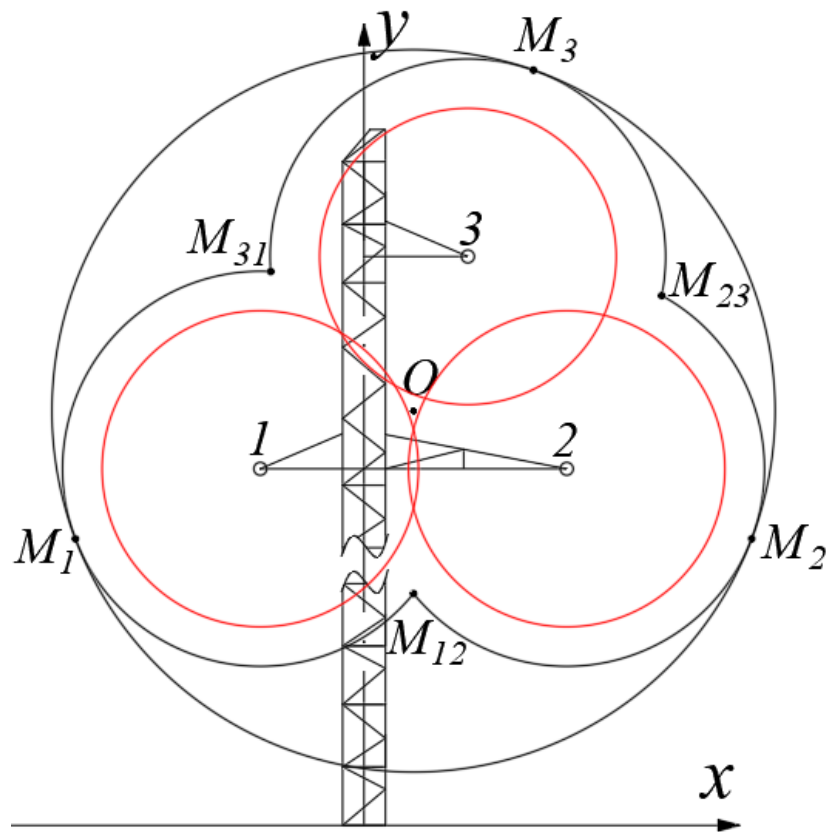


Рисунок 2.35 – Центральная точка вне окружностей при снижении

$R_{\text{без}}$ с 4 м до 3,2 м

2.5.3 Применение метода оптимизации для определения точки установки датчика магнитного поля

Основная цель рационального подхода заключается не просто в получении конечного решения при решении задачи, а нахождения такого пути её решения, при котором обеспечивается максимальная эффективность при минимальных затратах ресурсов. Именно для этого и необходимо применение различных методов оптимизации. Раньше сложные задачи решались преимущественно методом полного перебора - систематическим анализом всех возможных вариантов. Однако этот подход обладал существенным недостатком: для достижения приемлемой точности результатов требовалось значительные затраты по времени для поиска решения, при этом при изменении хотя бы одного параметра, принятого за константу, все вычисления необходимо было производить с самого начала.

В работе [107] рассматривается, насколько важно использование методов оптимизации для нужд электроэнергетики, в частности при решении транспортной задачи для поиска оптимального способа производства или передачи электроэнергии с наименьшими потерями и затратами. В части РЗ рассматриваются методы оптимизации для выбора оптимального значения уставок для конкретной сложившейся схемно-режимной ситуации в случае проведения их автоматического расчета. Решение задачи оптимизации сводится к поиску оптимального решения, представленного в виде экстремума целевой функции. Сама целевая функция может иметь дополнительные внутренние ограничения, заданные определенным набором равенств / неравенств. Также для запуска целевой функции необходимо определиться с ограничениями в части граничной области, в которой будут выполняться расчеты функции. Общий вид оптимизационной задачи представлен как:

$$Z(x_1, x_2 \dots x_n) \rightarrow \text{extr}$$

$$f_1(x_1, x_2 \dots x_n) \leq p_1$$

$$f_2(x_1, x_2 \dots x_n) \leq p_2$$

.....

$$f_m(x_1, x_2 \dots x_n) \leq p_m$$

где Z – общая целевая функция; $x_1 \dots x_n$ – аргументы функции, являющиеся изменяемыми параметрами; $f_1 \dots f_m$ – функции ограничений целевой функции; $p_1 \dots p_m$ – неизменяемые константы, выраженные в виде коэффициентов.

Методы оптимизации целенаправленно исследуют расчётную область с ограничениями, используя математические алгоритмы для быстрого нахождения решения с приемлемой точностью, в то время как простой перебор требует проверки каждого возможного варианта, что вычислительно неоправданно для большинства реальных задач. В отличие от полного перебора, который гарантированно позволяет определить требуемое решение, но часто неприменим из-за экспоненциального роста сложности вычислений и временных затрат, методы оптимизации позволяют найти удовлетворительное решение за разумное время. Основные традиционные способы оптимизации отражены в работе [108] и

представлены в таблице 2.1. Разные способы оптимизации могут работать с разными видами и формами задания функций.

Таблица 2.1 – Традиционные методы оптимизации

Способ 1	Применимость 2	Сущность способа 3
Методы исследования функций классического анализа	Простые задачи с отсутствием граничных условий, где на всем интервале известно аналитическое изменение функции в зависимости от изменения её аргумента	Поиск оптимального решения производится посредством определения производной функции и приравнивания её к нулевому значению
Метод множителей Лагранжа	Простые задачи с наличием ограничений, также выраженных в аналитической форме	Позволяет упростить влияние ограничений на значения целевой функции. Вместо того чтобы искать экстремумы функции при заданных ограничениях, метод вводит множители Лагранжа и формирует новую общую функцию, называемую лагранжианом
Метод наименьших квадратов (Для обработки данных)	Задачи, где количество неизвестных превышает количество переменных, необходим для аппроксимации выделенных значений некоторой функции	Определяется поиск оптимальных параметров через минимизацию отклонений суммы квадратов погрешностей между фактическими значениями и значениями, полученными по данному методу. Минимальное отклонение является решением экстремума функции
Динамическое программирование	Сложные задачи, которые могут быть разбиты на несколько простых перекрывающихся подзадач, решения для каждой из которых производятся независимо	Декомпозиция сложных задач на более простые подзадачи, вычисляемые последовательно или одновременно (параллельно), с сохранением промежуточных результатов в данных: таблице, массиве или кеше, для предотвращения повторений в вычислениях
Методы вариационного исчисления	Задачи, в которых условия и ограничения целевой функции выражены в виде функционалов	Способом решения задачи является проведение процедуры интегрирования, где количество неизвестных определяет число уравнений функции
Линейное программирование	Простые задачи, в которых целевая функция и её ограничения заданы в виде линейных зависимостей	С использованием симплекс-метода производится переход от одной вершины к другой в выпуклом многоугольнике до тех пор, пока при последующем переходе улучшение функции не достигнет требуемой точности вычислений
Нелинейное программирование	Задачи, где целевая функция представлена в нелинейном виде, она может быть квадратичной, экспоненциальной, тригонометрической и т. д.	Решение задач нелинейного программирования часто требует итеративных методов, таких как градиентные методы, метод Ньютона, методы штрафных функций и т. д.

Помимо традиционных методов оптимизации распространение получают так называемые эвристические методы. Такие методы не способны находить идеально правильное решение, однако результаты их оптимизации могут являться приемлемыми для решения большинства задач. Эвристические методы оптимизации были придуманы на основе наблюдений за природными или биологическими процессами, показывающие эффективные стратегии поиска и адаптации. Классическими примерами таких методов являются генетический алгоритм, имитирующий естественный отбор, метод роя. Другими примерами служат муравьиный алгоритм, основанный на поведении муравьёв, ищущих путь к пище, и имитация отжига, заимствованная из процесса термообработки металлов, метод случайного леса. Эти подходы были разработаны для решения комплексных задач, где традиционные математические методы оказываются неэффективными или неприменимыми [109, 110].

Генетический алгоритм производит решение задач любого вида за счёт своей универсальности, где ограничения и целевая функция представляют собой условия некой среды, а различные решения — это отдельные особи в каждом поколении популяции. Те особи, которые смогли приспособиться к условиям представленной среды, выжить и создать следующее поколение, являются наиболее оптимальными решениями для указанной задачи. Таким образом в генетическом алгоритме целевая функция — это вычисляемая мера приспособленности каждой особи, которая производит оценку насколько хорошо данное решение соответствует поставленной цели оптимизации. Именно значение целевой функции определяет вероятность особи быть выбранной для скрещивания и передачи своих «генов» следующим поколениям, направляя весь эволюционный процесс к нахождению оптимального решения. Важным преимуществом генетического алгоритма является его независимость от вида целевой функции, количества ограничений, граничных условий, количества оптимизационных параметров. Стандартная последовательность генетического алгоритма представлена на рисунке 2.36 в упрощённом формате.

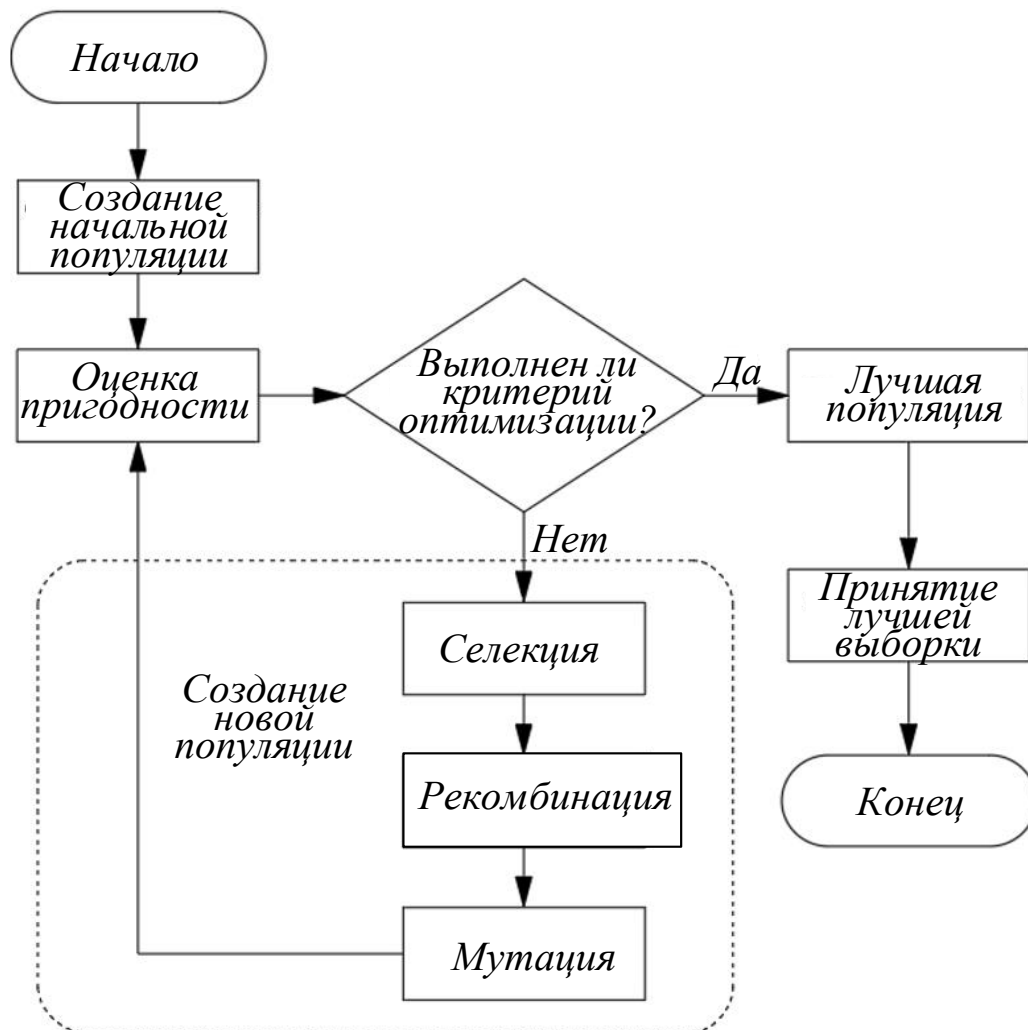


Рисунок 2.36 – Принцип генетического алгоритма в упрощенной форме

Генетический алгоритм моделирует эволюционный процесс, при котором происходят изменения у некоторой популяции, состоящей из отдельных особей. Воздействие алгоритма на каждую новую группу особей осуществляется через целевую функцию и поиск условия её оптимального значения с использованием принципов теории Дарвина о выживании наиболее приспособленных особей. Каждая особь в популяции представляет собой возможное решение, следовательно, генетический алгоритм осуществляет поиск среди случайного набора решений в заранее заданном диапазоне и всегда стремится к нахождению глобального оптимума, который олицетворен в виде особи с наилучшими характеристиками.

Наиболее важными этапами алгоритма являются генерация начальной популяции, их эволюция под влиянием целевой функции, генерация новой

популяции особей посредством воздействия на них таких эволюционных процессов, как селекция, рекомбинация и мутация. Возросший интерес к применению генетического алгоритма может быть объяснен его робастностью и эффективностью в решении комплексных задач, с которыми не справляются традиционные методы математического программирования. Метод оптимизации может считаться эффективным если он обеспечивает баланс между двумя процессами: поиском новых, все лучше удовлетворяющих оптимальному требованию решений и дальнейшего эффективного использования ранее полученных промежуточных результатов.

Для решения оптимизационных задач применяется встроенный блок «Optimization Toolbox» программно-вычислительного комплекса MATLAB [111], представленный на рисунке 2.37.

Optimization Toolbox — это расширение в программной среде MATLAB, содержащее комплекс известных алгоритмов для поиска оптимального решения базовых задач и сложных функций с большим количеством аргументов и выходных значений. Инструментарий данного комплекса позволяет решать задачи линейного, нелинейного, целочисленного программирования, применять методы наименьших квадратов для обработки некой выборки данных, а также решать задачи многопараметрической оптимизации с применением генетического алгоритма или метода имитации отжига. Все эти методы могут быть использованы для функций любого вида и типа, например, для функции, которая не является непрерывной, не имеет производной, использующей алгоритм «черного ящика» с неопределенным или случайным значением большей части переменных. Пакет Optimization Toolbox позволяет производить непосредственную интеграцию с внутренней инфраструктурой MATLAB, что позволяет обеспечить хранение промежуточных результатов вычислений, проводить последовательную обработку полученных данных, определять собственные условия для остановки вычислений, возможность визуализации результатов и анализа их сходимости. [112].

Problem Setup and Results

Solver: ga - Genetic Algorithm

Problem

Fitness function: @odnof

Number of variables: 1

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: [0] Upper: [360]

Nonlinear constraint function:

Integer variable indices:

Run solver and view results

☐ Use random states from previous run

Start Pause Stop

Current iteration: 52 Clear Results

Optimization running.
Objective function value: 0.042845616315237346
No solution found.

fsolve stopped because the last step was ineffective. However, the vector of function values is not near zero, as measured by the default value of the function tolerance.

Final point:

270

Рисунок 2.37 – Результаты расчета модуля оптимизации при применении генетического алгоритма

Одним из условий оптимизации является определение оптимальных координат размещения ДМП возле одноцепной опоры по рассмотренной ранее

траектории или в точке, равноудаленной от фазных проводов, если она находится на большем расстоянии, чем минимально рекомендуемое по условию безопасности проведения замеров. Вторым условием, помимо обозначенной траектории, является выявление максимального замера НМП при всех видах КЗ. При разных видах КЗ (трехфазное, двухфазное металлическое, двухфазное на землю и однофазное) будут наблюдаться различные замеры результирующей НМП в одной и той же точке пространства, причем в различных точках вид КЗ, замер от которого будет минимален, также будут отличаться. Следовательно, задачей алгоритма является определение произвольной точки, затем сравнение замеров НМП при всех видах КЗ и выявление минимального замера, затем выполнение тех же действий в другой точке. В конце необходимо сравнить величины минимальных замеров, из которых следует выбрать максимальную величину по системе (2.24). Токи КЗ приняты для трёхфазного и однофазного 1000 А. Остальные токи вычисляются относительно них по известным соотношениям.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } (x_n; y_n) \\ \dot{H}_{\min K3.n} = \min(\dot{H}_{abc.n}; \dot{H}_{ab.n}; \dot{H}_{bc.n}; \dot{H}_{ca.n}; \dot{H}_{ab0.n}; \dot{H}_{bc0.n}; \dot{H}_{ca0.n}; \dot{H}_{a0.n}; \dot{H}_{b0.n}; \dot{H}_{c0.n}); \\ \text{при } (x_m; y_m) \\ \dot{H}_{\min K3.m} = \min(\dot{H}_{abc.m}; \dot{H}_{ab.m}; \dot{H}_{bc.m}; \dot{H}_{ca.m}; \dot{H}_{ab0.m}; \dot{H}_{bc0.m}; \dot{H}_{ca0.m}; \dot{H}_{a0.m}; \dot{H}_{b0.m}; \dot{H}_{c0.m}); \\ x_{Onm}; y_{Onm} = x_n; y_n \text{ при } \dot{H}_{\min K3.n} \geq \dot{H}_{\min K3.m}; \\ x_{Onm}; y_{Onm} = x_m; y_m \text{ при } \dot{H}_{\min K3.m} > \dot{H}_{\min K3.n}. \end{array} \right. \quad (2.24)$$

При решении численным методом без использования алгоритмов оптимизации можно увидеть по рисунку 2.38, что пиковым значениям минимальных замеров НМП из всех видов КЗ соответствуют углы точек пересечения окружностей вокруг фазных проводов M_{12} , M_{23} , M_{31} , рисунка 2.39, при этом глобальный максимум наблюдается при угле в точке M_{12} равным 270° . Наличие нескольких экстремумов в функции является основанием для применения эвристических методов оптимизации, как, например, метод генетического алгоритма. В случае применения традиционных способов оптимизации результат зачастую зависит от начальной стартовой точки входной изменяемой величины, и вычисления могут остановиться в первом локальном

минимуме или максимуме. Однако для генетического алгоритма независимо от начальной точки и границ изменяемого диапазона входного значения, указанного на рисунке 2.37 в графе «Bounds», получается требуемое значение в 270° в графе «Final point». При этом минимумы наблюдаются в самых наиболее удаленных точках, соответствующих углам M_1 , M_2 , M_3 на рисунке 2.39.

В таблице 2.2 представлены результаты замеров НМП при всех видах КЗ для указанных точек с учётом центральной точки O , а также координаты по x и y данных точек. Зная полученный угол, можно определить координаты точек установки ДМП в соответствии с системой (2.20).

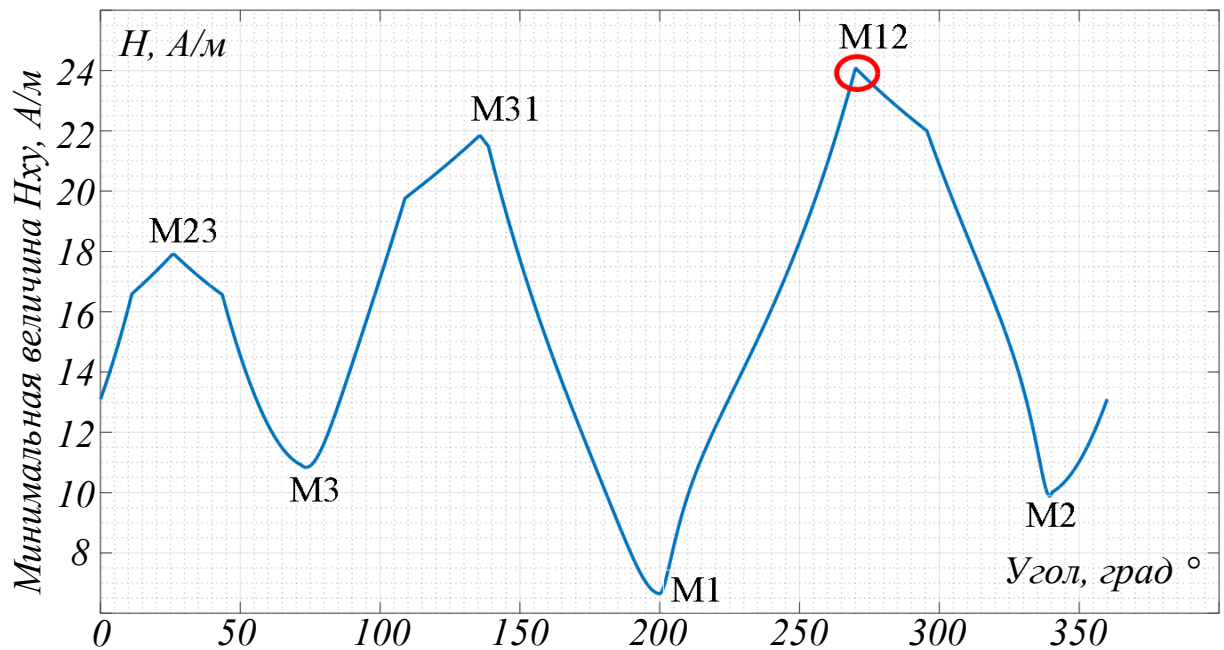


Рисунок 2.38 – Определение максимальной НМП численным методом

Таблица 2.2 – Замеры НМП при всех видах КЗ.

1	2	3	4	5	6	7	8
Точка	M_{12}	M_{23}	M_{31}	M_1	M_2	M_3	O
Угол, $^\circ$	270	26,03	135,67	-160,36	-19,64	71,70	-
y, м	12,43	18,46	18,89	13,56	13,56	23,00	16,02
x, м	1,05	6,03	-1,89	-5,87	7,97	3,36	1,05
$\dot{H}_{abc}$, А/м	54,4	43,5	52,2	25,2	25,4	25,6	99,9
$\dot{H}_{ab}$, А/м	54,3	24,5	29,8	21,4	21,4	<u>10,9</u>	77,6
$\dot{H}_{bc}$, А/м	<u>24,1</u>	41,2	22,6	<u>6,7</u>	20,3	20,3	59,0
$\dot{H}_{ca}$, А/м	30,3	23,3	51,8	21,2	<u>10,0</u>	21,2	74,1

Продолжение таблицы 2.2

$\dot{H}_{ab0}, A/м$	48,7	37,8	39,3	37,0	37,0	22,0	58,3
$\dot{H}_{ca0}, A/м$	39,9	37,8	48,7	37,2	21,7	37,2	58,3
$\dot{H}_{a0}, A/м$	39,8	<u>17,9</u>	39,8	39,8	15,7	16,3	47,6
$\dot{H}_{b0}, A/м$	39,8	39,8	<u>21,9</u>	15,7	39,8	19,5	47,6
$\dot{H}_{c0}, A/м$	58,9	63,8	58,6	31,0	58,2	58,2	66,5

Выделенными значениями в таблице отмечены экстремумы функции, представленной на рисунке 2.39, также на данном рисунке указана оптимальная точка размещения ДМП для опоры ПМ-110-1 с учетом обеспечения безопасного расстояния до токоведущих частей в 4 метра.

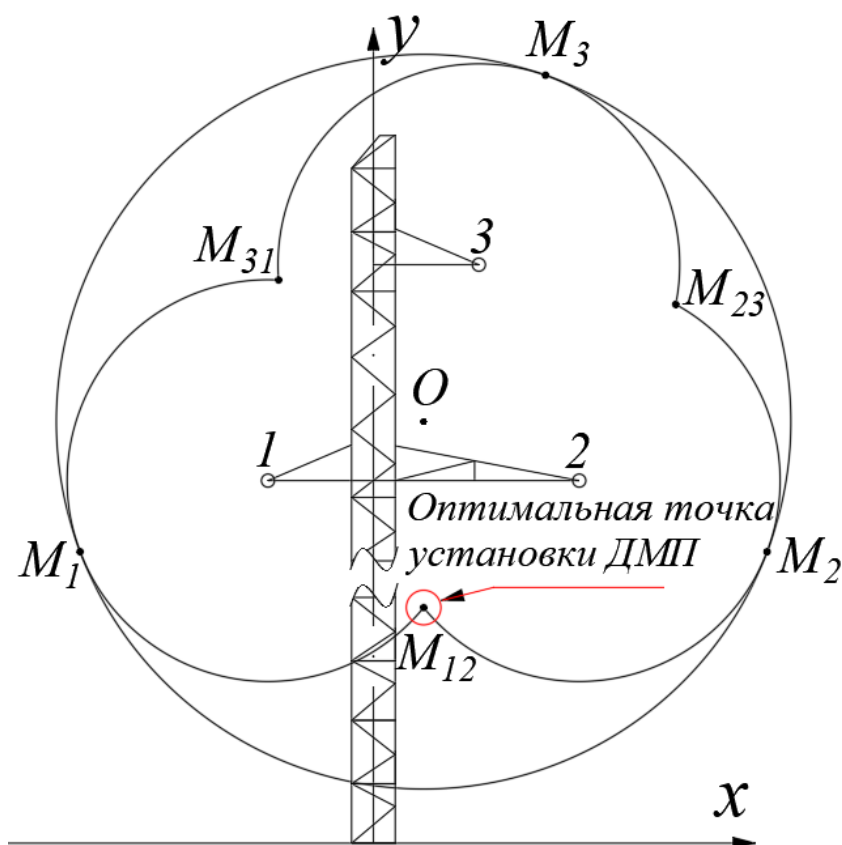


Рисунок 2.39 – Оптимальная точка установки ДМП для опоры ПМ-110-1 при безопасном расстоянии в 4 метра

Получена точка с координатами по оси x от центра опоры и по y от уровня земли (1,05; 12,43) в метрах. Значение по высоте может изменяться на расстояния удаленности первых фазных проводов от уровня земли, однако если

расположения фазных проводов с двух сторон опоры ЛЭП будут симметричны, то вне зависимости от высоты их расположения данная точка останется оптимальной, но с поправкой на высоту от земли.

2.6 Разработка защиты с абсолютной селективностью для двухцепной линии с применением датчиков магнитного поля

2.6.1 Способ получения замеров магнитного поля для создания защиты с абсолютной селективностью

Как уже было указано ранее, за счёт применения замеров с ДМП имеется возможность реализовать аналог ДЗЛ, если по концам защищаемой линии будут установлены одноцепные опоры. Однако чаще всего для удешевления передачи электроэнергии и повышения надежности электроснабжения применяются параллельные линии электропередачи, размещенные на двухцепных опорах. В данном случае на общую картину НМП рядом с опорой будут оказывать влияние токи, протекающие в шести фазных проводах обеих линий. Следовательно, ранее предложенный способ получения замеров результирующей величины НМП с использованием одного ДМП не подойдет для реализации защиты аналогичного принципа действия на двухцепной ЛЭП.

В данном случае предлагается использование не по одному ДМП на каждом конце защищаемой ВЛ, а по три датчика с каждого конца ЛЭП: два из них по разные стороны от опоры, где ДМП_б – ближний датчик, применяемый для защиты своей цепи ВЛ, ДМП_д – дальний датчик, используемый для защиты параллельной ВЛ, а также общий для обеих ВЛ средний датчик на оси симметрии опоры (ДМП_{ср}) (рисунок 2.40).

Вычисляются расстояния от токоведущих частей до бокового датчика ДМП_б по каждой фазе защищаемой ВЛ ($r_{А.б}$, $r_{В.б}$, $r_{С.б}$) и для смежной параллельной ВЛ ($r_{А.д}$, $r_{В.д}$, $r_{С.д}$). Для бокового смежного датчика ДМП_д вычисляемые расстояния до своей и смежной цепи будут аналогичны ДМП_б. Для среднего датчика ДМП_{ср} расстояния до одноименных фаз защищаемой и смежной ВЛ будут одинаковыми, однако формирование угла для проводимых замеров будет

отличаться для каждой из ВЛ, поэтому расстояния от среднего датчика обозначаются следующими параметрами: $r_{A.СР.Б}$, $r_{B.СР.Б}$, $r_{C.СР.Б}$, $r_{A.СР.Д}$, $r_{B.СР.Д}$, $r_{C.СР.Д}$. Большинство двухцепных опор выполняются симметричными и имеется возможность реализовать защиту путем размещения датчиков симметрично относительно оси симметрии опоры.

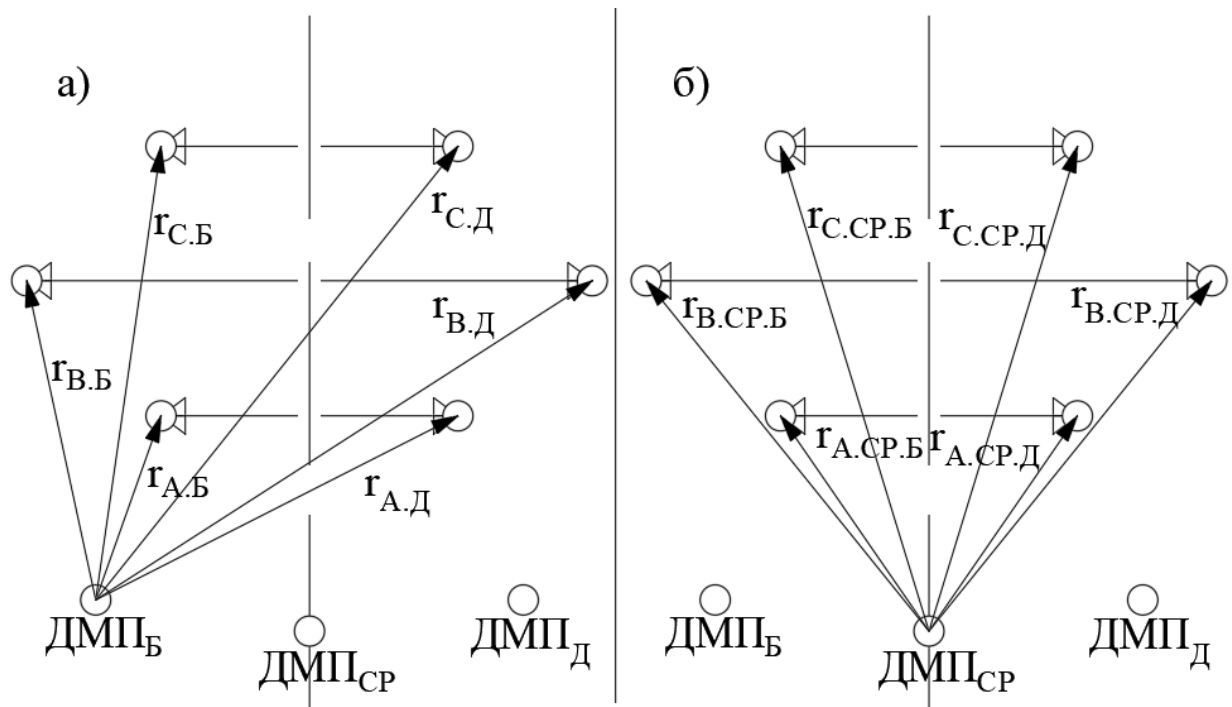


Рисунок 2.40 – Схема размещения ДМП рядом с опорой: а) расстояния от бокового ДМП до проводов двух ВЛ;
б) расстояния от среднего ДМП до проводов двух ВЛ

Условия работы при внешнем КЗ. Необходимо рассмотреть основные условия реализации аналога ДЗЛ на ДМП для двухцепной опоры в общем виде. Первое условие: отсутствие срабатывания защиты при внешних КЗ или при КЗ на параллельной ВЛ. При КЗ на параллельной ВЛ Д токи будут распределяться в соответствии с направлениями, указанными на рисунке 2.41.

Токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ протекают в начале ВЛ, токи $\dot{I}_3$ и $\dot{I}_4$ – в конце ВЛ. Токи с указанными индексами представляет собой группу трёхфазных токов $\dot{I}_{A1}$, $\dot{I}_{B1}$, $\dot{I}_{C1}$, аналогично для индексов 2, 3 и 4. Замер результирующего значения НМП $\dot{N}_H$ для

ДМП_Б, находящегося в начале защищаемой ВЛ Б, будет формироваться в соответствии с системой (2.25) на основе уравнений (2.7).

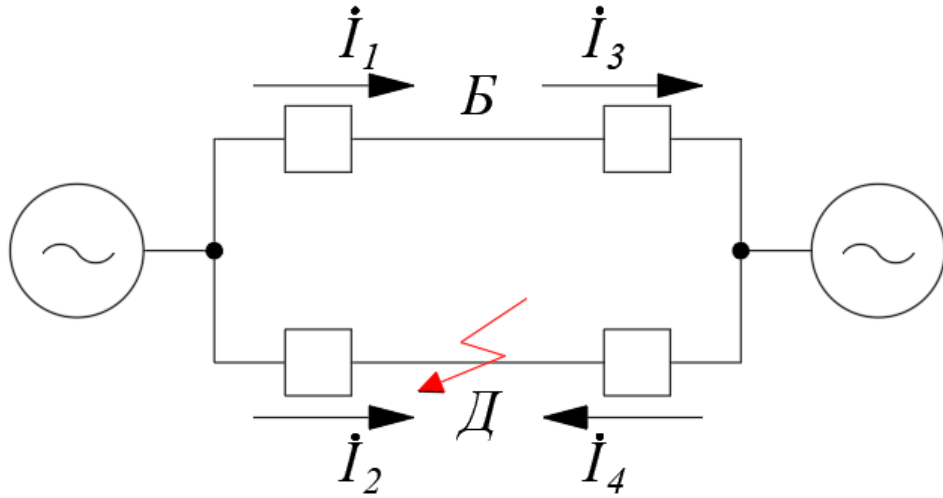


Рисунок 2.41 – Внешнее КЗ на параллельной ВЛ Д

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{H}_{X.H} = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{\dot{I}_{A1} \cdot \sin(\arg(\vec{r}_{A.B}))}{|r_{A.B}|} + \frac{\dot{I}_{B1} \cdot \sin(\arg(\vec{r}_{B.B}))}{|r_{B.B}|} + \frac{\dot{I}_{C1} \cdot \sin(\arg(\vec{r}_{C.B}))}{|r_{C.B}|} \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{\dot{I}_{A2} \cdot \sin(\arg(\vec{r}_{A.D}))}{|r_{A.D}|} + \frac{\dot{I}_{B2} \cdot \sin(\arg(\vec{r}_{B.D}))}{|r_{B.D}|} + \frac{\dot{I}_{C2} \cdot \sin(\arg(\vec{r}_{C.D}))}{|r_{C.D}|} \right) \right]; \\ \dot{H}_{Y.H} = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{\dot{I}_{A1} \cdot \cos(\arg(\vec{r}_{A.B}))}{|r_{A.B}|} + \frac{\dot{I}_{B1} \cdot \cos(\arg(\vec{r}_{B.B}))}{|r_{B.B}|} + \frac{\dot{I}_{C1} \cdot \cos(\arg(\vec{r}_{C.B}))}{|r_{C.B}|} \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{\dot{I}_{A2} \cdot \cos(\arg(\vec{r}_{A.D}))}{|r_{A.D}|} + \frac{\dot{I}_{B2} \cdot \cos(\arg(\vec{r}_{B.D}))}{|r_{B.D}|} + \frac{\dot{I}_{C2} \cdot \cos(\arg(\vec{r}_{C.D}))}{|r_{C.D}|} \right) \right]; \\ |H_{XY.H}| = \sqrt{\dot{H}_{X.H}^2 + \dot{H}_{Y.H}^2} \end{array} \right. \quad (2.25)$$

На данный замер будут оказывать влияние токи, протекающие в шести проводах. Поскольку ДМП будут располагаться симметрично по обеим сторонам ВЛ с однотипными двухцепными опорами, то делается допущение, что рассматривается только составляющая НМП в плоскости поперечного сечения опоры. Это означает пренебрежение стрелой провеса провода в соседних с опорой

пролётах. Также не учитывается эффект экранирования поля металлоконструкциями опоры. Рассчитываются замеры НМП по вертикальной $\dot{H}_{X,H}$, горизонтальной $\dot{H}_{Y,H}$ составляющим и полного $\dot{H}_{XY,H}$ вектора НМП.

Коэффициенты расстояний в вышеуказанной формуле можно выразить через функционалы, определяемые расположением и ориентацией датчиков относительно провода β_X и β_Y для ДМП_Б при расстояниях до ближайшей ВЛ с индексом Б и дальней параллельной с индексом Д по системе (2.26).

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{X.A.B} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{A.B}))}{2\pi|r_{A.B}|}; \beta_{X.B.B} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{B.B}))}{2\pi|r_{B.B}|}; \beta_{X.C.B} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{C.B}))}{2\pi|r_{C.B}|}; \\ \beta_{X.A.D} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{A.D}))}{2\pi|r_{A.D}|}; \beta_{X.B.D} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{B.D}))}{2\pi|r_{B.D}|}; \beta_{X.C.D} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{C.D}))}{2\pi|r_{C.D}|}; \\ \beta_{Y.A.B} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{A.B}))}{2\pi|r_{A.B}|}; \beta_{Y.B.B} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{B.B}))}{2\pi|r_{B.B}|}; \beta_{Y.C.B} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{C.B}))}{2\pi|r_{C.B}|}; \\ \beta_{Y.A.D} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{A.D}))}{2\pi|r_{A.D}|}; \beta_{Y.B.D} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{B.D}))}{2\pi|r_{B.D}|}; \beta_{Y.C.D} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{C.D}))}{2\pi|r_{C.D}|}; \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Аналогичные функционалы будут определены для среднего датчика ДМП_{СР} по выражениям (2.27).

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{X.A.CP.B} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{A.CP.B}))}{2\pi|r_{A.CP.B}|}; \beta_{X.B.CP.B} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{B.CP.B}))}{2\pi|r_{B.CP.B}|}; \beta_{X.C.CP.B} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{C.CP.B}))}{2\pi|r_{C.CP.B}|}; \\ \beta_{X.A.CP.D} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{A.CP.D}))}{2\pi|r_{A.CP.D}|}; \beta_{X.B.CP.D} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{B.CP.D}))}{2\pi|r_{B.CP.D}|}; \beta_{X.C.D} = \frac{\sin(\arg(\vec{r}_{C.CP.D}))}{2\pi|r_{C.CP.D}|}; \\ \beta_{Y.A.CP.B} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{A.CP.B}))}{2\pi|r_{A.CP.B}|}; \beta_{Y.B.CP.B} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{B.CP.B}))}{2\pi|r_{B.CP.B}|}; \beta_{Y.C.CP.B} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{C.CP.B}))}{2\pi|r_{C.CP.B}|}; \\ \beta_{Y.A.CP.D} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{A.CP.D}))}{2\pi|r_{A.CP.D}|}; \beta_{Y.B.CP.D} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{B.CP.D}))}{2\pi|r_{B.CP.D}|}; \beta_{Y.C.CP.D} = \frac{\cos(\arg(\vec{r}_{C.CP.D}))}{2\pi|r_{C.CP.D}|}; \end{array} \right. \quad (2.27)$$

Замеры НМП $\dot{H}_{Д,H}$ для ДМП_Д в начале ВЛ, $\dot{H}_{Б,К}$ для ДМП_Б в конце ВЛ, $\dot{H}_{Д,К}$ для ДМП_Д в конце ВЛ представлены в формуле (2.28) для горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля, а также с учетом того, что токи $\dot{I}_3 = -\dot{I}_1$ по вышеуказанному рисунку 2.41.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{H}_{X(Y).B.H} = (\beta_{X.A.B} \dot{I}_{A1} + \beta_{X.B.B} \dot{I}_{B1} + \beta_{X.C.B} \dot{I}_{C1}) + \\ \quad + (\beta_{X(Y).A.D} \dot{I}_{A2} + \beta_{X(Y).B.D} \dot{I}_{B2} + \beta_{X(Y).C.D} \dot{I}_{C2}); \\ \dot{H}_{X(Y).D.H} = (\beta_{X(Y).A.B} \dot{I}_{A2} + \beta_{X(Y).B.B} \dot{I}_{B2} + \beta_{X(Y).C.B} \dot{I}_{C2}) + \\ \quad + (\beta_{X(Y).A.D} \dot{I}_{A1} + \beta_{X(Y).B.D} \dot{I}_{B1} + \beta_{X(Y).C.D} \dot{I}_{C1}); \\ \dot{H}_{X(Y).B.K} = (-\beta_{X(Y).A.B} \dot{I}_{A1} - \beta_{X(Y).B.B} \dot{I}_{B1} - \beta_{X(Y).C.B} \dot{I}_{C1}) + \\ \quad + (\beta_{X(Y).A.D} \dot{I}_{A4} + \beta_{X(Y).B.D} \dot{I}_{B4} + \beta_{X(Y).C.D} \dot{I}_{C4}); \\ \dot{H}_{X(Y).D.K} = (\beta_{X(Y).A.B} \dot{I}_{A4} + \beta_{X(Y).B.B} \dot{I}_{B4} + \beta_{X(Y).C.B} \dot{I}_{C4}) + \\ \quad + (-\beta_{X(Y).A.D} \dot{I}_{A1} - \beta_{X(Y).B.D} \dot{I}_{B1} - \beta_{X(Y).C.D} \dot{I}_{C1}). \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Результирующие замеры от всех шести проводников для ДМП_{CP} в начале ВЛ $\dot{H}_{CP.H}$ и в конце ВЛ $\dot{H}_{CP.K}$ будут рассчитываться по формуле (2.29).

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{H}_{X(Y).CP.H} = (\beta_{X(Y).A.CP.B} \dot{I}_{A1} + \beta_{X(Y).B.CP.B} \dot{I}_{B1} + \beta_{X(Y).C.CP.B} \dot{I}_{C1}) + \\ \quad + (\beta_{X(Y).A.CP.D} \dot{I}_{A2} + \beta_{X(Y).B.CP.D} \dot{I}_{B2} + \beta_{X(Y).C.CP.D} \dot{I}_{C2}); \\ \dot{H}_{X(Y).CP.K} = (-\beta_{X(Y).A.CP.B} \dot{I}_{A1} - \beta_{X(Y).B.CP.B} \dot{I}_{B1} - \beta_{X(Y).C.CP.B} \dot{I}_{C1}) + \\ \quad + (\beta_{X(Y).A.CP.D} \dot{I}_{A4} + \beta_{X(Y).B.CP.D} \dot{I}_{B4} + \beta_{X(Y).C.CP.D} \dot{I}_{C4}). \end{array} \right. \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_{X(Y).рез} &= ((\dot{H}_{X(Y).B.H} + \dot{H}_{X(Y).B.K}) - K_{X(Y)} (\dot{H}_{X(Y).CP.H} + \dot{H}_{X(Y).CP.K})) = \\ &= (\beta_{X(Y).A.D} \dot{I}_{A2} + \beta_{X(Y).B.D} \dot{I}_{B2} + \beta_{X(Y).C.D} \dot{I}_{C2}) + \\ &+ (\beta_{X(Y).A.D} \dot{I}_{A4} + \beta_{X(Y).B.D} \dot{I}_{B4} + \beta_{X(Y).C.D} \dot{I}_{C4}) + \\ &+ K_{X(Y)} \left[\begin{array}{l} (-\beta_{X(Y).A.CP.D} \dot{I}_{A2} - \beta_{X(Y).B.CP.D} \dot{I}_{B2} - \beta_{X(Y).C.CP.D} \dot{I}_{C2}) + \\ + (-\beta_{X(Y).A.CP.D} \dot{I}_{A4} - \beta_{X(Y).B.CP.D} \dot{I}_{B4} - \beta_{X(Y).C.CP.D} \dot{I}_{C4}) \end{array} \right] \\ &= (\beta_{X(Y).A.D} - K \beta_{X(Y).A.CP.D}) \dot{I}_{A2} + (\beta_{X(Y).B.D} - K \beta_{X(Y).B.CP.D}) \dot{I}_{B2} + (\beta_{X(Y).C.D} - K \beta_{X(Y).C.CP.D}) \dot{I}_{C2} \\ &+ (\beta_{X(Y).A.D} - K \beta_{X(Y).A.CP.D}) \dot{I}_{A4} + (\beta_{X(Y).B.D} - K \beta_{X(Y).B.CP.D}) \dot{I}_{B4} + (\beta_{X(Y).C.D} - K \beta_{X(Y).C.CP.D}) \dot{I}_{C4}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Результирующий замер $\dot{H}_{X(Y).рез}$ для защищаемой ВЛ будет формироваться в соответствии с формулой (2.30). В ней замеры магнитного поля со средних датчиков выступают в роли демпфирующих, которые при домножении на определенный «коэффициент торможения» K должны компенсировать влияние параллельной цепи практически до нуля. При этом для каждой составляющей магнитного поля $\dot{H}_X$ или $\dot{H}_Y$ должно использоваться своё значение коэффициента K_X или K_Y . Для защиты своей ЛЭП принимаются замеры бокового ближнего

ДМП_Б и общего среднего ДМП_{СР}.

Следовательно, чтобы результирующий замер был равен нулю, необходимо выполнение условия, указанного в формуле (2.31), при этом ключевыми показателями являются только расстояния от ДМП до токоведущей части, не зависящие от значений токов в фазах.

$$\begin{cases} (\beta_{X(Y).A.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).A.СР.Д}) \approx 0; \\ (\beta_{X(Y).B.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).B.СР.Д}) \approx 0; \\ (\beta_{X(Y).C.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).C.СР.Д}) \approx 0. \end{cases} \quad (2.31)$$

При этом для междуфазных КЗ достаточно выполнения условия, представленного в выражении (2.32).

$$\begin{cases} \text{Для КЗ } ABC \\ (\beta_{X(Y).A.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).A.СР.Д}) = (\beta_{X(Y).B.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).B.СР.Д}) = (\beta_{X(Y).C.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).C.СР.Д}); \\ \text{Для КЗ } AB \\ (\beta_{X(Y).A.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).A.СР.Д}) = (\beta_{X(Y).B.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).B.СР.Д}); \\ \text{Для КЗ } BC \\ (\beta_{X(Y).B.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).B.СР.Д}) = (\beta_{X(Y).C.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).C.СР.Д}); \\ \text{Для КЗ } CA \\ (\beta_{X(Y).C.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).C.СР.Д}) = (\beta_{X(Y).A.Д} - K_{X(Y)} \beta_{X(Y).A.СР.Д}). \end{cases} \quad (2.32)$$

Следовательно, для получения минимального замера при КЗ на параллельной ВЛ достаточно подобрать параметры функционалов расстояния от токоведущих частей до датчиков ДМП_Б и ДМП_{СР} и соответствующий коэффициент торможения « $K_{X(Y)}$ » таким образом, чтобы выполнялось условие (2.32) для междуфазных КЗ или условие (2.31) для всех видов КЗ. При этом для бокового датчика ДМП_Б в вышеуказанных формулах необходимо учитывать функционалы расстояний до параллельной ВЛ с индексом Д.

Условия работы при КЗ в зоне действия на защищаемой ВЛ. Помимо необходимости компенсировать результирующий замер НМП практически до нуля при внешних КЗ, следует также добиться максимального замера НМП при КЗ в зоне действия защиты. Приняты аналогичные предыдущим формулы (2.33) с учётом направления токов по рисунку 2.42 и условия $\dot{I}_4 = -\dot{I}_2$.

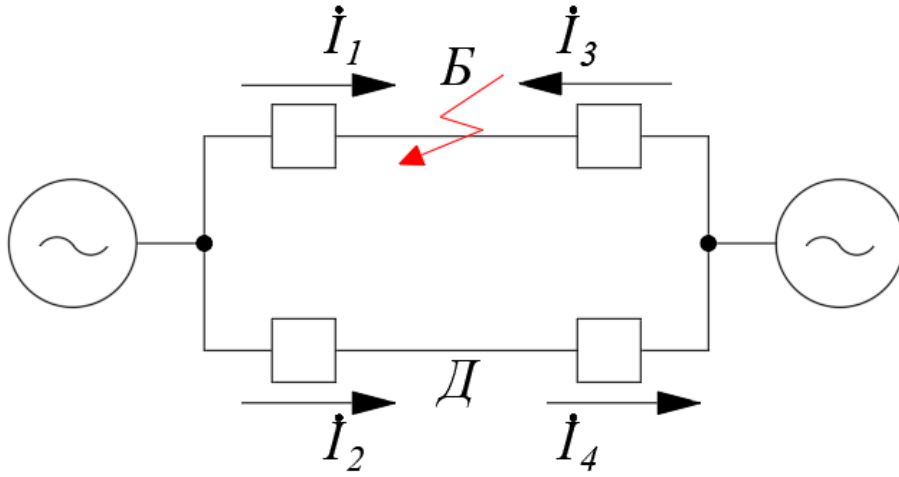


Рисунок 2.42 – КЗ в зоне защищаемой ВЛ Б

Будут рассматриваться замеры для ДМП_Б и ДМП_{СР} со стороны начала и конца ЛЭП.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{H}_{X(Y).Б.Н} = (\beta_{X(Y).А.Б} \dot{I}_{A1} + \beta_{X(Y).Б.Б} \dot{I}_{B1} + \beta_{X(Y).С.Б} \dot{I}_{C1}) + \\ \quad + (\beta_{X(Y).А.Д} \dot{I}_{A2} + \beta_{X(Y).Б.Д} \dot{I}_{B2} + \beta_{X(Y).С.Д} \dot{I}_{C2}); \\ \dot{H}_{X(Y).Б.К} = (\beta_{X(Y).А.Б} \dot{I}_{A3} + \beta_{X(Y).Б.Б} \dot{I}_{B3} + \beta_{X(Y).С.Б} \dot{I}_{C3}) + \\ \quad + (-\beta_{X(Y).А.Д} \dot{I}_{A2} - \beta_{X(Y).Б.Д} \dot{I}_{B2} - \beta_{X(Y).С.Д} \dot{I}_{C2}); \\ \dot{H}_{X(Y).СР.Н} = (\beta_{X(Y).А.СР.Б} \dot{I}_{A1} + \beta_{X(Y).Б.СР.Б} \dot{I}_{B1} + \beta_{X(Y).С.СР.Б} \dot{I}_{C1}) + \\ \quad + (\beta_{X(Y).А.СР.Д} \dot{I}_{A2} + \beta_{X(Y).Б.СР.Д} \dot{I}_{B2} + \beta_{X(Y).С.СР.Д} \dot{I}_{C2}); \\ \dot{H}_{X(Y).СР.К} = (\beta_{X(Y).А.СР.Б} \dot{I}_{A3} + \beta_{X(Y).Б.СР.Б} \dot{I}_{B3} + \beta_{X(Y).С.СР.Б} \dot{I}_{C3}) + \\ \quad + (-\beta_{X(Y).А.СР.Д} \dot{I}_{A2} - \beta_{X(Y).Б.СР.Д} \dot{I}_{B2} - \beta_{X(Y).С.СР.Д} \dot{I}_{C2}). \end{array} \right. \quad (2.33)$$

В данном случае результирующий замер $\dot{H}_{X(Y).рез}$ будет формироваться как:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{X(Y).рез} &= ((\dot{H}_{X(Y).Б.Н} + \dot{H}_{X(Y).Б.К}) - K_{X(Y)} (\dot{H}_{X(Y).СР.Н} + \dot{H}_{X(Y).СР.К})) = \\ &= (\beta_{X(Y).А.Б} \dot{I}_{A1} + \beta_{X(Y).Б.Б} \dot{I}_{B1} + \beta_{X(Y).С.Б} \dot{I}_{C1}) + \\ &+ (\beta_{X(Y).А.Б} \dot{I}_{A3} + \beta_{X(Y).Б.Б} \dot{I}_{B3} + \beta_{X(Y).С.Б} \dot{I}_{C3}) + \\ &+ K_{X(Y)} \left[\begin{array}{l} (-\beta_{X(Y).А.СР.Б} \dot{I}_{A1} - \beta_{X(Y).Б.СР.Б} \dot{I}_{B1} - \beta_{X(Y).С.СР.Б} \dot{I}_{C1}) + \\ + (-\beta_{X(Y).А.СР.Д} \dot{I}_{A3} - \beta_{X(Y).Б.СР.Д} \dot{I}_{B3} - \beta_{X(Y).С.СР.Д} \dot{I}_{C3}) \end{array} \right] \\ &= (\beta_{X(Y).А.Б} - K \beta_{X(Y).А.СР.Б}) \dot{I}_{A1} + (\beta_{X(Y).Б.Б} - K \beta_{X(Y).Б.СР.Б}) \dot{I}_{B1} + (\beta_{X(Y).С.Б} - K \beta_{X(Y).С.СР.Б}) \dot{I}_{C1} \\ &+ (\beta_{X(Y).А.Б} - K \beta_{X(Y).А.СР.Б}) \dot{I}_{A3} + (\beta_{X(Y).Б.Б} - K \beta_{X(Y).Б.СР.Б}) \dot{I}_{B3} + (\beta_{X(Y).С.Б} - K \beta_{X(Y).С.СР.Б}) \dot{I}_{C3}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Для получения максимального замера необходимо, чтобы выполнилось условие, вновь не зависящее от величин фазных токов:

$$\begin{cases} (\beta_{X(Y).A.B} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).A.CP.B}) \rightarrow \max.; \\ (\beta_{X(Y).B.B} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).B.CP.B}) \rightarrow \max.; \\ (\beta_{X(Y).C.B} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).C.CP.B}) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.35)$$

2.6.2 Определение оптимальной траектории размещения датчиков магнитного поля возле двухцепной линии

Итоговые условия в формулах (2.31) и (2.35) должны выполняться одновременно, следовательно, необходимо подобрать такие показатели функционалов $\beta_{X(Y).A.B}$, $\beta_{X(Y).B.B}$, $\beta_{X(Y).C.B}$, $\beta_{X(Y).A.Д}$, $\beta_{X(Y).B.Д}$, $\beta_{X(Y).C.Д}$, $\beta_{X(Y).A.CP.B}$, $\beta_{X(Y).B.CP.B}$, $\beta_{X(Y).C.CP.B}$, $\beta_{X(Y).A.CP.Д}$, $\beta_{X(Y).B.CP.Д}$, $\beta_{X(Y).C.CP.Д}$, $K_{X(Y)}$, чтобы итоговые результаты оказались оптимальными с точки зрения чувствительности и отстроенности разрабатываемой защиты и удовлетворяли всем требованиям. Следовательно, необходимо определить оптимальные места расположения средних и боковых ДМП в пространстве относительно токоведущих частей с учетом габаритных параметров опоры. В качестве наиболее распространённой описана двухцепная опора ПС-35-2 на напряжении 35 кВ (рисунок 2.43). В сети 35 кВ как правило распространена изолированная нейтраль. При данном типе заземления нейтрали повреждениями, требующими немедленного устранения, являются трёхфазные и двухфазные КЗ. При замыкании только одной фазы в сетях 35 кВ регламентируется величина тока замыкания на землю не более 10 А [113], даже если нейтраль заземлена через резистор с активным сопротивлением или дугогасящий реактор. Именно данный ток будет является током небаланса и создавать результирующую НМП небаланса, от которого можно отстроиться уставкой. Следовательно, при междуфазных КЗ необходимо ориентироваться на выражение (2.32) при внешних междуфазных КЗ. ДМП должны располагаться на безопасном расстоянии от проводов, но при этом находиться к ним настолько близко, насколько это возможно для лучшей чувствительности защиты.

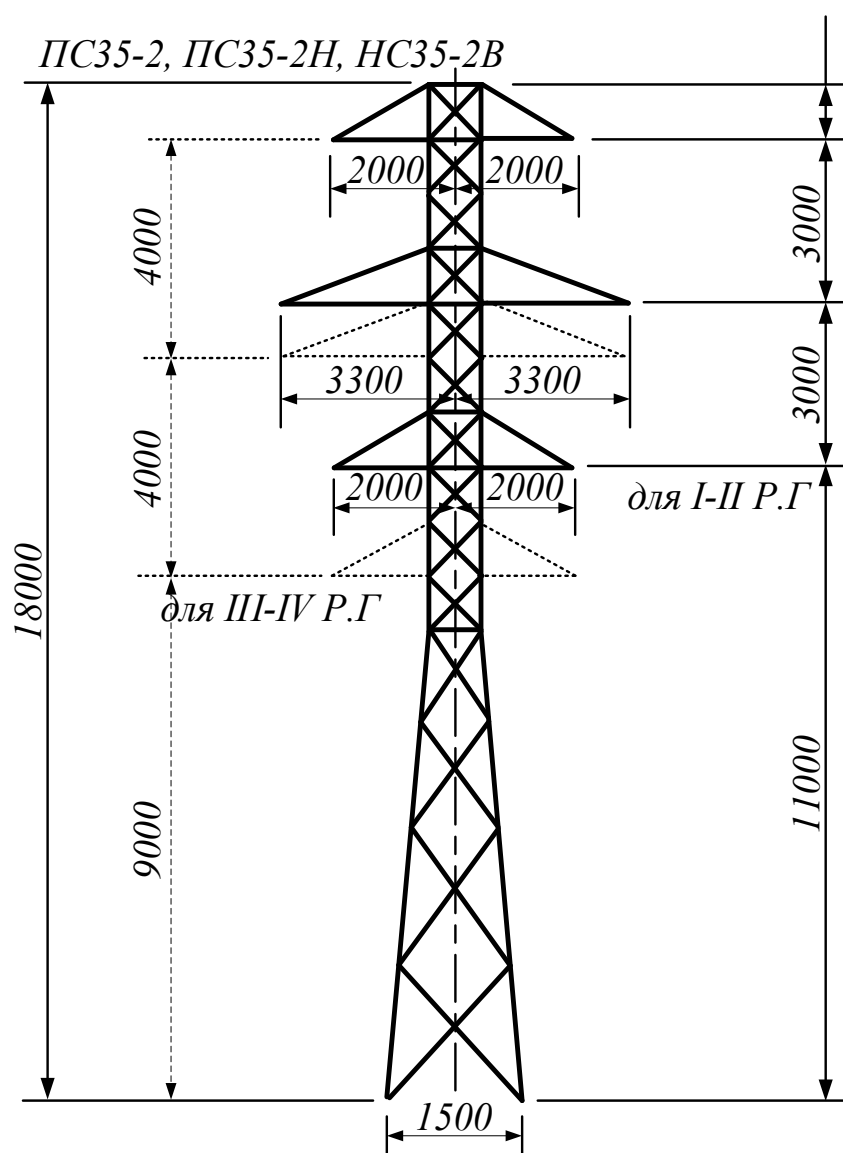


Рисунок 2.43 – Двухцепная опора ПС-35-2

Для визуализации безопасного расстояния подойдет система в виде дуг окружностей, представленная в формуле (2.36). Оси x и y представлены на рисунке 2.44, где началом координат по оси абсцисс является центр опоры, а по оси ординат началом является уровень земли. Для определения координат трёх дуг окружностей относительно каждой фазы, где переменной является параметр « y », составлена формула (2.36). В ней $R_{без}$ – безопасное расстояние до провода; b_1, b_2, b_3 – расстояния от земли до фаз A, B, C соответственно; a_1, a_2, a_3 – расстояния от оси симметрии опоры до фаз A, B, C соответственно. Коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 определяют интервалы « y », на которых будет выполняться та или иная функция в системе.

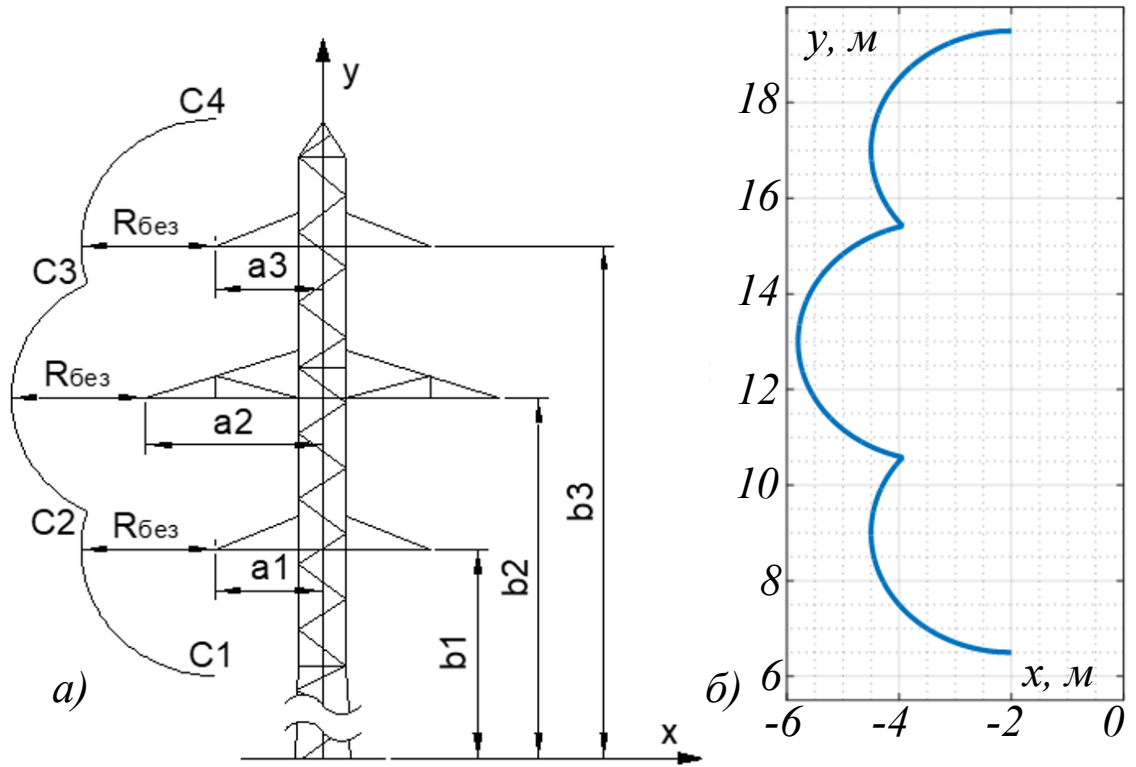


Рисунок 2.44 – Дуги окружностей с радиусом минимального безопасного расстояния до проводов а) относительно опоры; б) отображение в Matlab

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1(y) = -\sqrt{R_{\text{без}}^2 - (y - b_1)^2} - a_1; \text{ при } C_1 \leq y < C_2 \\ x_2(y) = -\sqrt{R_{\text{без}}^2 - (y - b_2)^2} - a_2; \text{ при } C_2 < y < C_3 \\ x_3(y) = -\sqrt{R_{\text{без}}^2 - (y - b_3)^2} - a_3; \text{ при } C_3 < y \leq C_4 \\ C_1 = b_1 - R_{\text{без}}; \\ C_2 = b_1 + R_{\text{без}} \cdot \sin \left[\begin{array}{l} \arccos \left(\frac{a_1 - a_2}{\sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}} \right) - \\ - \arccos \left(\frac{\sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}}{2R_{\text{без}}} \right) \end{array} \right]; \\ C_3 = b_2 + R_{\text{без}} \cdot \sin \left[\begin{array}{l} \arccos \left(\frac{a_2 - a_3}{\sqrt{(a_2 - a_3)^2 + (b_2 - b_3)^2}} \right) - \\ - \arccos \left(\frac{\sqrt{(a_2 - a_3)^2 + (b_2 - b_3)^2}}{2R_{\text{без}}} \right) \end{array} \right]; \\ C_4 = b_3 + R_{\text{без}}; \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Параметры точек C_2 и C_3 являются определяющими для нахождения границ, при которых заканчивает работу одна функция дуги окружности и начинает работу другая. Указанные области границ находятся на равноудаленном расстоянии от шести фазных проводов и могут быть определены посредством применения диаграммы Вороного [114] (рисунок 2.45).

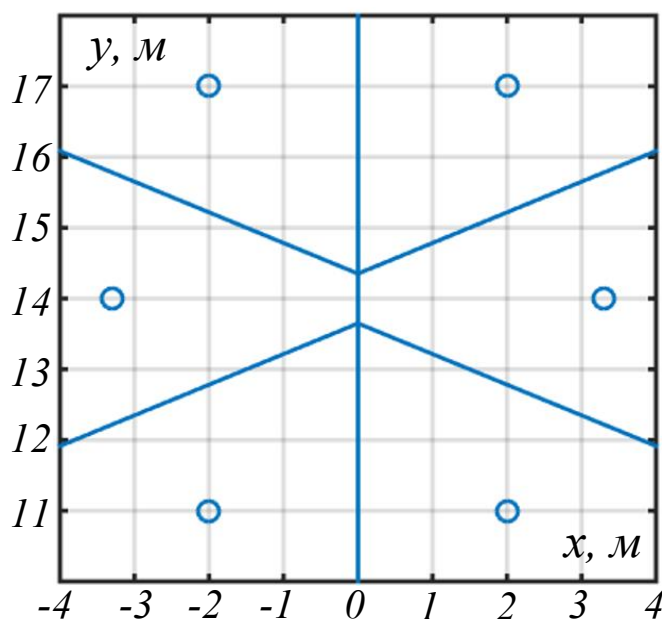


Рисунок 2.45 – Определение границ размещения ДМП по диаграмме Вороного

2.6.3 Обоснование требования для оптимизации при внешнем коротком замыкании на параллельной линии

Одним из главных условий обеспечения надёжной работы разрабатываемой защиты является выражение, представленное в формулах (2.31) и (2.32). В случае, если при внешнем КЗ замер НМП будет близок к нулю, то тогда независимо от абсолютного значения замера при КЗ в зоне, его относительное значение, приведённое к замеру при внешнем КЗ, будет составлять сотни и тысячи относительных единиц. Система в формуле (2.32) может быть представлена для междупазных КЗ в виде трёх функций прямых линий $Z=f(K)$ по выражению (2.37). Параметр Z представляет собой разность между функционалами бокового и среднего ДМП, измеряется в м^{-1} , коэффициент торможения K является безразмерной величиной.

Для выполнения требования формулы (2.32) необходимо подобрать такой параметр K , а также коэффициенты $\beta_{X(Y).A.Д}$, $\beta_{X(Y).B.Д}$, $\beta_{X(Y).C.Д}$, $\beta_{X(Y).A.CP.Д}$, $\beta_{X(Y).B.CP.Д}$, $\beta_{X(Y).C.CP.Д}$, при которых все три прямые будут пересекаться в одной точке.

$$\begin{cases} Z_{X(Y)1}(K) = \beta_{X(Y).A.Д} - K \cdot \beta_{X(Y).A.CP.Д}; \\ Z_{X(Y)2}(K) = \beta_{X(Y).B.Д} - K \cdot \beta_{X(Y).B.CP.Д}; \\ Z_{X(Y)3}(K) = \beta_{X(Y).C.Д} - K \cdot \beta_{X(Y).C.CP.Д}. \end{cases} \quad (2.37)$$

Одним из условий пересечения трёх прямых в одной точке является условие их минимального отклонения друг от друга в данной точке, следовательно, для решения данной задачи подойдет формула (2.38) среднего отклонения σ , где главными переменными будут являться вышеперечисленные параметры.

Для определения наилучшего $K_{X(Y)}$ для любого набора функционалов необходимо определить частную производную (2.39) по параметру K функции среднего отклонения (2.38) и приравнять её к нулю. В формуле частной производной введены обозначения коэффициентов $D_{X(Y).1}$, $D_{X(Y).2}$, $D_{X(Y).3}$, $D_{X(Y).4}$, $D_{X(Y).5}$, $D_{X(Y).6}$, $D_{X(Y).7}$, $D_{X(Y).8}$, $D_{X(Y).9}$, которые являются переменными для упрощения записи формулы. На рисунке 2.46 представлен искомый оптимум пересечения прямых функций при подборе требуемых вышеперечисленных параметров для ортогональных составляющих магнитного поля в случае расположения датчиков X и датчиков Y в одинаковых точках пространства при разных коэффициентах $K_{X(Y)}$.

$$\left\{ \begin{aligned} & C_{X(Y)сред} = \frac{(\beta_{X(Y).A.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).A.CP.Д}) + (\beta_{X(Y).B.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).B.CP.Д}) + (\beta_{X(Y).C.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).C.CP.Д})}{3} \\ & \sigma_{X(Y)} = \sqrt{\frac{\left((\beta_{X(Y).A.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).A.CP.Д}) - C_{X(Y)сред}\right)^2 + \left((\beta_{X(Y).B.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).B.CP.Д}) - C_{X(Y)сред}\right)^2 + \left((\beta_{X(Y).C.Д} - K_{X(Y)} \cdot \beta_{X(Y).C.CP.Д}) - C_{X(Y)сред}\right)^2}{3-1}} = 0 \end{aligned} \right. \quad (2.38)$$

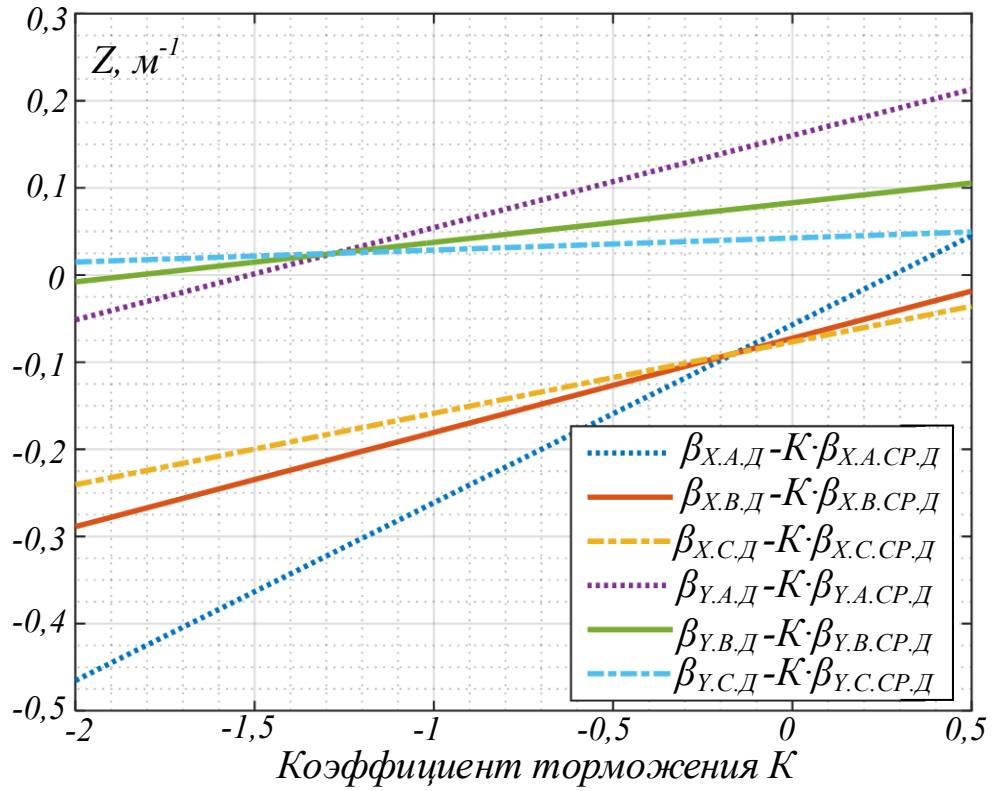


Рисунок 2.46 – Графическое представление функций (2.37) в зависимости от коэффициента торможения K

Графическое обозначение производных функций по формуле (2.39) представлено на рисунке 2.47. По рисунку видно, что для каждой ортогональной составляющей определился свой оптимальный коэффициент торможения $K_{X(Y)}$.

$$\left\{ \begin{aligned} D_{X(Y),1} &= (\beta_{X(Y).A.СР.Д} + \beta_{X(Y).B.СР.Д} - 2\beta_{X(Y).C.СР.Д}); \\ D_{X(Y),2} &= \left(\begin{aligned} &\beta_{X(Y).A.Д} + \beta_{X(Y).B.Д} - 2\beta_{X(Y).C.Д} - \\ &- K_{X(Y)}\beta_{X(Y).A.СР.Д} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y).B.СР.Д} + 2K_{X(Y)}\beta_{X(Y).C.СР.Д} \end{aligned} \right); \\ D_{X(Y),3} &= (\beta_{X(Y).A.СР.Д} - 2\beta_{X(Y).B.СР.Д} + \beta_{X(Y).C.СР.Д}); \\ D_{X(Y),4} &= \left(\begin{aligned} &\beta_{X(Y).A.Д} - 2\beta_{X(Y).B.Д} + \beta_{X(Y).C.Д} - \\ &- K_{X(Y)}\beta_{X(Y).A.СР.Д} + 2K_{X(Y)}\beta_{X(Y).B.СР.Д} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y).C.СР.Д} \end{aligned} \right); \\ D_{X(Y),5} &= (-2\beta_{X(Y).A.СР.Д} + \beta_{X(Y).B.СР.Д} + \beta_{X(Y).C.СР.Д}); \\ D_{X(Y),6} &= \left(\begin{aligned} &2\beta_{X(Y).A.Д} - \beta_{X(Y).B.Д} - \beta_{X(Y).C.Д} - \\ &- 2K_{X(Y)}\beta_{X(Y).A.СР.Д} + K_{X(Y)}\beta_{X(Y).B.СР.Д} + K_{X(Y)}\beta_{X(Y).C.СР.Д} \end{aligned} \right); \\ \frac{\partial \sigma_{X(Y)}}{\partial K_{X(Y)}} &= -\frac{D_{X(Y),1} \cdot D_{X(Y),2} + D_{X(Y),3} \cdot D_{X(Y),4} - D_{X(Y),5} \cdot D_{X(Y),6}}{3 \cdot \sqrt{2 \cdot (D_{X(Y),2}^2 + D_{X(Y),4}^2 + D_{X(Y),6}^2)}} = 0. \end{aligned} \right. \quad (2.39)$$

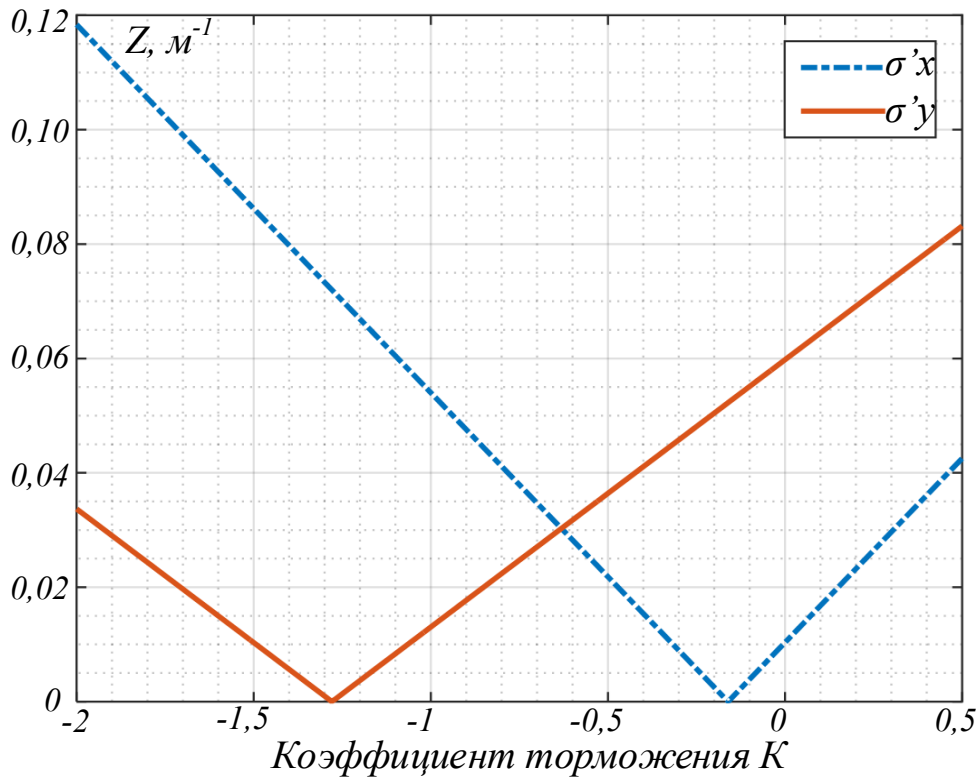


Рисунок 2.47 – Графическое представление производных функций (2.39) в зависимости от коэффициента торможения K

Следовательно, зная производную функции (2.39), при которой параметры Z будут находиться максимально близко к одной точке, имеется возможность для каждого набора функционалов $\beta_{X(Y).A.Д}$, $\beta_{X(Y).B.Д}$, $\beta_{X(Y).C.Д}$, $\beta_{X(Y).A.СР.Д}$, $\beta_{X(Y).B.СР.Д}$, $\beta_{X(Y).C.СР.Д}$, зависящих от места расположения ДМП возле ЛЭП, определять свой коэффициент торможения K , при котором значение функции отклонения будет минимальным. Это позволяет принять такое условие поиска минимального замера при внешнем КЗ на параллельной ЛЭП, как поиск минимальной величины среднего отклонения функции (2.38) при различных вариантах расположения бокового датчика ДМП_Б и среднего датчика ДМП_{СР}.

Учитывая вышесказанное, можно построить функцию среднего отклонения σ в зависимости от параметров высоты установки бокового и среднего датчиков (рисунок 2.48), при этом по оси z графика указывается функция среднего отклонения. Так как траектория установки бокового датчика задана формулой дуги окружности, то в качестве аргумента функции достаточно задать только высоту установки бокового датчика.

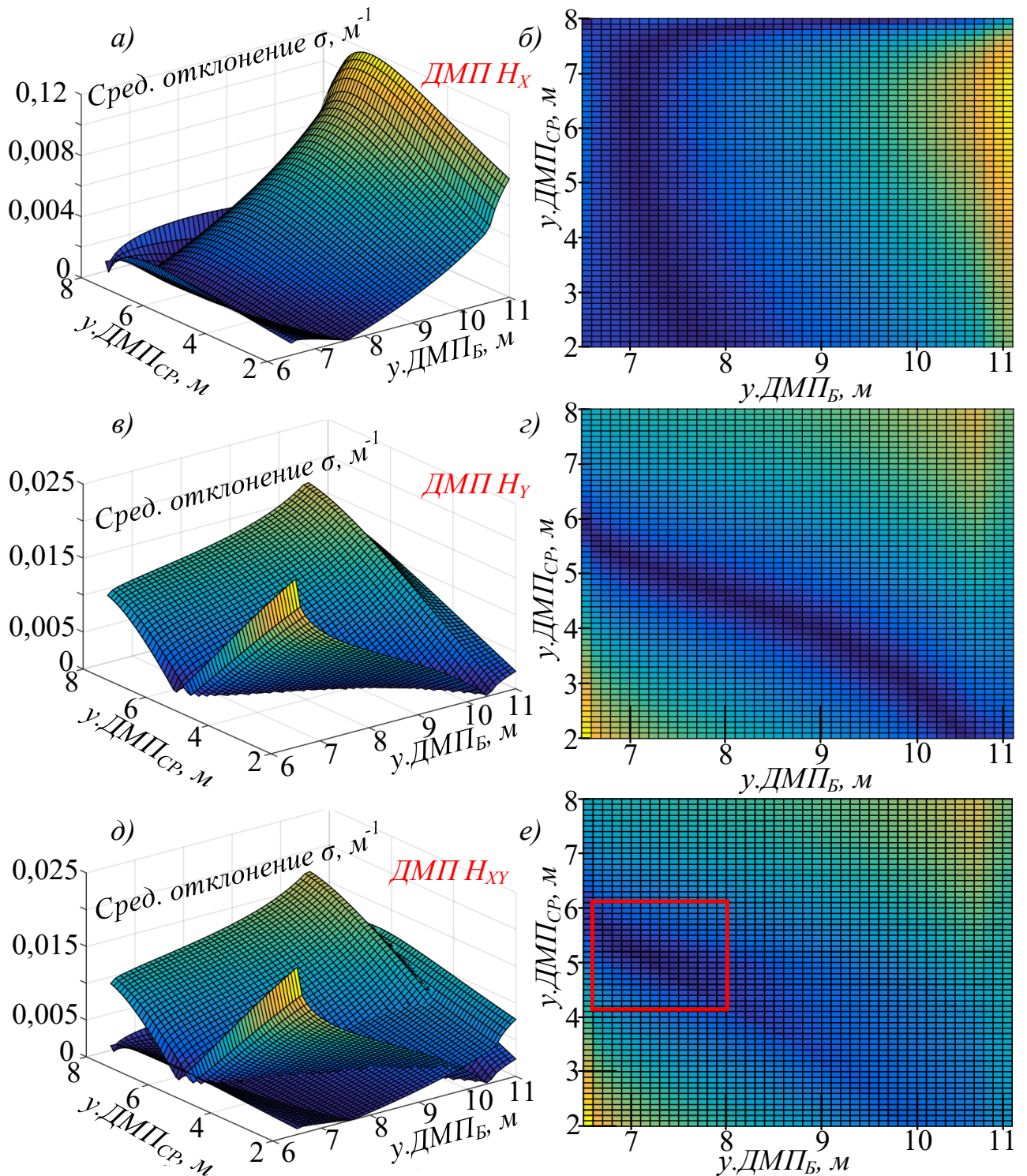


Рисунок. 2.48 – Функция среднего отклонения в зависимости от параметров высоты установки бокового и среднего датчиков, реагирующих на составляющие магнитного поля $\sigma = f(y.\text{ДМП}_\text{Б}, y.\text{ДМП}_\text{СР})$.

- а) График в трёх плоскостях для H_x ; б) Вид сверху для графика а);
 в) График в трёх плоскостях для H_y ; г) Вид сверху для графика в);
 д) График в трёх плоскостях для H_{xy} ; е) Вид сверху для графика д)

Цветом выделен градиент изменения функции, минимумом показаны полосы темного цвета. По условию минимизации небаланса НМП при внешних КЗ точка по ДМП_Б, ДМП_{СР} будет находиться в одном из минимальных значений функции среднего отклонения σ . Как можно увидеть из графиков, функция имеет несколько локальных минимумов. Это значит, что для определения точки оптимального размещения ДМП необходимо использовать такой метод оптимизации, который способен находить лучшие показатели с учётом большого числа входных параметров и не останавливаться в локальных минимумах и максимумах. Для каждого датчика, реагирующего на свою составляющую магнитного поля, приведена визуализация функции среднего отклонения σ (2.38) от аргументов по высоте установки ДМП_Б и ДМП_{СР}. Для минимизации погрешности при внешних КЗ данное отклонение должно стремиться к нулю. Выделенным прямоугольником показана область, где датчики, реагирующие на ортогональные составляющие, потенциально могут быть размещены в одной точке для облегчения их монтажа и контроля состояния.

2.6.4 Обоснование требования для оптимизации при внутреннем коротком замыкании на защищаемой линии

Однако поиск оптимального решения не ограничивается только условием минимального значения среднего отклонения функций, так как одновременно с этим необходимо обеспечить достаточный замер НМП при КЗ в зоне действия защиты по аналогии с поиском оптимального решения для одноцепной ЛЭП. Для этого необходимо определить режимы, условия и ограничения, оказывающие влияние непосредственно на величины токов КЗ:

- 1) Замер магнитного поля прямо пропорционален замеру тока. Следовательно, чем меньше величина тока КЗ, тем меньше будет замер магнитного поля. Минимальный ток КЗ наблюдается при КЗ в конце ВЛ.
- 2) Минимальный замер магнитного поля при КЗ в зоне действия защиты

по условию дифференциального принципа действия защиты будет наблюдаться в режиме одностороннего питания при КЗ в конце защищаемой линии.

3) Необходимо произвести проверку при всех видах междуфазных КЗ для ЛЭП 35 кВ, поскольку необходимо брать в качестве определяющего минимальный замер НМП, полученный при том или ином виде КЗ.

4) Необходимо также рассмотреть токораспределение при КЗ в начале и в середине ЛЭП и при внешнем для обеих линий КЗ для исследования их влияния (положительного или отрицательного) на качество замеров.

В первом случае при КЗ в конце ВЛ в режиме одностороннего питания токи в начале ВЛ $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ будут равны друг другу, при этом токи $\dot{I}_3$ и $\dot{I}_4$ будут также равны друг другу, как указано на рисунках 2.49 и 2.50, где ($\dot{I}_2 = -\dot{I}_4$) и ($\dot{I}_1 = \dot{I}_3$). Из этого следует, что все токи будут равны друг другу по модулю при одинаковом сопротивлении параллельных ЛЭП $I_1 = I_2 = I_3 = I_4$, и отличия будут заключаться только в знаках этих токов для расчёта НМП при КЗ в зоне $\dot{N}_{рез.зона}$, при КЗ на параллельной ЛЭП $\dot{N}_{рез.пар}$ и при внешнем для обеих ЛЭП КЗ $\dot{N}_{рез.внеш}$ (рисунок 2.51). Следовательно, из формул (2.30) и (2.34) с указанными допущениями и направлениями токов можно составить выражение (2.40). Рассматриваются показания замеров с датчиков ДМП_{Б.Н}, ДМП_{Б.К}, ДМП_{СР.Н}, ДМП_{СР.К} относительно защищаемой ВЛ Б.

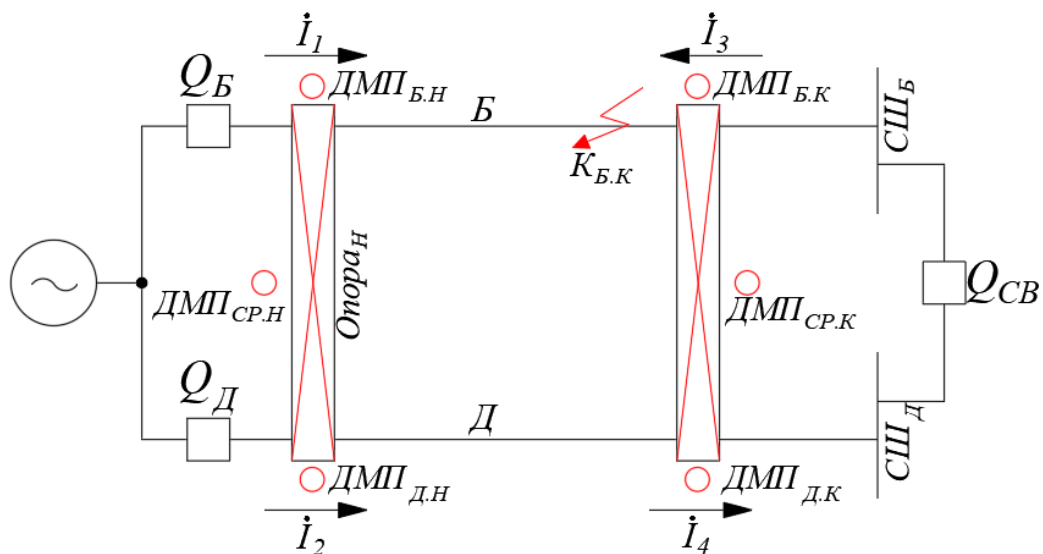


Рисунок. 2.49 – Схема распределения токов при КЗ в конце зоны защищаемой ЛЭП Б в режиме одностороннего питания

$$\begin{aligned}
\dot{H}_{X(Y), \text{рез.зона}} &= 2\dot{I}_{A1}(\beta_{X(Y).A.B} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y).A.CP.B}) + \\
&+ 2\dot{I}_{B1}(\beta_{X(Y).B.B} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y).B.CP.B}) + \\
&+ 2\dot{I}_{C1}(\beta_{X(Y).C.B} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y).C.CP.B}). \\
\dot{H}_{X(Y), \text{рез.пар}} &= 2\dot{I}_{A2}(\beta_{X(Y).A.D} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y).A.CP.D}) + \\
&+ 2\dot{I}_{B2}(\beta_{X(Y).B.D} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y).B.CP.D}) + \\
&+ 2\dot{I}_{C2}(\beta_{X(Y).C.D} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y).C.CP.D}). \\
\dot{H}_{\text{рез.внеш}} &\approx 0.
\end{aligned} \tag{2.40}$$

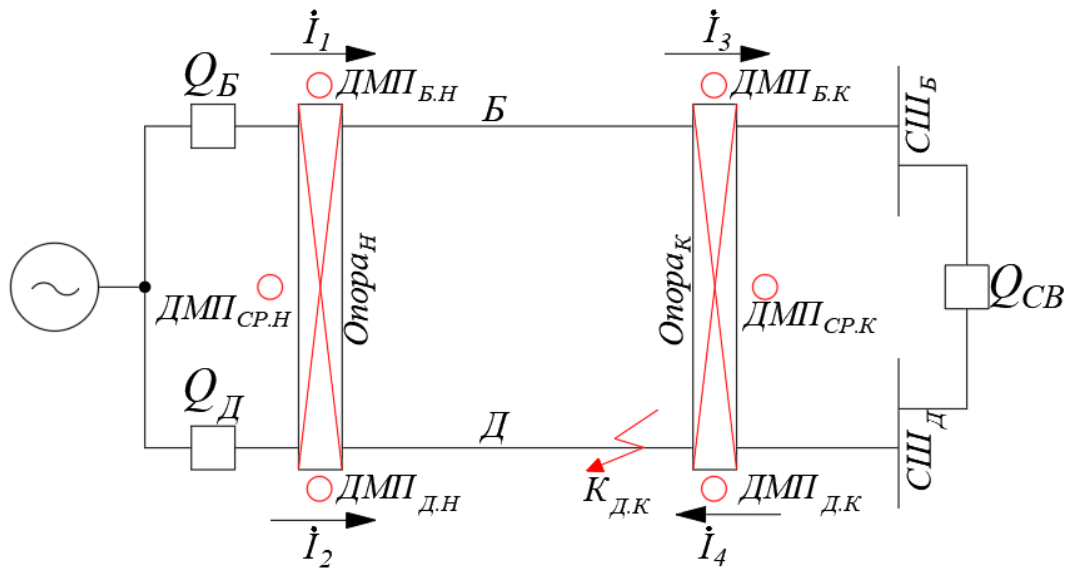


Рисунок. 2.50 – Схема распределения токов при КЗ на параллельной ЛЭП Д в режиме одностороннего питания

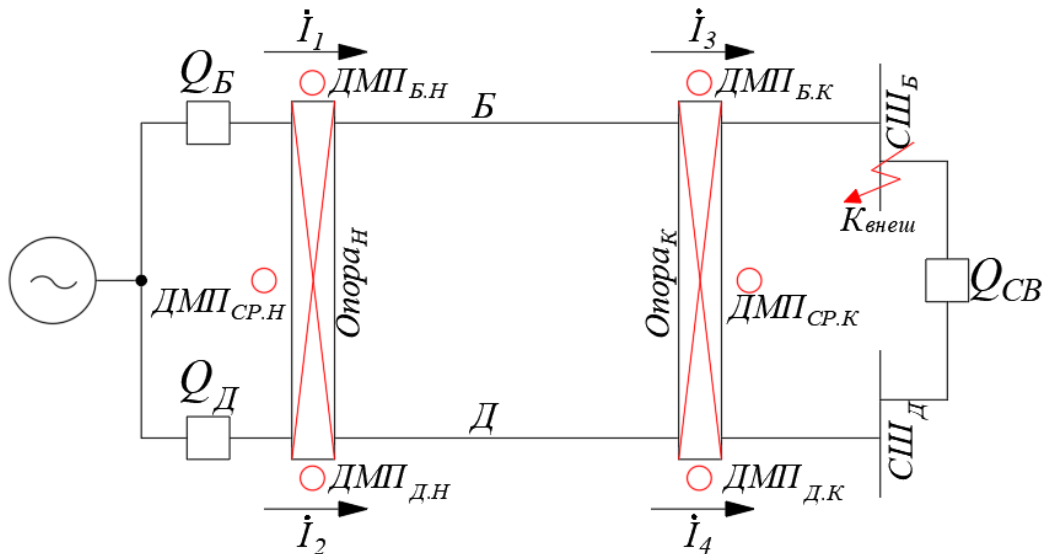


Рисунок. 2.51 – Схема распределения токов при КЗ внешнем для обеих ЛЭП

При КЗ в начале ВЛ процесс будет схож с результатом формулы (2.40) за исключением того, что токи на неповрежденной ВЛ, а также токи в конце ВЛ будут равны нулю, и единственными токами, влияющими на замеры, будут ток I_1 при КЗ в зоне (рисунок. 2.52) и ток I_2 при КЗ на параллельной ВЛ (рисунок 2.53) по выражению (2.41).

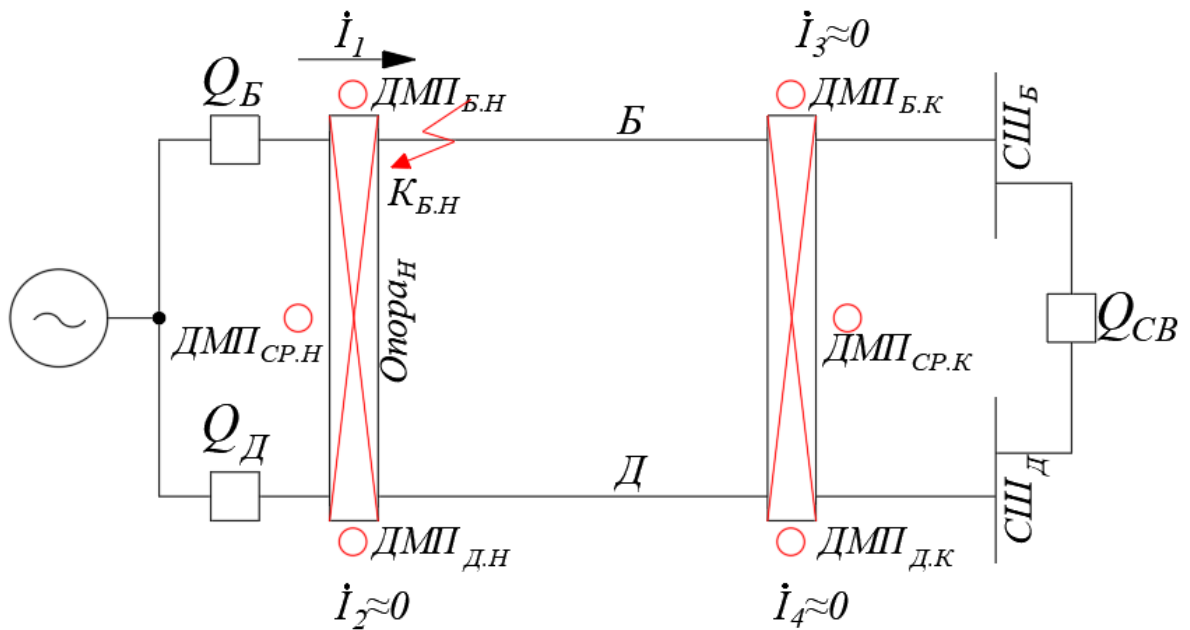


Рисунок. 2.52 – Схема распределения токов при КЗ в начале зоны защищаемой ЛЭП Б в режиме одностороннего питания

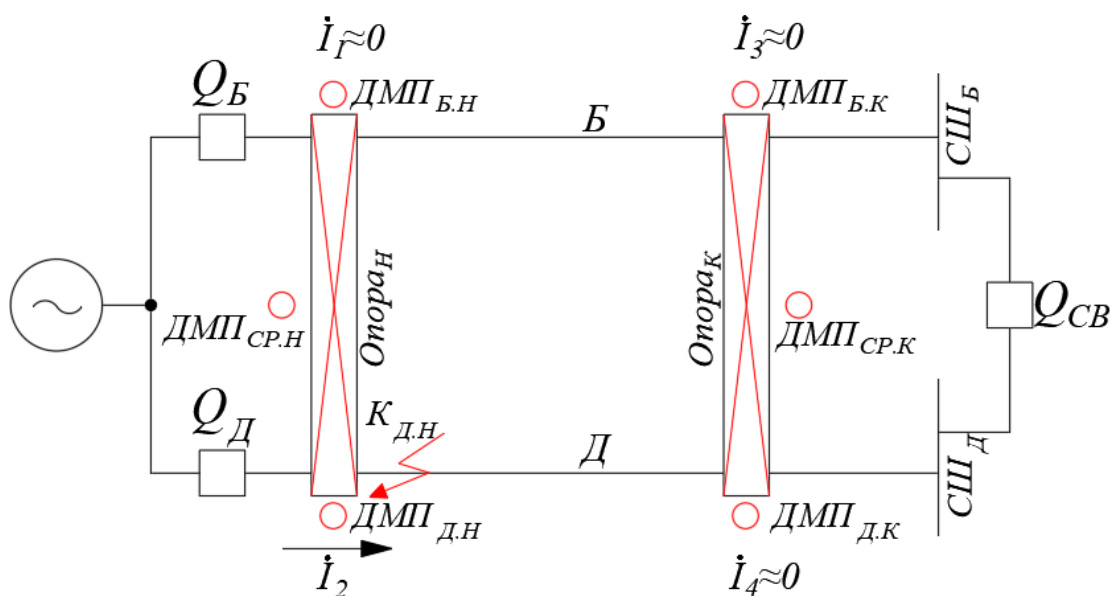


Рисунок. 2.53 – Схема распределения токов при КЗ в начале параллельной ЛЭП Д в режиме одностороннего питания

В случае при КЗ в середине ВЛ или на определенном её участке, отличающемся от рассмотренных начала и конца, результат можно выразить в соответствии с рисунком 2.54. Схемы а) и б) идентичны друг другу.

$$\begin{aligned}
 \dot{H}_{X(Y), \text{рез. зона}} &= \dot{I}_{A1}(\beta_{X(Y), A.B} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y), A.CP.B}) + \\
 &+ \dot{I}_{B1}(\beta_{X(Y), B.B} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y), B.CP.B}) + \\
 &+ \dot{I}_{C1}(\beta_{X(Y), C.B} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y), C.CP.B}). \\
 \dot{H}_{X(Y), \text{рез. нар}} &= \dot{I}_{A2}(\beta_{X(Y), A.D} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y), A.CP.D}) + \\
 &+ \dot{I}_{B2}(\beta_{X(Y), B.D} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y), B.CP.D}) + \\
 &+ \dot{I}_{C2}(\beta_{X(Y), C.D} - K_{X(Y)}\beta_{X(Y), C.CP.D}).
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

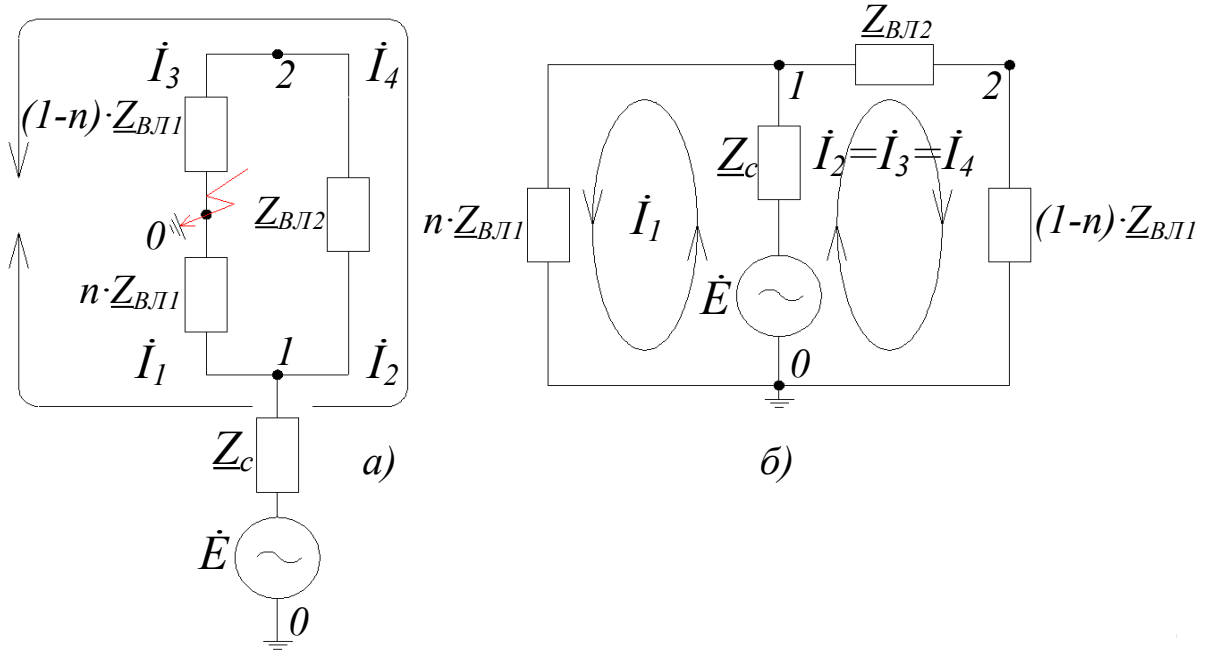


Рисунок. 2. 54 – Токораспределение на двухцепной ВЛ при одностороннем питании: а) схема замещения полная; б) схема замещения в виде контуров

В данном случае токи $\dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4$ будут равны друг другу при КЗ в зоне, а токи $\dot{I}_1, \dot{I}_3, \dot{I}_4$ будут равны друг другу при внешнем КЗ. Тогда отношение токов будет определяться в соответствии с системой (2.42), где $\dot{E}$ – номинальное напряжение системы, $\underline{Z}_c$ – сопротивление системы, $\underline{Z}_{BЛ1}$ – сопротивление защищаемой ВЛ, $\underline{Z}_{BЛ2}$

– сопротивление параллельной смежной ВЛ, n – расстояние до места повреждения.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}_{БЛ1} \cdot n + \underline{Z}_C} \cdot \frac{\underline{Z}_{БЛ2} + \underline{Z}_{БЛ1} \cdot (1-n) + \underline{Z}_C}{\dot{E}} = \frac{\underline{Z}_{БЛ2}}{\underline{Z}_{БЛ1} \cdot n + \underline{Z}_C} + \frac{\underline{Z}_{БЛ1}}{\underline{Z}_{БЛ1} \cdot n + \underline{Z}_C} - 1; \\ \text{при } \underline{Z}_{БЛ1} = \underline{Z}_{БЛ2} = \underline{Z}_{БЛ}; \\ \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{2\underline{Z}_{БЛ}}{\underline{Z}_{БЛ} \cdot n + \underline{Z}_C} - 1; \\ \text{при } \underline{Z}_C \approx 0; \\ \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{2}{n} - 1. \end{array} \right. \quad (2.42)$$

Для решения задачи оптимизации будет использоваться условие при КЗ в конце ВЛ в соответствии с формулой (2.40), в этом случае ток КЗ будет минимальным, а также токи будут оказывать влияние на замеры всех установленных ДМП. За базисный ток фаз А, В и С принята величина тока 10 кА для трёхфазного КЗ. Дополнительно при КЗ в конце ЛЭП в зоне действия защиты и на параллельной ЛЭП величины токов КЗ по обеим ВЛ будут одинаковы, а отличие будет только по направлению протекающего тока, что очень удобно для определения замеров НМП. Замеры результирующего значения НМП при остальных режимах, а также в режиме двухстороннего питания будут проверены на динамической модели MATLAB Simulink после определения оптимальных координат размещения ДМП_Б (ДМП_Д) и ДМП_{СР} по условию минимизации параметра среднего отклонения функционалов (2.38), условие для поиска близкого к нулю замера НМП при внешнем КЗ на смежной ВЛ, и выполнение поиска наибольшего замера НМП при междуфазных КЗ в зоне защиты.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{ABC} = \begin{bmatrix} I_{КЗ}^{(3)} & I_{КЗ}^{(3)} e^{-j120^\circ} & I_{КЗ}^{(3)} e^{j120^\circ} \end{bmatrix} - \text{для трёхфазного КЗ}; \\ \dot{I}_{ABC} = \frac{\sqrt{3}}{2} \begin{bmatrix} I_{КЗ}^{(3)} & -I_{КЗ}^{(3)} & 0 \end{bmatrix} - \text{для двухфазного КЗ на фазах АВ}; \\ \dot{I}_{ABC} = \frac{\sqrt{3}}{2} \begin{bmatrix} 0 & I_{КЗ}^{(3)} & -I_{КЗ}^{(3)} \end{bmatrix} - \text{для двухфазного КЗ на фазах ВС}; \\ \dot{I}_{ABC} = \frac{\sqrt{3}}{2} \begin{bmatrix} -I_{КЗ}^{(3)} & 0 & I_{КЗ}^{(3)} \end{bmatrix} - \text{для двухфазного КЗ на фазах СА}; \end{array} \right.$$

где $I_{КЗ}^{(3)}$ - расчетное значение тока трёхфазного КЗ в рассматриваемой точке.

2.6.5 Решение задачи оптимального размещения датчиков магнитного поля с применением алгоритма многопараметрической оптимизации

Основной целью решения задачи оптимизации является определение координат размещения ДМП возле двухцепной опоры для того, чтобы результирующий замер НМП при КЗ на смежной параллельной ЛЭП был минимален, а при КЗ в зоне действия защиты был максимальным для всех видов рассматриваемых КЗ. Так как рассматривается двухцепная опора напряжением 35 кВ, то в первую очередь выполняется анализ междуфазных КЗ. Условием минимального замера результирующего значения НМП при внешних КЗ на параллельной ЛЭП является условие формул (2.32) и (2.38), когда средние отклонения параметров функционалов $\beta_{X(Y).A.Д.}$, $\beta_{X(Y).B.Д.}$, $\beta_{X(Y).C.Д.}$, $\beta_{X(Y).A.СР.Д.}$, $\beta_{X(Y).B.СР.Д.}$, $\beta_{X(Y).C.СР.Д.}$, зависящих от места размещения ДМП_Б и ДМП_{СР}, стремятся к нулевому значению, при этом данное условие никак не зависит от величин токов КЗ. Второе условие получения максимального замера при КЗ в зоне действия защиты является аналогичным формуле (2.24), где при изначальных точках размещения ДМП проверяются замеры результирующего значения НМП для всех видов КЗ, и из всех полученных замеров выбирается наиболее тяжёлый для чувствительности защиты – минимальный. Этот минимальный замер в дальнейшем и сравнивается с другими минимальными замерами, полученными при иных координатах мест размещения ДМП.

Для размещения ДМП рядом с двухцепной опорой аргументами функции оптимизации являются координаты по оси y . Для среднего ДМП_{СР} координата по оси x определена как ноль, для бокового ДМП_Б координата по оси x определяется в соответствии с функциями дуг окружностей (2.36), следовательно, координата по оси ординат для бокового ДМП_Б функционально связана с его координатой по оси абсцисс. По первоначальным координатам размещения ДМП имеется возможность рассчитать функционалы расстояний от точки размещения ДМП до токоведущих частей своей защищаемой ВЛ с индексом Б и дальней смежной параллельной ВЛ с индексом Д по формуле (2.26) для бокового ДМП_Б и по (2.27) для среднего ДМП_{СР}. Далее зная координаты размещения ДМП и их функционалы

расстояний, имеется возможность сразу определить оптимальный коэффициент торможения K , найдя частную производную по параметру K согласно формуле (2.39). Затем с применением метода оптимизации выполняется подбор различных комбинаций входных параметров $удМП_Б$ и $удМП_{СР}$ и определяются координаты, при которых среднее отклонение будет минимальным. Параллельно с этим при переборе входных параметров будет определяться максимальный из минимальных замеров НМП при КЗ на защищаемой ВЛ, что является условием, противоречащим первому. Следовательно, при двух входных переменных имеется два антагонистичных выходных параметра: среднее отклонение и максимальный из минимальных замеров НМП. Данные условия говорят о том, что задача является многопараметрической, и традиционные методы оптимизации не смогут справиться с ней. В дополнение помимо вышеуказанных условий необходимо рассмотреть несколько возможностей применения замеров с ДМП, а именно:

1) Отдельное использование независимой пары однокоординатных ДМП, реагирующих на соответствующую составляющую магнитного поля $\dot{H}_x, \dot{H}_y$. При этом защита будет иметь по два набора датчиков (суммарно шесть штук с одной стороны). Для каждого набора ($\dot{H}_x, \dot{H}_y$) будут выбраны свои независимые уставки, и они будут размещены независимо друг от друга в разных точках возле двухцепной опоры в наиболее оптимальных для себя областях выполнения условий многопараметрической оптимизации.

2) Отдельное использование независимой пары однокоординатных ДМП, реагирующих на соответствующую составляющую магнитного поля $\dot{H}_x, \dot{H}_y$. При этом защита будет иметь по два набора датчиков (суммарно шесть штук с одной стороны). Для каждого набора ($\dot{H}_x, \dot{H}_y$) будут выбраны свои независимые уставки, но датчики будут располагаться в одних точках пространства для $ДМП_Б$ и $ДМП_{СР}$ соответственно. Это позволит облегчить проведение монтажных работ и работ по наладке устройств, а также сократит количество мачт (напр., дюралевых), на которых будут установлены ДМП. Однако найденная точка, для которой будут удовлетворяться условия для обоих типов ДМП, может быть не самой оптимальной в сравнении с координатами, выбранными по п.1.

3) Использование трёх трёхкоординатных ДМП, реагирующих сразу на полную составляющую (среднеквадратичное значение) магнитного поля $\dot{H}_{\Sigma}$. Для этого помимо удовлетворения условий оптимизации по п.2 должно быть также выполнено условие, чтобы для одних и тех же точек пространства, в которых будут установлены ДМП, выполнялось условие получения одного и того же значения коэффициента торможения K как для вертикальной, так и для горизонтальной составляющих магнитного поля, что может быть маловероятным событием. Преимуществом является использование трёх ДМП вместо шести, однако при этом повышается вероятность ложной работы защиты, так как трёхкоординатный ДМП будет фиксировать помехи сразу по всем составляющим, в то время как по первым двум пунктам маловероятно, что возникнет длительная помеха, которая одновременно вызовет небаланс больше величины уставки сразу для обеих ортогональных составляющих магнитного поля.

Всё вышеперечисленное приводит к тому, что для выбора оптимального размещения ДМП возле двухцепной ЛЭП набирается одновременно значительное количество переменных параметров, что делает рассматриваемую задачу многопараметрической и ещё более сложной в решении.

В разделе 2.5.3 произведен разбор применения генетического алгоритма как наиболее эффективного способа нахождения глобального оптимума при наличии локальных экстремумов. Однако для одноцепной линии применялось изменение лишь одного входного аргумента (угла перемещения по задающей окружности) и одного выходного параметра в виде максимального замера НМП из всех наборов минимальных значений. Однако модуль расчетов «Optimization Toolbox» в программном комплексе MATLAB способен производить вычисления по генетическому алгоритму с использованием многопараметрической оптимизации [116, 117, 118, 119].

Основное отличие в многопараметрической оптимизации от однопараметрической заключается не в поиске одного конкретного оптимального решения, а набора компромиссных вариантов, которые будут больше удовлетворять одному или другому выходному условию оптимальности. Как

итог, не существует такого решения, которое при улучшении одного из показателей не ухудшило бы другой. Когда оптимизационная задача включает в себя нахождение оптимума при нескольких аргументах в виде взаимно конфликтующих условий, её относят к классу многопараметрических (многоцелевых) [115]. При этом получается множество решений, в которых невозможно улучшить один показатель без ухудшения других, и такое множество образует так называемый Парето-фронт (границу Парето). Для примера на рисунке 2.55 представлено два графика функций с минимумами в точках $x = -2$ и $x = 2$ соответственно. Однако в многопараметрической задаче $x = -2$, $x = 2$, и любое решение в интервале $-2 \leq x \leq 2$ одинаково оптимально.

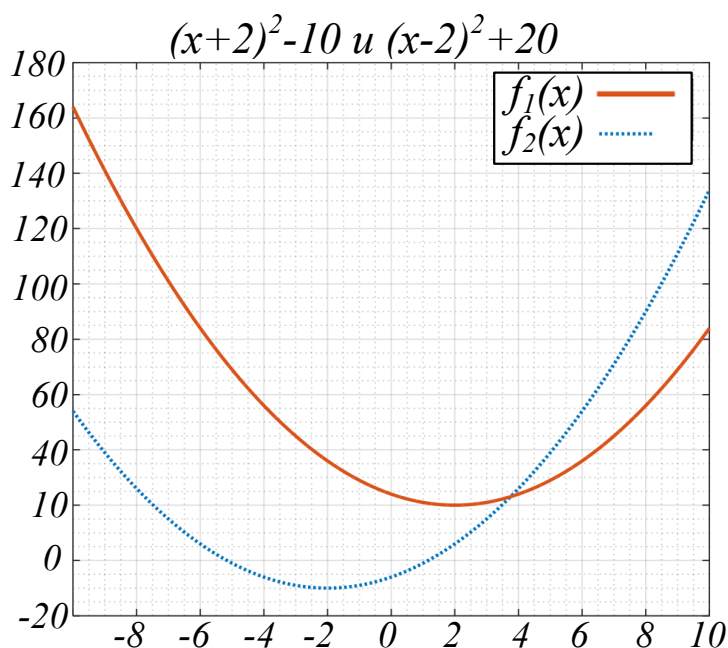


Рисунок 2.55 – График двух функций

Для представленной многопараметрической задачи не существует единого решения. Цель многопараметрического генетического алгоритма – найти набор решений в представленном диапазоне (в наилучшем случае с минимальным разбросом значений). Этот набор решений также известен как фронт Парето (рисунок 2.56). Определение результатов минимума (оптимума) двух взаимосвязанных функций, которые зависят от двух аргументов в виде высоты

бокового датчика $y_{\text{ДМП.Б}}$ и высоты среднего датчика $y_{\text{ДМП.СР}}$, представлено на рисунке 2.57 в виде переменных x_1 и x_2 соответственно.

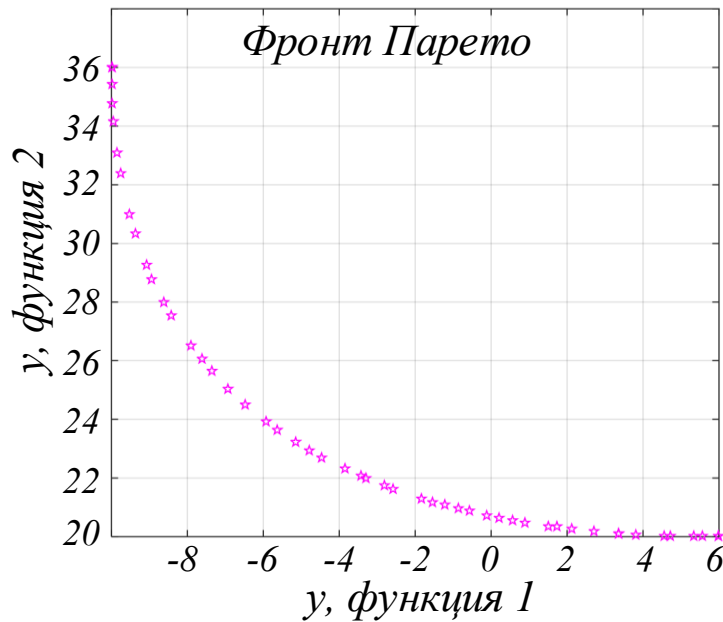


Рисунок 2.56 – Фронт решений по Парето для двух функций

Таблица 2.3 – Значения функций f_1 и f_2 при изменении x в диапазоне фронта Парето

f_1	f_2	x	f_1	f_2	x	f_1	f_2	x
1	2	3	4	5	6	7	8	9
-10,00	36,00	-2,00	-6,47	24,49	-0,12	-0,11	20,73	1,14
-9,99	35,43	-1,93	-5,92	23,92	0,02	0,22	20,64	1,20
-9,98	34,77	-1,84	-5,63	23,64	0,09	0,57	20,56	1,25
-9,94	34,15	-1,76	-5,13	23,22	0,21	0,90	20,49	1,30
-9,85	33,08	-1,62	-4,80	22,96	0,28	1,52	20,37	1,39
-9,77	32,37	-1,52	-4,46	22,71	0,35	1,73	20,33	1,43
-9,53	31,00	-1,32	-3,85	22,31	0,48	2,14	20,27	1,48
-9,38	30,33	-1,21	-3,43	22,06	0,56	2,70	20,19	1,56
-9,09	29,26	-1,04	-3,29	21,99	0,59	3,35	20,12	1,65
-8,93	28,79	-0,97	-2,81	21,74	0,68	3,35	20,12	1,65
-8,63	28,01	-0,83	-2,59	21,63	0,72	3,82	20,08	1,72
-8,43	27,54	-0,75	-1,85	21,31	0,85	4,57	20,03	1,82
-7,91	26,53	-0,56	-1,54	21,19	0,91	4,71	20,03	1,84
-7,63	26,05	-0,46	-1,22	21,08	0,96	5,33	20,01	1,92
-7,36	25,65	-0,38	-0,88	20,96	1,02	5,58	20,00	1,95
-6,92	25,05	-0,25	-0,57	20,86	1,07	6,00	20,00	2,00

Problem Setup and Results

Solver: **gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic Algo...**

Problem

Fitness function: **@xyKfun0s0tokami1**

Number of variables: **2**

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: **[6.5 0]** Upper: **[19.5 9]**

Nonlinear constraint function:

Run solver and view results

☐ Use random states from previous run

Start **Pause** **Stop**

Current iteration: **144** **Clear Results**

Optimization running.
Optimization terminated: average change in the spread of Pareto solutions less than options.TolFun.

Pareto front - function values and decision variables

Index ▲	f1	f2	x1	x2
1	-26 831,998	0,007	10,582	8,389
2	-9 770,153	0	9,543	7,916
3	-21 726,758	0	10,531	7,959
4	-22 153,143	0	10,567	7,961
5	-9 769,86	0	9,543	7,916
6	-26 831,998	0,007	10,582	8,389
7	-24 965,061	0,006	10,581	8,353
8	-25 982,421	0,007	10,571	8,377
9	-25 047,532	0,006	10,541	8,366
10	-24 584,039	0,006	10,568	8,348

Рисунок 2.57 – Результаты расчета модуля оптимизации посредством многопараметрической оптимизации с применением генетического алгоритма

В значение первой функции f_1 заложено условие обеспечения максимального результирующего замера НМП при КЗ в зоне действия защиты. Во второй функции f_2 определяется минимальное отклонение в точке пересечения трёх прямых, что является условием обеспечения минимально возможного результирующего замера НМП при внешнем КЗ. Это условие выражено непосредственно в виде целевой функции.

Отличительная черта решателя представляет собой возможность определения только минимальных значений искомых функций вместо максимумов. Из-за этого максимальный замер НМП при КЗ в зоне представлен в виде минимума значения функции, и принята обратная величина от полученного значения $\max f_m(x) = -\min\{-f_m(x)\}$.

В решателе необходимо задать ссылку на целевую функцию в графе «Fitness function», определить количество изменяемых переменных входных данных в графе «Number of variables», а также определить границы интервала, на котором будет происходить поиск оптимального решения. Для бокового ДМП_Б данная граница снизу и сверху определяется значениями по высоте параметров C_1 и C_4 соответственно по формуле (2.36), так как место установки ДМП не должно выходить за границы определенных дуг окружностей безопасного расстояния около фазных проводов. Для среднего ДМП_{СР} границы определены от начального уровня земли 0 м до высоты первого фазного провода, задаваемой параметром b_1 . Верхняя граница среднего ДМП_{СР} задана таким образом, чтобы в случае нахождения оптимального решения не помещать ДМП_{СР} между всеми фазными проводами, так как это усложняет условия его обслуживания. Если же оптимального решения на данном интервале найти не удалось, тогда верхнюю границу установки ДМП_{СР} можно расширить до высоты самой удаленной от земли фазы b_3 .

Итоговые результаты для размещения ДМП, реагирующих на вертикальную составляющую магнитного поля $\dot{H}_x$, указаны в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Расчёт НМП при КЗ в зоне действия защиты и при внешнем КЗ для различных междуфазных КЗ в зависимости от расположения ДМП вертикальной составляющей магнитного поля $\dot{H}_x$.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
у.ДМП _Б , м	10,58	10,58	10,58	10,58	10,58	10,58	10,50	10,58	10,40
у.ДМП _{СР} , м	8,27	8,26	8,25	7,58	7,82	7,90	7,94	7,96	7,95
х.ДМП _Б , м	-3,94	-3,94	-3,94	-3,94	-3,94	-3,94	-4,00	-3,94	-4,07
K_x	-2,269	-2,225	-2,168	-0,910	-1,082	-1,178	-1,201	-1,277	-1,182
Отношение	6,47	6,85	7,39	21,5	40,9	83,3	259	1000	$2,1 \cdot 10^7$
Отклонение σ , $м^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-10}$
$\dot{H}_{min}$, зона А/м	755	752	748	748	742	739	705	738	665
$\dot{H}_{abc}$, зона А/м	1630	1623	1614	1496	1507	1514	1444	1521	1362
$\dot{H}_{ab}$, зона А/м	1628	1622	1613	1496	1507	1513	1444	1521	1362
$\dot{H}_{bc}$, зона А/м	873	870	864	749	765	774	738	783	696
$\dot{H}_{ca}$, зона А/м	755	752	748	748	742	739	705	738	665
$\dot{H}_{abc}$, пар А/м	116,8	109,7	101,3	34,8	18,1	8,9	2,7	0,74	$3,1 \cdot 10^{-5}$
$\dot{H}_{ab}$, пар А/м	108,9	101,5	92,7	24,0	13,1	6,6	2,0	0,56	$2,3 \cdot 10^{-5}$
$\dot{H}_{bc}$, пар А/м	91,0	86,9	81,8	33,8	17,4	8,5	2,6	0,70	$2,9 \cdot 10^{-5}$
$\dot{H}_{ca}$, пар А/м	18,0	14,6	10,9	9,8	4,3	1,9	0,5	0,13	$5,8 \cdot 10^{-6}$

В первых двух строках таблицы указаны координаты «у» высоты размещения ДМП для бокового датчика у_{ДМП.Б} и среднего датчика у_{ДМП.СР}. В третьей строке указана координата х_{ДМП.Б} бокового датчика. Параметры для координат указаны в метрах. Далее представлен оптимальный коэффициент торможения K . В следующей строке указано отношение самого малого замера магнитного поля при КЗ в зоне к самому большому замеру магнитного поля (небалансу) при внешнем КЗ. Далее представлены столбцы с искомым минимальным средним отклонением σ , в последних строках указаны замеры магнитного поля при КЗ в зоне и внешних КЗ при различных видах междуфазных КЗ. Множественность результатов характеризуется наличием нескольких решений, удовлетворяющих заложенному условию оптимальности. Этим определяется эвристичность метода, когда человеку приходится в итоге выбирать наилучшее решение, полученное из предложенных в результате решения задачи оптимизации. Аналогично для горизонтальной составляющей $\dot{H}_y$ показаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Расчёт НМП при КЗ в зоне действия защиты и при внешнем КЗ для различных междуфазных КЗ в зависимости от расположения ДМП горизонтальной составляющей магнитного поля $\dot{H}_y$.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
у.ДМП _Б , м	15,32	15,30	15,31	15,31	15,30	15,29	15,29	15,30	15,32
у.ДМП _{СР} , м	6,77	5,23	4,70	4,54	4,46	4,38	4,34	4,34	4,31
х.ДМП _Б , м	-4,24	-4,29	-4,26	-4,26	-4,29	-4,29	-4,29	-4,29	-4,23
K_Y	0,326	0,714	0,912	0,980	0,995	1,027	1,045	1,045	1,086
Отношение	11,7	30,3	69,8	127	254	1062	1401	1864	$9,91 \cdot 10^7$
Отклонение σ , m^{-1}	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$
$\dot{H}_{min}$, зона А/м	413	410	400	397	408	407	407	406	387
$\dot{H}_{abc}$, зона А/м	826	821	828	829	815	815	815	816	839
$\dot{H}_{ab}$, зона А/м	413	410	400	397	408	407	407	406	387
$\dot{H}_{bc}$, зона А/м	413	411	428	431	408	408	407	409	452
$\dot{H}_{ca}$, зона А/м	826	821	828	828	815	815	815	816	838
$\dot{H}_{abc}$, пар А/м	35,35	13,52	5,72	3,14	1,61	0,38	0,29	0,22	$3,90 \cdot 10^{-6}$
$\dot{H}_{ab}$, пар А/м	24,10	10,25	4,49	2,49	1,28	0,31	0,23	0,17	$3,14 \cdot 10^{-6}$
$\dot{H}_{bc}$, пар А/м	34,45	12,75	5,31	2,90	1,48	0,35	0,27	0,20	$3,58 \cdot 10^{-6}$
$\dot{H}_{ca}$, пар А/м	10,35	2,50	0,82	0,41	0,20	$4,53 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,39 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2.6 – Замеры НМП при КЗ в зоне действия защиты и при внешнем КЗ для различных междуфазных КЗ в зависимости от расположения ДМП вертикальной и горизонтальной составляющих магнитного поля $\dot{H}_x$ и $\dot{H}_y$ при установке однокоординатных ДМП в одной точке

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
у.ДМП _Б , м	7,46	7,49	7,45	7,03	7,50	10,75	7,50	7,45	7,50
у.ДМП _{СР} , м	4,86	4,85	4,87	5,14	3,00	1,32	3,29	4,87	3,50
х.ДМП _Б , м	-3,97	-3,99	-3,96	-3,54	-4,00	-4,38	-4,00	-3,96	-4,00
K_X	-0,298	-0,306	-0,292	-0,161	-0,449	-1,951	-0,424	-0,292	-0,407
Отношение	55,1	52,5	57,0	$4,7 \cdot 10^9$	244	19,8	156	57	123
Отклонение σ , m^{-1}	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-12}$	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$9,03 \cdot 10^{-4}$	$4,43 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$5,60 \cdot 10^{-5}$
$\dot{H}_{min}$, зона $\dot{H}_X$ А/м	234	236	233	203	240	618	240	233	239

Продолжение таблицы 2.6

$\dot{H}_{abc}$, зона $\dot{H}_X$ А/м	496	485	503	668	483	1317	483	503	483
$\dot{H}_{ab}$, зона $\dot{H}_X$ А/м	261	249	269	450	242	1316	243	269	244
$\dot{H}_{bc}$, зона $\dot{H}_X$ А/м	234	236	233	203	240	698	240	233	239
$\dot{H}_{ca}$, зона $\dot{H}_X$ А/м	495	485	502	653	483	618	483	502	483
$\dot{H}_{abc}$, пар $\dot{H}_X$ А/м	4,25	4,50	4,08	$4,31 \cdot 10^{-8}$	0,99	31,3	1,54	4,08	1,94
$\dot{H}_{ab}$, пар $\dot{H}_X$ А/м	2,85	3,01	2,73	$2,87 \cdot 10^{-8}$	0,69	22,4	1,06	2,73	1,33
$\dot{H}_{bc}$, пар $\dot{H}_X$ А/м	4,16	4,40	3,99	$4,22 \cdot 10^{-8}$	0,96	30,1	1,49	3,99	1,88
$\dot{H}_{ca}$, пар $\dot{H}_X$ А/м	1,31	1,39	1,26	$1,35 \cdot 10^{-8}$	0,27	7,72	0,43	1,26	0,55
K_Y	-1,348	-1,352	-1,345	-1,280	-2,736	-2,774	-2,482	-1,345	-2,309
Отношение	$3,52 \cdot 10^5$	$9,90 \cdot 10^3$	$4,12 \cdot 10^6$	1970	3,4	$5,14 \cdot 10^4$	3,9	$4,07 \cdot 10^6$	4,3
Отклонение σ , $м^{-1}$	$9,21 \cdot 10^{-9}$	$3,32 \cdot 10^{-7}$	$7,80 \cdot 10^{-10}$	$1,29 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-7}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$7,88 \cdot 10^{-10}$	$9,54 \cdot 10^{-4}$
$\dot{H}_{min}$, зона $\dot{H}_Y$ А/м	112	114	111	88	153	346	148	111	143
$\dot{H}_{abc}$, зона $\dot{H}_Y$ А/м	1228	1236	1223	1063	1221	789	1224	1223	1226
$\dot{H}_{ab}$, зона $\dot{H}_Y$ А/м	1003	1009	999	874	972	346	978	999	983
$\dot{H}_{bc}$, зона $\dot{H}_Y$ А/м	112	114	111	88	153	441	148	111	143
$\dot{H}_{ca}$, зона $\dot{H}_Y$ А/м	1115	1123	1110	962	1125	787	1126	1110	1126
$\dot{H}_{abc}$, пар $\dot{H}_Y$ А/м	$3,19 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$4,48 \cdot 10^{-2}$	45,0	$6,73 \cdot 10^{-3}$	38,1	$2,73 \cdot 10^{-5}$	33,0
$\dot{H}_{ab}$, пар $\dot{H}_Y$ А/м	$2,48 \cdot 10^{-4}$	$8,94 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$3,42 \cdot 10^{-2}$	38,8	$6,19 \cdot 10^{-3}$	32,4	$2,12 \cdot 10^{-5}$	27,8
$\dot{H}_{bc}$, пар $\dot{H}_Y$ А/м	$2,98 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-5}$	$4,21 \cdot 10^{-2}$	39,2	$5,37 \cdot 10^{-3}$	33,5	$2,55 \cdot 10^{-5}$	29,4
$\dot{H}_{ca}$, пар $\dot{H}_Y$ А/м	$4,99 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$4,24 \cdot 10^{-6}$	$7,96 \cdot 10^{-3}$	0,32	$8,21 \cdot 10^{-4}$	1,15	$4,29 \cdot 10^{-5}$	1,54

В случае если производить оптимизацию для одновременного размещения ДМП по вертикальной и по горизонтальной составляющим магнитного поля в одних и тех же точках пространства, результаты замеров НМП при КЗ в зоне действия защиты становятся практически в четыре раза хуже (88 А/м) (таблица

2.6), чем при установке ДМП для каждой оси в своей оптимальной точке (738 А/м для $\dot{H}_x$ и 406 А/м для $\dot{H}_y$).

При использовании трёхкоординатных ДМП нет возможности размещения датчиков таким образом, чтобы минимальный результирующий замер НМП был приблизительно равен нулю при КЗ на параллельной ЛЭП из-за того, что такой ДМП реагирует сразу на все составляющие $\dot{H}_x$ и $\dot{H}_y$. При этом одновременно нужно подобрать параметр коэффициента торможения K_{xy} таким, чтобы он одновременно компенсировал обе составляющие, но это сделать невозможно, так как замер, получаемый с трёхкоординатного ДМП, только один, и при любых видах КЗ будут наблюдаться разные величины по составляющим $\dot{H}_x$ и $\dot{H}_y$, которые нельзя скомпенсировать только одним коэффициентом. Из таблицы 2.6 следует, что даже при размещении в одной точке однокоординатных ДМП для получения минимального замера НМП при внешнем КЗ необходимо использовать разные коэффициенты торможения K_x и K_y для каждой из составляющей.

Как итог для двухцепной опоры ПС-35-2 при координатах размещения фазных проводников (в метрах) для ближней защищаемой ВЛ Б по оси x (-2; -3,3; -2), по оси y (9; 13; 17) и дальней смежной параллельной ВЛ Д по оси x (2; 3,3 ;2), по оси y (9; 13; 17) оптимальными точками размещения ДМП для вертикальной составляющей магнитного поля $\dot{H}_x$ являются координаты по x и y (в метрах) для бокового ДМП_Б (-3,94; 10,58) и для среднего ДМП_{СР} (0; 7,96). Для горизонтальной составляющей магнитного поля $\dot{H}_y$ оптимальными являются координаты по x и y (в метрах) для бокового ДМП_Б (-4,29; 15,30) и для среднего ДМП_{СР} (0; 4,34). Параметры по оси ординат могут меняться в зависимости от длины изоляторов, на которых закреплены фазные провода, а также от высоты самой опоры в случае, если она будет отличаться от стандартной. Визуализация размещения ДМП рядом с опорами типа ПС-35-2 и ПС-35-4 представлена в «Приложение Б – Результаты расчёта координат оптимального размещения датчиков для различных типов опор линий 35 кВ».

В случае установки однокоординатных ДМП, реагирующих на вертикальные и горизонтальные составляющие в одних точках пространства, этими точками будут являться координаты по x и y (в метрах) для бокового ДМП_Б (-3,54; 7,03) и для среднего ДМП_{СР} (0; 5,14), однако в данном случае величины результирующих замеров при КЗ в зоне действия защиты будут практически в четыре раза ниже, чем при размещении ДМП в разных точках. Реализовать вышеуказанные условия и требования оптимальности для трёхкоординатных ДМП не представляется возможным.

Выводы по второй главе

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с моделированием магнитного поля и его ортогональных составляющих возле одноцепных и двухцепных опор ВЛ при различных видах КЗ. Рассмотрены существующие ДМП на основе эффекта Холла, использующиеся в эксплуатации для получения замеров фазных токов в проводниках через замеры магнитного поля, также рассмотрены способы обработки данных выходных сигналов с ДМП для возможности проведения таких замеров. Показаны иные способы бесконтактного измерения параметров первичной сети в качестве альтернативы традиционным ТТ с указанием их преимуществ и недостатков: индукционные катушки, бесконтактные измерительные системы по радиоканалу, катушки Роговского, герконы и преобразователи Холла. Наиболее предпочтительными оказались преобразователи на основе эффекта Холла в виде магнитотранзисторных датчиков, модернизированные таким образом, чтобы они были предназначены для проведения замеров НМП от ЛЭП и имели максимальную защищенность от воздействия внешних факторов. В «Приложение А – Описание существующих датчиков магнитного поля и факторов, влияющих на точность измерений» рассмотрены факторы, оказывающие влияние на погрешности измерений с ДМП: замер слабых магнитных полей, влияние температуры окружающего воздуха, влияние случайных помех от блуждающих токов, импульсных токов

кратковременных перенапряжений, токов молнии, погрешности, связанные с влиянием токов соседних ЛЭП разного уровня напряжения, а также погрешности, вызванные отклонением параметров по координатам размещения ДМП с двух сторон ЛЭП, наличие фактора смещения проводов при ветровых нагрузках, а также изменения их стрелы провеса при различных температурах воздуха. Помимо самих факторов рассмотрены способы устранения или значительного снижения их влияния на существующие бесконтактные системы. К таким мероприятиям относятся: применение магнитных усилителей – концентраторов магнитного поля; подбор параметров усилителей и магниточувствительного материала для компенсации влияния температуры на итоговые показатели; применение экранов, усилителей и отражателей; использование одновременных замеров по вертикальной и горизонтальной составляющим магнитного поля; применение жесткой ошиновки проводников в местах установки ДМП.

С учётом того что помехозащищенные ДМП с минимальным влиянием на них рассмотренных внешних факторов уже созданы и применяются для различных целей, производится разработка способа выполнения защиты с абсолютной селективностью для одноцепных и двухцепных ЛЭП, основанного на получении рабочего сигнала не через ТТ или косвенные пофазные замеры токов ЛЭП через ДМП, а по суммарному результирующему сигналу НМП от всех фаз линии. На основе дифференциального принципа и передачи данных по АОЛС (в случае реализации защиты на ЛЭП малой протяжённости) или традиционным каналам связи по аналогии с современными устройствами ДЗЛ производится обмен информацией о результирующих замерах с ДМП, расположенных на разных концах ЛЭП. Путём сравнения измерений результирующей НМП по концам ЛЭП можно сделать вывод о том, что КЗ находится в зоне действия защиты, КЗ является для ВЛ внешним или наблюдается обычный нагрузочный режим.

Решена задача оптимизации при выборе места размещения ДМП рядом с опорой, для этого построены траектории размещения ДМП в виде дуг окружностей с ограничениями в виде максимально близкого расположения ДМП для обеспечения чувствительности и получения максимальной величины замеров НМП с одновременным соблюдением требуемого безопасного расстояния до токоведущих частей. Для одноцепной опоры использовался метод оптимизации в виде генетического алгоритма, так как составленная целевая функция имела несколько локальных экстремумов, и не все традиционные методы оптимизации могли найти по ней глобальный оптимум. При этом генетический алгоритм беспрепятственно справился с данной задачей. Для решения задачи размещения ДМП рядом с двухцепной опорой определены условия для формирования единой целевой функции в случаях КЗ на смежной параллельной ЛЭП и на своей защищаемой ЛЭП. Так как в задаче с двухцепной опорой использовалось несколько противоречащих друг другу выходных условий, то для выбора мест размещения ДМП использовался метод многопараметрической оптимизации с применением генетического алгоритма. Для защиты ВЛ на двухцепной опоре определены оптимальные координаты размещения ДМП возле ЛЭП. Предлагается использовать два набора однокоординатных ДМП, где первый реагирует на вертикальную составляющую магнитного поля $\dot{H}_x$, а второй – на горизонтальную составляющую магнитного поля $\dot{H}_y$, при этом уставки для каждого набора выбираются независимо друг от друга. Такое дублирование по двум ортогональным составляющим позволит устранить влияние случайных помех и индуцированных сигналов, так как помеха с крайне низкой вероятностью одновременно и длительно превысит уставку защиты и приведёт к ложному срабатыванию защит сразу по двум ортогональным составляющим. В главе рассмотрен вариант, когда для каждой из ортогональных составляющих НМП определены оптимальные и не зависящие друг от друга координаты установки ДМП, а также рассмотрен вариант

реализации защиты, где однокоординатные ДМП разных типов установлены в одних и тех же точках пространства. Также моделированием установлено, что для создания защиты с абсолютной селективностью на двухцепной опоре трёхкоординатные ДМП непригодны. Катушка индуктивности, аналогично, трёхкоординатному ДМП, реагирует на полную составляющую МП, тем самым тоже являясь непригодной. Если производить сравнение с катушками Роговского, то их понадобится суммарно 12 штук (аналогично 12 ДМП Холла), однако, помимо недостатков, указанных в разделе 2.4, для установки катушки Роговского необходимо приближаться к токоведущим частям ближе безопасно допустимых расстояний, что приводит к опасности работы персонала с данными измерителями, и необходимости отключения ВЛ, в случае неисправности катушек Роговского или их замены.

Если всё-таки использовать измерители, которые реагируют одновременно на магнитную составляющую (А/м) и электрическую составляющую (В/м) электромагнитного поля, то принцип идентичности выполняться не будет, так как хоть ток в начале и в конце ВЛ будет один и тот же, однако напряжение в месте установки измерителей будет различно и будет определяться падением напряжения на ВЛ при протекании тока при внешнем КЗ $\Delta U = Z_{\text{вл}} I_{\text{КЗ}}$. Следовательно, составляющие по электрическому полю (В/м) в начале и в конце ЛЭП будут различны, и дифференциальный принцип реализовать не получится.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНО-ДУГОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

3.1 Постановка задачи

Как уже указывалось ранее, разработка устройств и способов, позволяющих выявлять аварийные режимы при КЗ в первичной сети без использования замеров с ТТ и ТН, является актуальной задачей. Данные устройства могут быть использованы не как замена существующих систем РЗ, а как их дополнение для совместной работы с традиционными устройствами РЗ и устройствами РЗ, получающими информацию об аварийном режиме первичной сети через ДМП. Одним из недостатков использования защиты с абсолютной селективностью на ДМП для одноцепной и двухцепной ЛЭП является то, что зона действия защиты ограничена местами установки ДМП. При этом ДМП устанавливаются рядом с первой и последней опорой ВЛ, из-за чего образуется «мертвая зона» на начальном участке ВЛ от линейных порталов до первой/последней опоры. Помимо этого КЗ на начальном участке ВЛ также представляют собой вероятность отказа срабатывания для традиционных устройств, например, если ВЛ примыкает к станции или ПС большой мощности, то при КЗ на начальном участке ВЛ будут наблюдаться самые большие замеры токов КЗ, что с большей вероятностью может привести к насыщению ТТ и последующему отказу быстродействующих ступеней резервных защит (ДЗ, ТЗНП, МФТО) [120]. Помимо этого при близких КЗ имеется вероятность отказа защит ДЗ из-за того, что напряжение поврежденной фазы в этом случае может снижаться до близких к нулю значений [121]. Безусловно, для предотвращения данного недостатка в ДЗ используется контур работы «по памяти», использующий для своей работы напряжение, предшествующее моменту возникновения КЗ. Однако проблемой данного органа является отсутствие гарантии срабатывания ДЗ, ведь, во-первых, напряжение предаварийного рабочего режима существенно отличается от режима КЗ, во-вторых, в случае использования замеров с линейного ТН в режиме опробования ВЛ предшествующий замер напряжения будет также равен нулю, в-третьих, в случаях защиты ВЛ малой протяжённости

до 2 км очень часто нельзя выбрать уставку первой ступени ДЗ с нулевой выдержкой времени из-за ограничения минимального диапазона уставки МП и электромеханических устройств РЗ. Из-за этого приходится выбирать уставки первых ступеней уже с выдержками времени, и по условиям как для второй ступени ДЗ или ТЗНП. При этом происходит полный отказ от использования МФТО. Так как главная задача резервных защит обеспечивать защиту линии в случае отказа или вывода основной защиты, применение первых ступеней с выдержкой времени порядка 0,5 с приведет замедлению устранения КЗ.

Рассмотрим пример, когда гарантированно отсутствует возможность выбора уставки МФТО для ЛЭП до 2 км, независимо от мощности системы, со стороны которой происходит подпитка места КЗ. МФТО должна обеспечивать чувствительность при КЗ в начале ВЛ с $K_{\text{ч}} \geq 1,2$, и отстроена от КЗ в конце ВЛ с $K_{\text{отс}} = 1,3$. Принимая удельное сопротивление ВЛ 0,4 Ом/км, а ток КЗ в точке эквивалентирования системы равным 40 кА по отключающей способности выключателя получаем систему (3.1).

$$\begin{cases} Z_{\text{С.макс}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл.КЗ}}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 40} \approx 1,66 \text{ Ом}; \\ I_{\text{КЗ.кон}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{\text{С.мин}} + Z_{\text{уд}} \cdot L)} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (1,66 + 0,4 \cdot 2)} \approx 27 \text{ кА}; \\ I_{\text{уст.МФТО.отс}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{КЗ.кон}} = 1,3 \cdot 27 = 35 \text{ кА}; \\ I_{\text{уст.МФТО.чувс}} = I_{\text{КЗ.кон}} / K_{\text{ч}} = 40 / 1,2 = 33,4 \text{ кА}. \end{cases} \quad (3.1)$$

По указанному выражению можно увидеть, что ток по требованию отстройки в 35 кА превышает тока при КЗ в начале ВЛ 33,4 кА. Следовательно, выбрав уставку по отстройки защита становится бесполезной и не обеспечивает даже базовую чувствительность. Зависимость возможности выбора уставки от протяженности линии и мощности системы представлено на рисунке 3.1.

В части ДЗ выбор уставок для коротких ЛЭП ограничен диапазоном регулирования и возможностью выставления минимальной уставки по техническим характеристикам. Так, в ЭПЗ-1636 минимальная уставка составляет 0,25 Ом для ТТ с вторичным током 5 А [48]. Для одноамперного ТТ уставка в 5 раз больше. Выбор уставки для ЛЭП 2 км представлен в (3.2).

$$Z_{\text{втор.уст}} = Z_{\text{перв}} \frac{K_{\text{ТТ}}}{K_{\text{ТН}}} = Z_{\text{перв}} \frac{2000/5}{1100} \approx 0,23 \text{ Ом} < 0,25 \text{ Ом}. \quad (3.2)$$

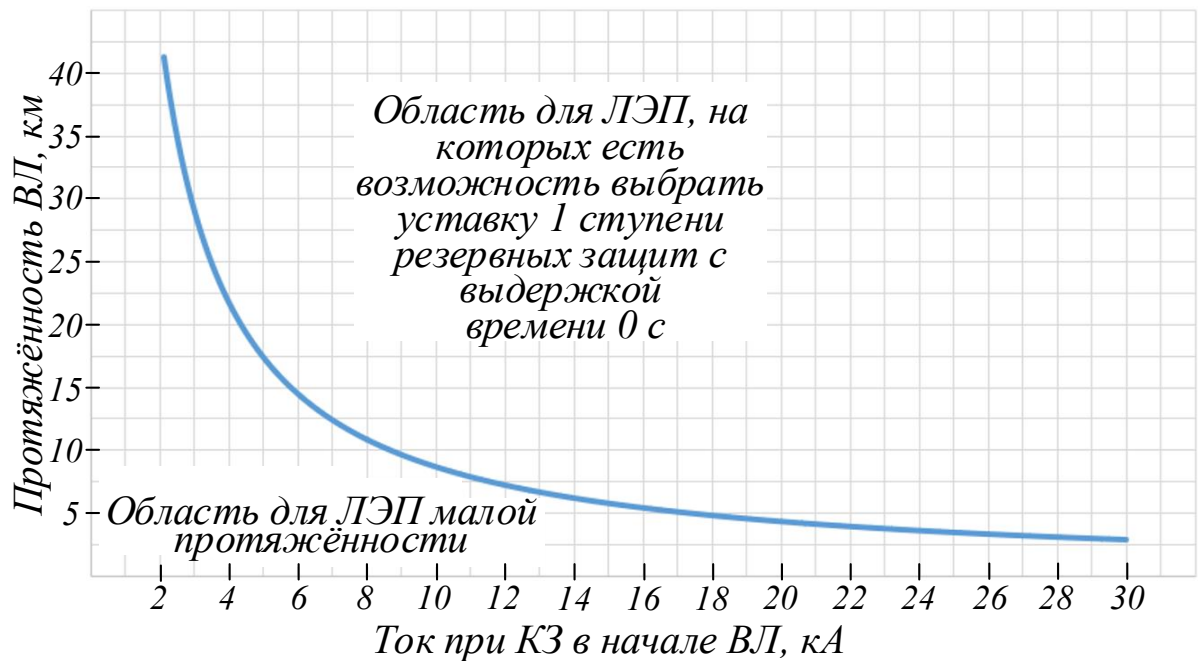


Рисунок 3.1 – Определение границы ЛЭП 110 кВ малой протяженности

В соответствии с формулой (3.3) можно увидеть, что ограничения по диапазону для первой ступени ДЗ также затрагивают и МП терминалы [122], уставка для которых задаётся относительно первичного тока и не зависит от вторичного тока ТТ. Для линий 2 км и номинальным напряжением 110 кВ граничным первичным током ТТ будет величина 1500 А.

$$Z_{\text{перв.уст.мин}} = \frac{1 \cdot K_{\text{ТН}}}{K_{\text{ТТ}}} = \frac{1100}{1500} = 0,73 \text{ Ом} > 0,64 \text{ Ом}. \quad (3.3)$$

Для ВЛ до 2 км гарантировано нет возможности выбора уставок ступенчатых защит с относительной селективностью с выдержкой времени 0 с независимо от их элементной базы. Однако для таких коротких линий есть возможность создание защиты иного типа, способной выявлять повреждения на ВЛ визуально через систему камерного типа.

Ещё одним недостатком защиты ДЗ при близких КЗ является наличие переходного сопротивления электрической дуги, способного изменить замер сопро-

тивления так, что он выйдет за пределы характеристики срабатывания первой ступени ДЗ [5, 53]. Одним из признаков неметаллического КЗ является наличие дуги, по которому имеется возможность выявить возникновение аварийного режима. Таким устройством, способным использовать иной принцип получения информации о режиме КЗ, является предлагаемое УСДЗ. Чаще всего на ВЛ встречаются именно дуговые виды КЗ (схлестывание проводов, замыкание на опору или фазу, грозовые перекрытия, падение деревьев и т.д.). Металлические КЗ бывают лишь в случае включение ВЛ на заземляющий нож или переносное заземление.

3.2 Описание аппаратной части устройства спектрально-дуговой защиты

УСДЗ представляет собой устройство защиты от КЗ, содержащее экран изолирующего корпуса, защитные створки, два датчика, где первый датчик представляет собой оптический датчик в виде объектива для мониторинга дуги с интерференционным узкополосным светофильтром, работающим в световом спектре, который соответствует спектральному излучению при горении ионов алюминия при КЗ на сталеалюминиевых проводах, второй датчик представляет собой ДМП с таймером задержки на отпадание, отличающийся тем, что в устройстве содержится объектив выявления светового сигнала, спектральный диапазон которого соответствует дуговой вспышке, устройство выполнено с возможностью установки непосредственно на опорах линии электропередачи и/или рядом с опорой линии электропередачи.

Область применения УСДЗ – электроэнергетика, а именно выполнение защиты от КЗ на ЛЭП. УСДЗ состоит из двух основных частей: оптического датчика фиксирования наличия дуги и ДМП, реагирующего на изменение магнитного поля при возникновении КЗ. Датчик УСДЗ реагирует на электрическую дугу в виде плазмы, содержащую в своем составе одновалентные ионы алюминия, при возникновении неметаллического КЗ.

Дуга излучает свет в определенном спектральном диапазоне, отсеиваемом посредством применения интерференционного узкополосного светофильтра. Как показывают исследования, горение частиц алюминия, из которого выполнены

провода большинства ЛЭП, характеризуется индивидуальным диапазоном светового излучения, длина волны которого (приблизительно от 460 нм до 530 нм) [123, 124, 125] отлична от длины волны, например, вспышки молнии (от 777,19 нм до 777,54 нм) [126, 127].

Помимо наличия дуги УСДЗ также должно реагировать на изменение электромагнитного поля, обусловленного изменением величины тока ΔI при КЗ. Оценка именно изменения поля, а не сравнение протекающего по проводнику тока с определённым минимальным пороговым значением, является более приемлемым решением с точки зрения упрощения конструкции и логики работы устройства, а также повышения его надежности и уменьшения вероятности отказа или ложной работы, при этом действие ДМП должно выполняться с задержкой на возврат сигнала для возможности удержания сигнала на время, достаточное для срабатывания защиты. Благодаря использованию карт НМП, описанных в разделе 2.1, имеется возможность выбора места установки УСДЗ не только с точки зрения обеспечения оптической видимости защищаемых токоведущих частей, но и в точке получения максимального замера НМП. Одним из преимуществ линий малой протяженности для органа по приращению НМП является тот факт, что на таких ВЛ, как правило, наблюдаются большие величины токов КЗ, и данные токи будут тем больше, чем больше номинальное напряжение ВЛ.

Так как устройство устанавливается рядом с первыми опорами ЛЭП, имеется возможность принимать сигнал о срабатывании устройств и выдачи ими отключающего воздействия через кабельную связь от главного щита управления до самого устройства. Предлагаемое устройство путём гальванической развязки через оптический мониторинг позволяет полностью нейтрализовать влияние на работу защиты посредников между первичной и вторичной сетью в виде ТТ и ТН, отказ или неправильная работа которых может повлиять на работу защит традиционного принципа действия.

Так как по своему принципу действия зона действия каждого устройства будет ограничена его «зоной видимости», то очевидно, что защита не сможет выполнять функции дальнего резервирования и будет действовать в зоне

защищаемого объекта. Следовательно, орган, реагирующий на изменение величины поля, может быть загрублён до уровня отсутствия работы в нормальном режиме, сопровождающемся небольшим изменением тока в первичной сети из-за подключения или отключения нагрузки.

Одним из ограничивающих факторов, заложенных в принцип действия защиты, является отсутствие срабатывания при металлических КЗ с наличием повреждения на линии, например, при включении ЛЭП на заземляющий нож без образования дуги, на которую реагирует УСДЗ. Согласно определению приказа Минэнерго №101 под основной защитой понимается такая защита, работающая в ограниченной области защищаемого объекта, обеспечивающая абсолютную селективность, реагирующая на все виды КЗ, а также являющаяся быстродействующей с минимально возможным временем срабатывания. Защита соответствует требованию быстродействия, так как для неё можно задать нулевую выдержку времени на срабатывание.

Для УСДЗ также существуют угроза в части электромагнитной совместимости ввиду того, что устройство, содержащее МП элементы, будет находиться под влиянием высоковольтного поля от первичной сети. Для решения этой задачи предлагается разделение функций внутри устройства на два блока: первый блок – это блок оптического мониторинга дуги, который выполняется на МП базе и находится под защитой металлической оболочки (экрана) с требуемым уровнем по электромагнитной совместимости. Второй блок, в который входит датчик измерения изменения поля, находится вне экрана для возможности максимально точно измерять контролируемые сигналы.

3.3 Описание принципа работы устройства спектрально-дуговой защиты

УСДЗ ЛЭП относится к области электроэнергетики в части устройств РЗ от КЗ. Известными аналогами устройства являются следующие патенты:

RU 2446534 – Устройство для защиты от коротких замыканий в «мертвой зоне» открытых распределительных устройств объектов энергетики, техническим

решением устройства является полная защита «мертвой зоны» посредством использования дуговой защиты, оптического тракта и дифференциальной схемы исполнительных элементов с оптико-электронными трансформаторами тока [7].

RU 2419941 – Датчик электрической дуги, техническим решением устройства является максимальный охват зоны его видимости через изменение структуры выгиба фиксирующей оптической линзы.

RU 2419941 – Совмещенный датчик электрической дуги, техническим решением устройства является повышение отношения сигнал/помеха по отношению к световым воздействиям искусственного и естественного происхождения дугового датчика.

RU 2024148 – Устройство дуговой защиты с определением местоположения и мощности электрической дуги.

RU 201607 – Устройство защиты от дуговых замыканий, в котором реализована повышенная скорость выявления и ликвидации дуговых КЗ.

Прототипом устройства является изобретение «Устройство для защиты от коротких замыканий в «мертвой зоне» открытых распределительных устройств объектов энергетики» RU 2446534. Сходства заключаются в том, что прототип также устанавливается на открытом воздухе, имеет оптические датчики, датчики тока и осуществляет защиту силового электрического оборудования (рисунок 3.2). На данном рисунке показано: 1 - Участок ошиновки на ОРУ ВН, 2 - ТТ, 3 - Выключатель, 4 - Заземляющий нож, 5 - Локальный модуль РЗ мертвой зоны, 6 - Цепь заземления заземляющего ножа, 7 - Источник поляризованного света, 8 - Высоковольтный световод, 9 - первый фарадеевский вращатель плоскости поляризации, 10 - Оптический тракт, 11 - второй фарадеевский вращатель плоскости поляризации, 12 - Блок токовой дифзащиты, 13 - Блок формирования команд и блокирующих сигналов, 14 - Блок дуговой защиты, 15 - Центральный модуль, 16 - Оптическая сеть, 17 - Блок токовой защиты.

Главным отличием от прототипа является реализация технического результата. В отличие от прототипа предлагаемое УСДЗ ЛЭП может быть

применимо не только для защиты «мертвой зоны» между ТТ и выключателем от всех видов дуговых КЗ, но и для осуществления защиты начального участка ЛЭП.

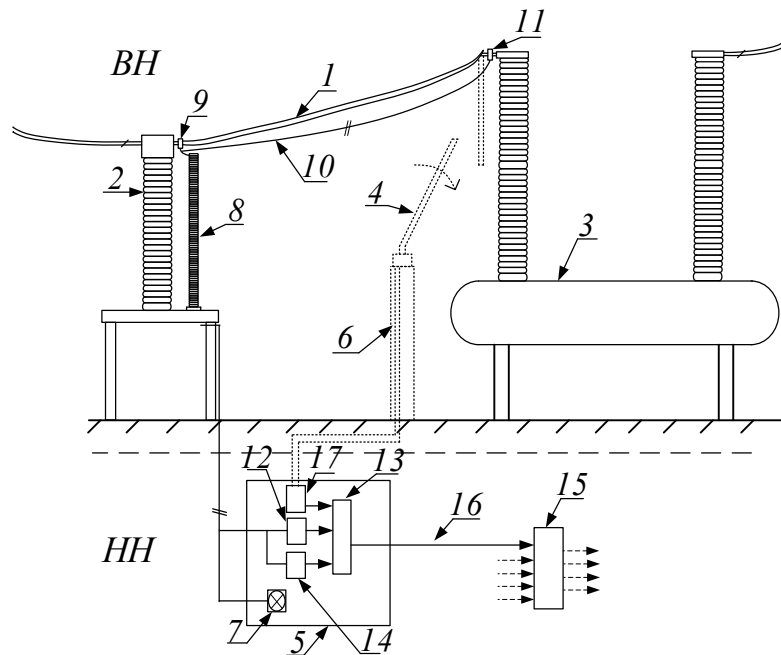


Рисунок 3.2 – Устройство для защиты от КЗ в «мертвой зоне» на ОРУ

Применение УСЗД для защиты ЛЭП позволяет решить техническую проблему неправильной работы традиционных РЗ вследствие наличия дуги с переходным сопротивлением, а также при неисправностях цепей напряжения и при возникновении критической погрешности измерения тока ТТ из-за переходных процессов, так как УСДЗ использует оптический принцип мониторинга наличия повреждений, а не электрический. Все вышеуказанные аналоги позволяют решить данную проблему только с применением замеров от ТТ.

На рисунке 3.3 показано УСДЗ, где 1 - антенна ДМП, 2 - защитные створки, 3 - интерференционный узкополосный светофильтр, 4 - объектив мониторинга дуги, 5 - экран изолирующего корпуса.

На рисунке 3.4 показано размещение УСДЗ на ЛЭП, где 6 - опора ЛЭП, 7 - УСДЗ, 8 - провод ЛЭП, 9 - радиус обзора УСДЗ, 10 - действие крайних УСДЗ на

выключатель на ПС, 11 - действие фотодатчика УСЗД, 12 - действие датчика поля УСЗД.

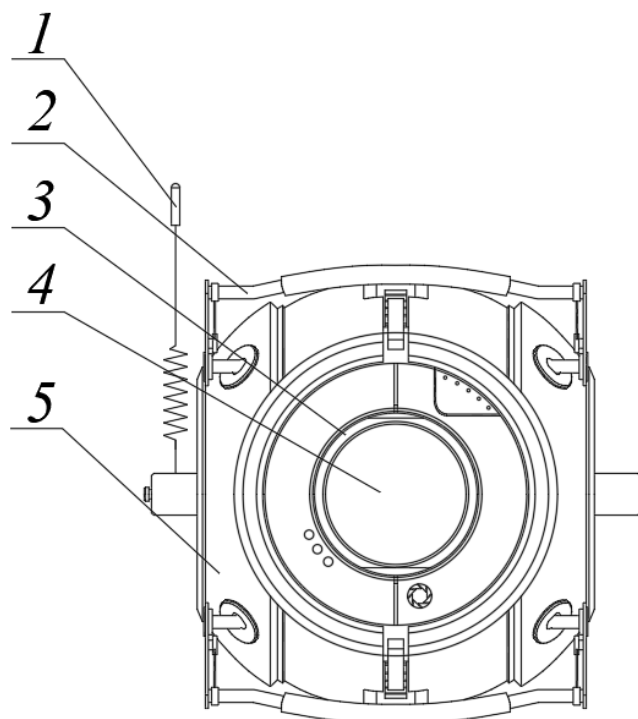


Рисунок 3.3 – Внешний вид совокупности элементов УСДЗ

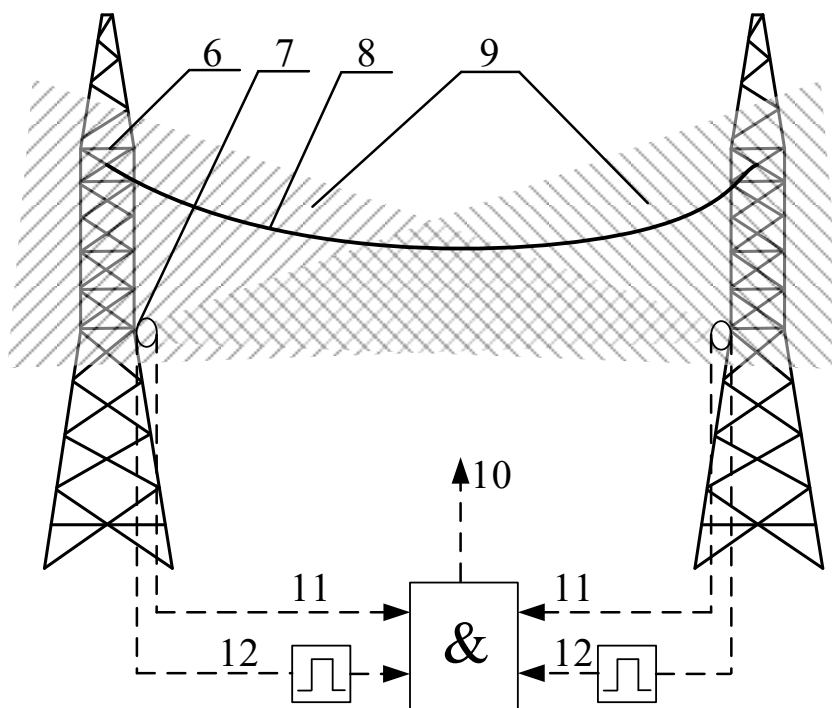


Рисунок 3.4 – Размещение УСЗД на ЛЭП и области её видимости

УСДЗ выполнено в виде единого устройства, находящегося в целостном изолирующем корпусе (п. 5), в котором одновременно осуществляются мониторинг входных воздействий от вспышки электрической дуги. Датчик реагирует на электрическую дугу через объектив мониторинга дуги (п. 4) при её попадании в зону видимости защиты (п. 9). Электрическая дуга представляет собой плазму, в которой содержатся ионы алюминия при КЗ на сталеалюминиевых проводах ЛЭП и которая излучает свет в определенном спектральном диапазоне, отсеиваемом посредством применения интерференционного узкополосного светофильтра (п. 3).

Защита осуществляет мониторинг электрических процессов в сети, выраженных в виде изменения величины электромагнитного поля, и запоминание данных процессов посредством внедрения таймера с задержкой на отпадание. Сигнал приходит через антенну датчика поля (п. 1) на специальный преобразователь. Защитные створки устройства (п. 2) позволяют ограничить зону видимости защиты вниз и вверх для предотвращения влияния на устройство лишних световых воздействий.

УСДЗ (п. 7) устанавливается на опоре ЛЭП (п. 6) или рядом с опорой так, чтобы защищаемый токоведущий участок ВЛ находился в радиусе обзора устройства (п. 8). При возникновении КЗ в зоне видимости устройства происходит выполнение двух условий в виде срабатывания фотодатчика УСЗД (п. 11) и срабатывания датчика поля УСЗД (п. 12).

Выходное воздействие устройством выполняется после удовлетворения требований получения входных сигналов (наличие дуги и изменение НМП) и производится непосредственно в цепи управления выключателя с командой на отключение (п.10). Сигнал на отключение будет выдан, только если произошло одновременное срабатывание с разных сторон двух устройств, направленных в сторону защищаемого участка ЛЭП. Это позволит ограничить зону действия защиты и обеспечить её селективную работу, так как в случае возникновения КЗ «за спиной» одного из устройств произойдет срабатывание только того устройства, в область видимости которого попала вспышка электрической дуги.

Так как второе устройство не увидит данную вспышку, то и сигнала на отключение от него подано не будет.

Осуществление устройства может быть произведено при комбинировании в едином корпусе элементов, представленных на рисунке 3.3. В качестве датчика поля может быть использован датчик Холла SU580530A1, в качестве датчика мониторинга дуги может быть использован оптический датчик RU 2155389, в качестве объектива мониторинга дуги может быть использован прожектор с линзой Френеля RU 2155389. В качестве спектрального фильтра может быть использован коротковолновый отрезающий фильтр для инфракрасной области спектра SU 1154629. Следовательно, наличие вышеуказанных компонентов устройства позволяет говорить о возможности его реализации.

3.4 Область применения устройства спектрально-дуговой защиты

Так как зона действия защиты с абсолютной селективностью на основе измерений, получаемых от ДМП, ограничивается первыми начальными опорами ВЛ, и появляется «мертвая зона» для данной защиты от портала начала ВЛ до первой опоры, становится актуальной задача обеспечения защиты данного участка. Эту задачу становится возможным решить с применением УСДЗ. К тому же так как УСДЗ будет защищать начало ВЛ, то снижается вероятность отказа РЗ из-за насыщения ТТ, так как известно, что чем ближе место КЗ к началу ЛЭП, тем больше сами величины токов КЗ, а чем больше токи, тем больше вероятность перехода ТТ в режим насыщения при прочих равных условиях. К тому же если ЛЭП имеет малую протяжённость (до 2 км), то реализация данной защиты на УСДЗ способна обеспечить защиту существенной части самой ВЛ в процентах от её протяжённости [128].

Для создания ограниченной зоны действия защиты предлагается размещение устройств УСДЗ сонаправлено в как можно дальнем диапазоне от каждой из ПС. В самом идеальном случае для линий малой протяжённости будет реализация защиты по всей её длине. Этого можно добиться, если расстояния на

такое расстояние имеется возможность проложить провод под ВЛ до каждого устройства для того, чтобы обеспечить их питание и собирать информацию о их состоянии, проверки работоспособности и диагностики, а также получения от них сигнала на срабатывание и отключения выключателя. В данной работе в целях надежности предлагаются расстояния от 100 до 200 м от каждой из ПС на ближайших опорах, что для линии 2 км будет составлять порядка 5-10% от её длины, тем самым защита будет имитировать действие отсутствующей МФТО (рисунок. 3.5), уставку которой нельзя выбрать на таких коротких ВЛ. В случае возможности создания бесконтактного и надежного канала связи, а также способа бесперебойного и беспроводного питания защиту по типу УСДЗ можно будет устанавливать на линиях любой протяженности без ограничений по их длине.

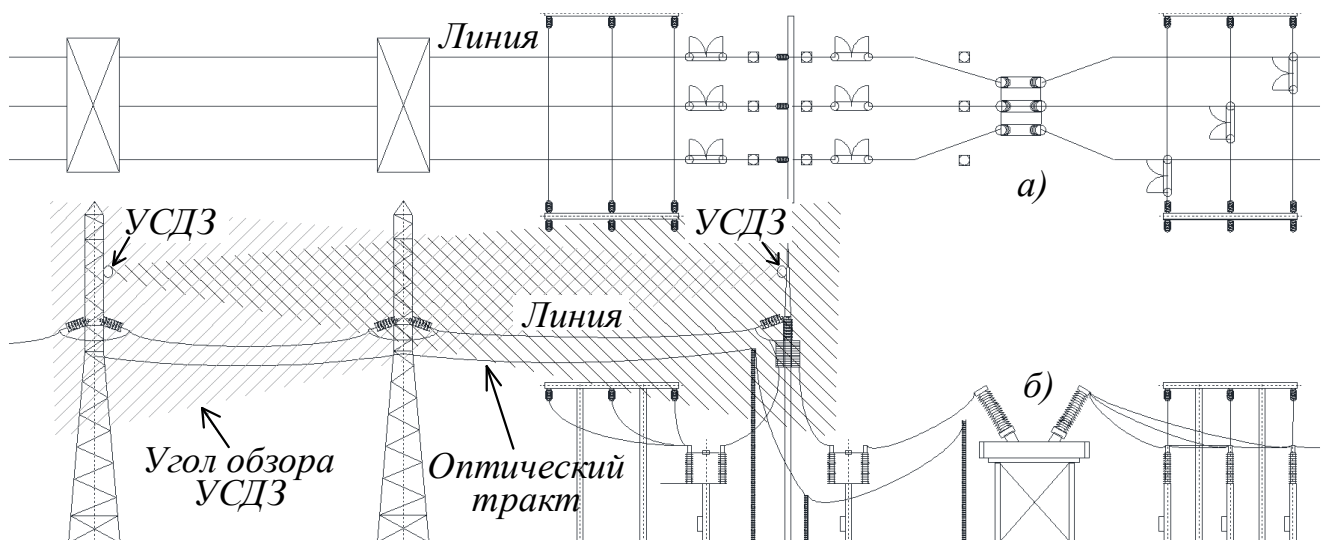


Рисунок 3.5 Реализация защиты начального участка ВЛ с использованием УСДЗ.

а) Начало ЛЭП вид сверху; б) Начало ЛЭП в разрезе

Принципы реализации защиты «мертвой зоны» могут быть применены для решения вышеуказанной задачи в защите начального участка. Дополнительное ограничение зоны действия может быть реализовано применением оптического тракта, используемого в устройстве [7]. Оптический тракт будет реагировать на появление вспышки света рядом с токоведущими частями, и являться дополнительным условием фиксации наличия дугового КЗ. Такой тракт является

представляет собой непрерывную линию и обладает большей чувствительностью, при этом при его установке и размещении на опоре ЛЭП также нужно выполнить два условия: расположить тракт как можно ближе к фазным проводникам и при этом соблюсти требования по безопасному расстоянию.

Выводы по третьей главе

Определено, что линий малой протяженности до 2 км нет возможности выбрать уставки ступенчатых защит с нулевой выдержкой времени. Для устранения недостатка ДЗ из-за переходного сопротивления при дуговых КЗ и для обеспечения защиты начального участка ВЛ предложен и описан вариант реализации УСДЗ, обеспечивающего мониторинг начального участка ЛЭП от первого портала ЛЭП на ПС до первых опор начала ЛЭП, охватывающего своим углом обзора защищаемые токоведущие части и реагирующего на появление электрической дуги в определенном спектральном диапазоне, обоснованном наличием в дуге ионов алюминия при неметаллическом КЗ на сталеалюминиевых проводах ЛЭП. При этом для предотвращения ложной работы в устройстве предусмотрен светофильтр, отстроенный от солнечного света и вспышек молнии, также предусмотрен встроенный ДМП, реагирующий на изменения величины магнитного поля в случае возникновения КЗ. Рассмотрена реализация аппаратной и функциональной части устройства, а также область его применения. Реализация защиты по оптическому принципу с применением УСДЗ и оптического тракта на начальном участке ВЛ позволит выполнить дополнительное резервирование и отключение дуговых КЗ с нулевой выдержкой времени коротких ЛЭП, где нет возможности выбрать уставки первых ступеней для ступенчатых защит с относительной селективностью. Так как используется иной принцип, то защита не подвержена проблемам, связанным с насыщением ТТ, не зависит от цепей напряжения. Защита позволяет имитировать зону действия МФТО и производить отключения при близких 3-ф КЗ в случае отказа ДЗ.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ СПОСОБОВ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

4.1 Верификация замеров напряжённости магнитного поля для разработки рекомендаций по применению к защите с абсолютной селективностью на датчиках магнитного поля

4.1.1 Результаты измерений напряжённости магнитного поля, создаваемого физической моделью двухцепной линии электропередачи

Для подтверждения параметров НМП, полученных по расчетным моделям, необходимо произвести проверку замеров на физической модели двухцепной ЛЭП. Физическая модель представляет собой уменьшенную в 10 раз копию пролёта двухцепной ЛЭП с опорами ПС-35-2, представленную на рисунке 4.1. Натурные измерения производились с помощью устройств для измерения модуля среднеквадратичного значения НМП.



Рисунок 4.1 Стенд уменьшенной модели двухцепной ЛЭП

Для измерения однокоординатным датчиком отдельных вертикальных $\dot{H}_x$ и горизонтальных $\dot{H}_y$ составляющих магнитного поля применялся измеритель магнитного поля ИНПМ-3, представленный на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 Измеритель напряжённости магнитного поля ИНПМ-3

В качестве трёхкоординатного датчика использовалось устройство ПЗ-70/1 [129], представленное на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 Трёхкоординатный прибор для измерения магнитного поля
ПЗ-70/1

В качестве источника переменного тока использовалось устройство РЕТОМ-61 [130], позволяющее производить выдачу и измерение действующего значения, угла и частоты переменного тока одновременно и независимо для шести токовых проводников.

Одним из ограничений при проведении измерений является то, что вышеуказанные устройства способны производить измерение только модуля среднеквадратичного значения величины переменного магнитного поля. Следовательно, осуществить замер результирующего значения, которое складывается из совокупности векторных замеров в начале и в конце ЛЭП, не представляется возможным, однако можно выполнить замеры в различных точках пространства по отдельности, моделируя картины магнитного поля по концам ВЛ в случае, когда токи протекают сонаправленно и противоположно направленно на каждой из ЛЭП. Можно сказать, что будут проверяться модули составляющих формул (2.28) для бокового ДМП_Б $\dot{H}_{Х.Б.Н}$, $\dot{H}_{У.Б.Н}$, $\dot{H}_{ХУ.Б.Н}$, $\dot{H}_{Х.Б.К}$, $\dot{H}_{У.Б.К}$, $\dot{H}_{ХУ.Б.К}$ и для среднего ДМП_{СР} $\dot{H}_{Х.СР.Н}$, $\dot{H}_{У.СР.Н}$, $\dot{H}_{ХУ.СР.Н}$, $\dot{H}_{Х.СР.К}$, $\dot{H}_{У.СР.К}$, $\dot{H}_{ХУ.СР.К}$ по формуле (2.29) при трёхфазных и двухфазных КЗ. Ток трёхфазного КЗ составляет 5 А. Координаты размещения бокового ДМП_Б по осям x и y в метрах – (-0,52; 0,78), среднего ДМП_{СР} – (0; 0,78). Результаты измерений показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты замеров среднеквадратичного значения НМП двухцепной ЛЭП на физической и расчетной моделях.

	$\dot{H}_{Х.Б.Н, АВС}$	$\dot{H}_{У.Б.Н, АВС}$	$\dot{H}_{ХУ.Б.Н, АВС}$	$\dot{H}_{Х.Б.Н, АВ}$	$\dot{H}_{У.Б.Н, АВ}$	$\dot{H}_{ХУ.Б.Н, АВ}$
Замеры с модели, А/м	0,65	2,36	2,46	0,65	1,80	1,92
Замеры со стенда, А/м	0,60	2,30	2,31	0,60	1,80	1,82
Погрешность %	7,69	2,54	6,19	7,69	0,00	5,09
	$\dot{H}_{Х.СР.Н, АВС}$	$\dot{H}_{У.СР.Н, АВС}$	$\dot{H}_{ХУ.СР.Н, АВС}$	$\dot{H}_{Х.СР.Н, АВ}$	$\dot{H}_{У.СР.Н, АВ}$	$\dot{H}_{ХУ.СР.Н, АВ}$
Замеры с модели, А/м	1,66	0,00	1,66	1,15	0,00	1,15
Замеры со стенда, А/м	1,60	0,00	1,80	1,20	0,00	1,25
Погрешность %	3,61	0,00	-7,70	-4,17	0,00	-7,95

Для однокоординатного устройства ИНПМ-3 замеры проводились при частоте переменного тока 57 Гц, так как прибор предназначен для работы именно на этой частоте. Однако поскольку производились итоговые измерения именно модуля среднеквадратичного значения магнитного поля, то данное условие не оказывает никакого влияния на погрешность измерений. Измерение одной из ортогональных составляющих магнитного поля посредством прибора ИНПМ-3 представлено на рисунке 4.4.

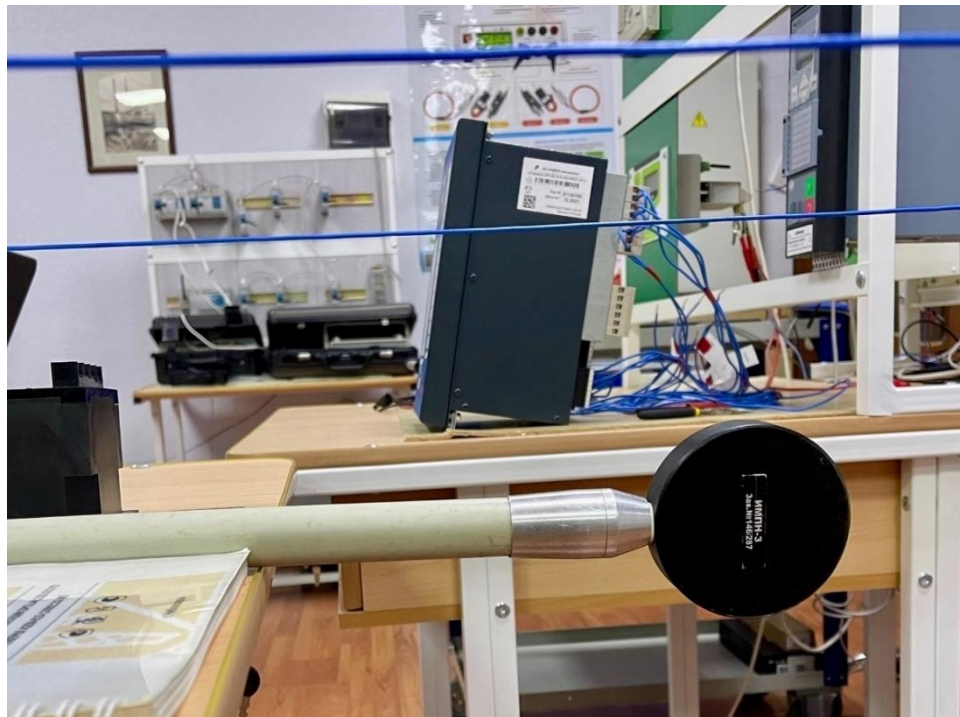


Рисунок 4.4 Проведение измерений одной из ортогональных составляющих НМП

По результатам полученных измерений и их сравнения определено, что расхождение результатов измерения с расчётами на модели ЛЭП не превышает 10%, что подходит под требования для устройств РЗ.

4.1.2 Рекомендации по выбору уставок и проверки защиты с абсолютной селективностью на датчиках магнитного поля

Выбор уставки устройств РЗ определяется тремя основными условиями: обеспечением чувствительности, обеспечением отстройки и обеспечением

согласования. Для защиты с абсолютной селективностью зона действия ограничивается установкой ИО данной защиты, следовательно, условия согласования по величине уставки для неё не рассматриваются, и остаются только первые два условия. На примере традиционных защит ДЗЛ отстройка осуществляется от некоторой величины тока небаланса, обусловленной погрешностью измерений в нагрузочных режимах и при внешних КЗ [131]. Ток небаланса обусловлен неоднотипностью ТТ и погрешностями измерений ТТ в случае их насыщения. Так, в соответствии с рекомендациями по расчету уставок ДЗЛ ООО НПП «ЭКРА» [122] при внешних КЗ ток небаланса обусловлен коэффициентами искажения формы токов K_S и искажением измеряемого угла между токами по разным сторонам ВЛ $\Delta\varphi_S$ при насыщении по формуле (4.1).

$$I_{НБ.КЗ.ВНЕШ.МАКС} = I_{КЗ.ВНЕШ.МАКС} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{K_S} \cdot \left(\frac{1}{K_S} - 2 \cdot \cos(\Delta\varphi_S) \right)} \quad (4.1)$$

В случаях, если искажения тока при насыщении наблюдаться не будет и величина $K_S = 1$, а $\Delta\varphi_S = 0$, тогда ток небаланса при внешних КЗ будет равняться нулю независимо от величины тока КЗ.

Отстройка от небаланса при нагрузочных режимах осуществляется по условию (4.2).

$$I_{НБ.РАБ} = (2 \cdot \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_{изм} + \delta_{КС}) \cdot I_{РАБ.МАКС} \quad (4.2)$$

где $I_{РАБ.МАКС}$ – максимально возможная величина рабочего тока, протекающего через защищаемую ВЛ, ε – погрешность ТТ в режиме нагрузки, $\varepsilon_{изм}$ – погрешность внутренних измерений терминалов для каждого полукompлекта ДЗЛ, $\delta_{КС}$ – небаланс, вызванный асимметрией мультиплексированного канала связи. Из рассматриваемых причин погрешностей только ε определяется погрешностью самого ТТ. Величина коэффициента отстройки от небаланса варьируется в диапазоне от 1,5 до 2. Для защиты с абсолютной селективностью на ДМП $K_{отс}$ может быть принято равным 2 для обеспечения бóльшего запаса.

В соответствии с регламентом п. 16 приказа Минэнерго № 546 [46], чувствительность основной защиты линий определяется базовым коэффициентом,

равным 2. Достаточным условием обеспечения надежности работы устройства РЗ является превышение минимального замера НМП при КЗ в зоне над максимальным небалансом при внешнем КЗ при соотношении равным 4 (в котором учитывается $K_{отс} \times K_{ч}$). В разделе работы 2.6.4 это требование рассматривалось при прочих равных условиях без учета режимов, где учитываются наиболее худшие схемные и режимные условия. Фактически при расчете уставок РЗ необходимо анализировать следующее: При КЗ в зоне защиты – худший случай: КЗ в конце защищаемой ВЛ при минимальном сопротивлении системы. При внешнем – КЗ в начале параллельной линии при работе системы в максимальном режиме.

Сопротивление системы в максимальном режиме может быть смоделировано через максимальный ток отключения. В соответствии с [132] максимальный ток отключения $I_{откл.КЗ}$ выключателей на номинальное напряжение $U_{ном}$ 35 кВ составляет 40 кА. Тогда сопротивление системы $Z_{С.макс}$ будет определяться по формуле (4.3).

$$Z_{С.макс} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{откл.КЗ}} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 40} \approx 0,51 \text{ Ом.} \quad (4.3)$$

Принято, что в минимальном режиме работы системы токи при КЗ в начале ВЛ уменьшатся в 10 раз и будут составлять 4 кА. Тогда ток КЗ в конце ВЛ при усреднённом погонном сопротивлении ВЛ 0,4 Ом/км и с учётом того, что максимальная протяженность ВЛ 35 кВ составляет не более 30 км по условию обеспечения устойчивости потребителей по напряжению [133], будет определяться по (4.4). Полученные токи будут справедливы для режима трёхфазного КЗ.

$$I_{КЗ.мин} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{С.мин} + Z_{уд} \cdot L)} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (5,1 + 0,4 \cdot 30)} \approx 1185 \text{ А.} \quad (4.4)$$

Тогда замеры при выбранных оптимальных точках размещения ДМП по разделу 2.6.4 будут скорректированы с учетом максимально возможных токов при КЗ на смежной параллельной ЛЭП и с учетом наименьших токов при внешних КЗ. Результаты указаны в таблице 4.2. Замеры и моделирование режимов производилось по расчетной модели, реализованной в MATLAB.

Таблица 4.2 – Величины НМП при внешнем КЗ и КЗ в зоне действия защиты для ортогональных составляющих НМП $\dot{H}_X$ и $\dot{H}_Y$.

	$\dot{H}_X$		$\dot{H}_Y$		$\dot{H}_X$		$\dot{H}_Y$	
	В зоне	Внеш	В зоне	Внеш	В зоне	Внеш	В зоне	Внеш
у.ДМП _Б , м	10,58		15,30		7,03			
у.ДМП _{СР} , м	7,96		4,34		5,14			
х.ДМП _Б , м	-3,94		-4,29		-3,54			
K	-1,277		1,045		-0,161		-1,280	
Отношение	59		221		$2,02 \cdot 10^4$		115	
$\dot{H}_{abc}$, А/м	181,4	1,49	97,3	0,44	79,00	$2,9 \cdot 10^{-5}$	125,7	0,09
$\dot{H}_{ab}$, А/м	181,4	1,13	48,5	0,35	53,2	$1,2 \cdot 10^{-3}$	103,3	0,07
$\dot{H}_{bc}$, А/м	93,4	1,41	48,8	0,40	23,9	$1,1 \cdot 10^{-3}$	10,4	0,08
$\dot{H}_{ca}$, А/м	88,0	0,27	97,3	0,05	77,2	$4,8 \cdot 10^{-4}$	113,7	0,02

Наименьшее отношение минимального результирующего замера НМП при КЗ в зоне к максимальному при внешнем КЗ получено в первом столбце таблицы 4.2. Если выбирать уставку по условию обеспечения требуемой чувствительности с $K_\chi = 2$, то по минимальному из результирующих замеров она будет составлять $88/2=44$ А/м. При этом выбранная по условию чувствительности уставка в десятки раз отстроена от максимального замера при внешнем КЗ на параллельной ВЛ ($1,49 \cdot 2 \approx 3$ А/м).

В части отстройки от тока ёмкостного тока при опробовании ВЛ. Удельная величина ёмкостного тока прямой последовательности $I_{c,yd}$ (А/км) определяется по [113] для ВЛ 110 кВ 0,17 А/км, а для ВЛ 220 кВ 0,34 А/км. При токе КЗ в 1000 А, по аналогии с трёхфазным КЗ на своей ВЛ замер НМП составляет 181,4 А/м, выбранная уставка 44 А/м (где $181,4/44=4,11$) Тогда величина ёмкостного тока для срабатывания защиты будет составлять $1000/4,11 \approx 240$ А. Для линий 220 кВ с учётом указанной величины удельного тока для достижения ёмкостного тока в 100 А протяжённость ВЛ должна составлять примерно 270 км. Для линий меньшего класса напряжения допустимые расстояния будут ещё больше. В целом, можно гарантированного утвердить, что для защиты с абсолютной селективностью на ДМП удастся выбрать уставку по условию отстройки от ёмкостного тока для линий протяжённостью менее 100 км.

Проверка уставок, выставленных в терминал РЗ. Как уже было указано ранее, ЭДС на выходе ДМП прямо пропорциональна изменению поля $\dot{E} = \gamma \dot{H}$. В случае если γ коэффициент чувствительности ДМП равен 0,01, ЭДС на выходе будет пропорционально величине магнитного поля (например, 10 В $\equiv$ 1000 А/м), что удобно для проверки защит. Диапазон выдачи уставок может изменяться от 0,1 В до 10 В. Например устройство РЕТОМ-61 способно выдавать подобные сигналы с соответствующим шагом (диапазон изменения по напряжению от 0,03 В до 135 В, шаг 0,01 В) [134]. Следовательно, персонал будет подавать синусоидальный сигнал в виде напряжения и проверять терминал по аналогии с стандартной ДЗЛ, единственным отличием которой будет подача напряжения на вход, а не тока.

4.2 Разработка прототипа устройства релейной защиты с использованием атмосферной оптической линии связи

4.2.1 Оценка возможности применения атмосферной оптической линии связи для устройств релейной защиты

Помимо реализации бесконтактного способа получения информации об аварийном режиме для устройства РЗ, также существует бесконтактный способ передачи данных и обмена информацией между устройствами РЗ. Такой тип связи может быть реализован через АОЛС. Главным отличием АОЛС от используемых типов связи для РЗ в виде ВЧ каналов и ВОЛС является возможность беспроводной передачи данных. АОЛС использует для своей работы оптический способ передачи данных, где носителем информации является световой оптический сигнал через воздушную среду (атмосферу) в определённом ВЧ диапазоне частот. За рубежом для её описания используют аббревиатуру FSO (free-space optics) – оптика свободного пространства [135]. Источник сигнала также является его приёмником, способным воспринимать показания со смежного устройства в определенном, чаще всего инфракрасном, диапазоне излучения волн. (рисунок 4.5).

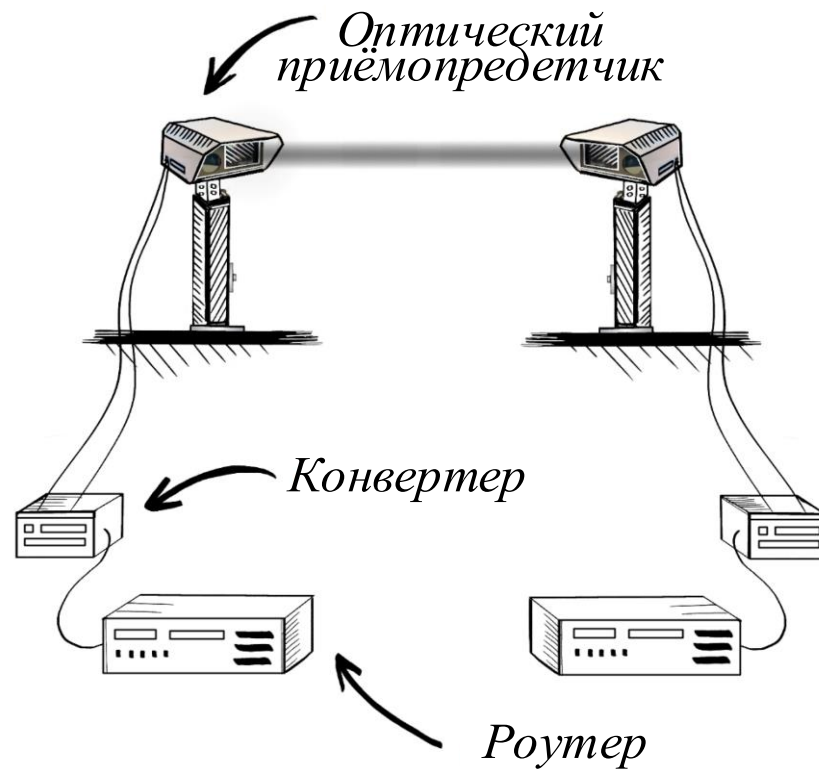


Рисунок 4.5 – Передача данных по АОЛС

Световой сигнал практически не подвержен дисперсионным искажениям фронтов, в отличие от ВОЛС, при этом не уступает оптоволокну в скорости передачи, которая может измеряться терабитами в секунду [136].

В соответствии с п. 16 и п. 17 приказа Минэнерго № 97 [66]:

1. Для передачи информации, обеспечивающей функционирование РЗ, должно предусматриваться применение наземных каналов связи.
2. Наземные каналы связи должны быть организованы в технологических сетях связи, создаваемых на базе систем передачи информации с использованием собственных и арендованных ВОЛС, включая ВОЛС по ЛЭП, кабельным линиям связи, радиорелейным линиям связи, высокочастотной связи по ЛЭП и по арендованным каналам связи в сетях операторов связи.

Следовательно, в качестве канала связи, помимо ВОЛС и ВЧ каналов, могут быть применены радиорелейные линии связи.

В соответствии с определением ГОСТ Р 53363-2009 [137]: Радиорелейная связь – наземная радиосвязь, основанная на ретрансляции радиосигналов на дециметровых и более коротких радиоволнах.

Условно все производимые системы АОЛС могут быть разделены на две группы. Одно окно размещено в диапазоне 780–850 нм, а другое использует длины волн 1520–1600 нм [138]. Перевести длины волны в частоту можно по известной формуле $f = v/\lambda$, где f – частота колебаний, v – скорость распространения волны, λ – длина волны. Принимая скорость распространения волны приближенно равной скорости света, получается, что рабочая частота сигналов с АОЛС находится в диапазонах 350–385 ТГц и 187–200 ТГц соответственно.

В соответствии с ГОСТ ИЕС 60050-713 – 2017 [139] номенклатура частотных полос и диапазонов длин волн, используемых в радиосвязи, приведена в таблице 4.3, начиная с 10 полосы.

Диапазон частот передачи данных через АОЛС подходит под определения радиорелейной линии связи, следовательно, подтверждается принципиальная возможность применения АОЛС в качестве канала связи для устройств РЗ.

Таблица 4.3 – Номенклатура частотных полос и частоты волн

Номер полосы	Сокращения	Диапазон частот
10	СВЧ	3—30 ГГц
11	КВЧ	30—300 ГГц
12	—	300—3000 ГГц
13	—	3—30 ТГц
14	—	30—300 ТГц
15	—	300—3000 ТГц

4.2.2 Анализ требований к каналам связи для устройств релейной защиты

Основные требования к каналам связи устройств РЗ регламентируются приказом № 97 Минэнерго [66], который предъявляет к ним два основных условия в соответствии с п. 18 и п. 19 в части продолжительности работы без потери передачи данных, а также отсутствия ошибок:

1. Коэффициент готовности одного канала связи для передачи сигналов и команд устройств РЗ, сетевой и противоаварийной автоматики должен быть не ниже 0,99 для периода его эксплуатации, равного одному календарному году.

2. Вероятность ложного действия аппаратуры для передачи сигналов и команд устройств РЗ должна составлять не более 10^{-6} , вероятность пропуска сигнала или команды не должна превышать 10^{-4} .

В вопросах исследования данных условий произведены работы, оценивающие безаварийную работу канала связи через АОЛС [140, 141, 142, 143].

В первой работе [140] использовалось оборудование «Artolink» модели M1 FE-2A-R с поддержкой технологии «двойного канала» и откалиброванное для работы в качестве резервного канала оборудование preWiMAX, выполненное на основе продукции НПО «Рапира». Современные единичные устройства АОЛС используют в своём составе резервные радиоканалы связи, основанные на технологии беспроводного широкополосного доступа для повышения надежности передачи данных. При использовании двух устройств АОЛС на каждом из объектов образуется 4 независимых канала связи.

Эксперимент проводился при размещении устройств на расстоянии 4,5 км. На пути следования луча были расположены заливные луга с двумя водоемами (в межсезонье там наблюдались туманы, а летом – восходящие тепловые потоки) и участок окружной дороги. С учетом использования резервного канала связи коэффициент готовности в наихудшем месяце составлял 0,997. Уровень величины ошибки изменялся в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-6} . По результатам измерения устройство удовлетворяет требованиям.

Во втором исследовании [141] применялось устройство ARTOLINK модели M1-GE-L. Коэффициент готовности АОЛС при уменьшении дальности с максимально заявленной 4,4 км до 3 км с учетом изменения диаграммы направленного действия с 0,1 до 0,3 и с учетом погодных факторов, характерных для средней полосы России, изменится незначительно. В данной работе резервный канал связи не использовался (рисунок 4.6).

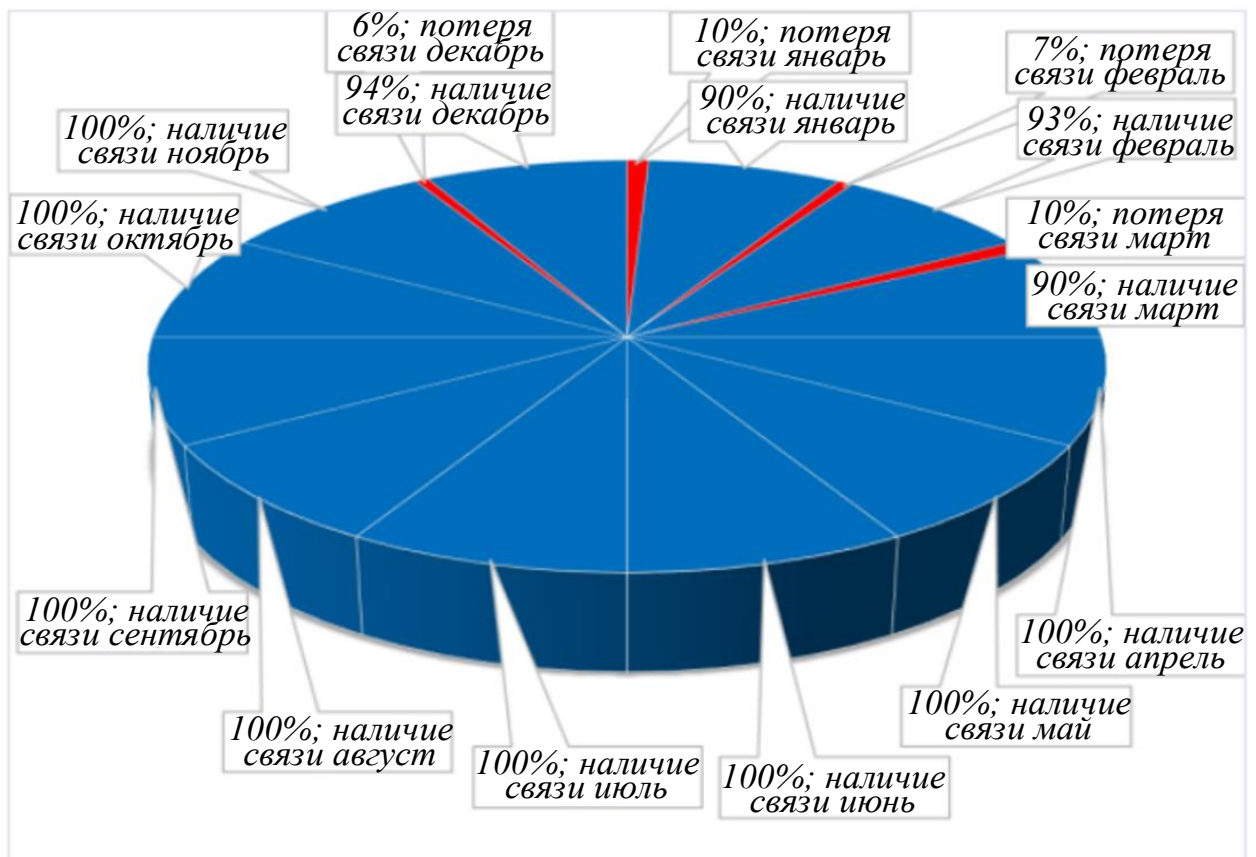


Рисунок 4.6 – Коэффициент готовности АОЛС в течении года по месяцам при диаграмме направленного действия 0,1 мрад

В работе [142] производился расчётный анализ коэффициента готовности различных устройств АОЛС российского (серия БОКС) и зарубежного (серия М1) производства. Результаты исследования представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Дистанция атмосферного канала с заданным коэффициентом готовности для оборудования российского производства

Тип интерфейса	Дальность измерения, м		
	$K_r = 0.999$	$K_r = 0.998$	$K_r = 0.997$
M1 FE-S	170	280	470
M1 GE-S	180	290	480
M1 FE-A	300	520	950
M1 FE-2R	310	550	1000
БОКС 100М-АС1	300	550	1000
БОКС 100М-АС2	500	900	1800

В четвертой работе [143] рассматривалось применение АОЛС для оборонного сектора военной промышленности. Если надёжность АОЛС для

гражданских нужд по результатам предыдущих исследований удовлетворяет предъявленным требованиям для каналов связи, то АОЛС, применяемая для военного назначения, должна превышать данные показатели, так как, например, при ошибке передачи данных может произойти ложный пуск снаряда военной техникой (рисунок 4.7). Рассматривались терминалы типа «КС-300», изготовленные ФГУП «НИИ ПП». По данным эксперимента коэффициент ошибок за весь период измерений находился в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-9} , что также удовлетворяет требованиям.

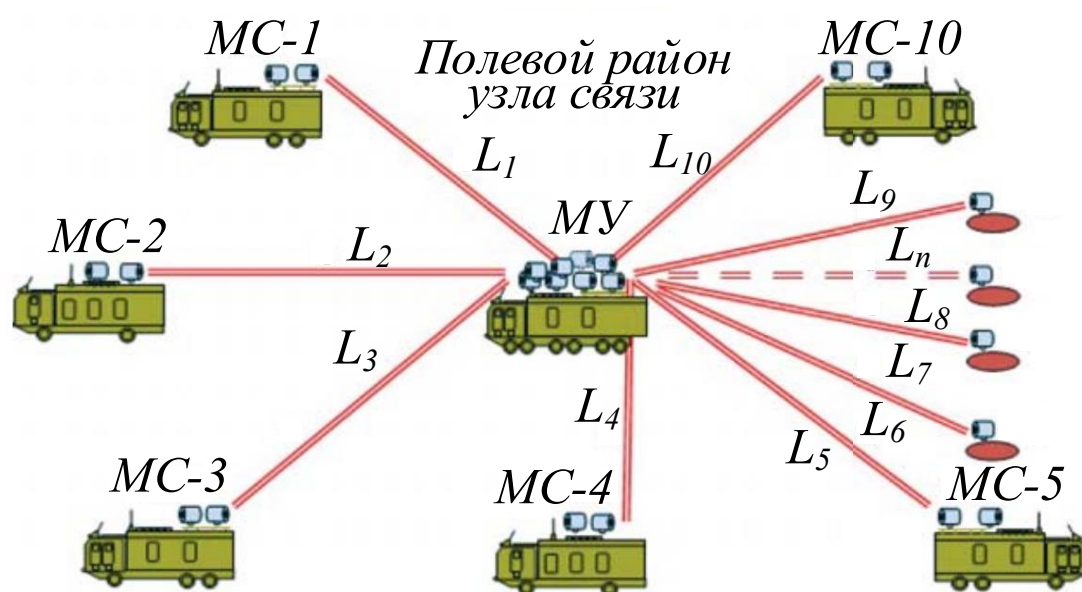


Рисунок 4.7 – Межагрегатная локально-информационная сеть на основе АОЛС с топологией «звезда»

Использование АОЛС может быть востребованным и финансово обоснованным в следующих ситуациях: для создания линии связи вдоль коротких ВЛ (до 3 км) в районах с благоприятными погодными условиями; как дополнительный канал связи при использовании ВОЛС, ведь если один из каналов проложен в грозозащитном тросе (рисунок 4.8), второй должен быть либо арендован, либо проложен под ВЛ, либо подвешен на ней. Подобное решение даёт возможность исключить необходимость копки траншей для прокладки второй ВОЛС.

Последствия отказа применения АОЛС на ВЛ малой протяжённости также нивелируются в связи с тем фактом, что уставки начального дифференциального тока ДЗЛ, как правило, отстроены от небаланса при обрыве токовых цепей ввиду того, что на данных ВЛ токи КЗ в минимальном режиме при опробовании многократно превышают токи нагрузки. В случае ошибки или отсутствия сигнала ложной работы РЗ не произойдет при нормальном нагрузочном режиме.

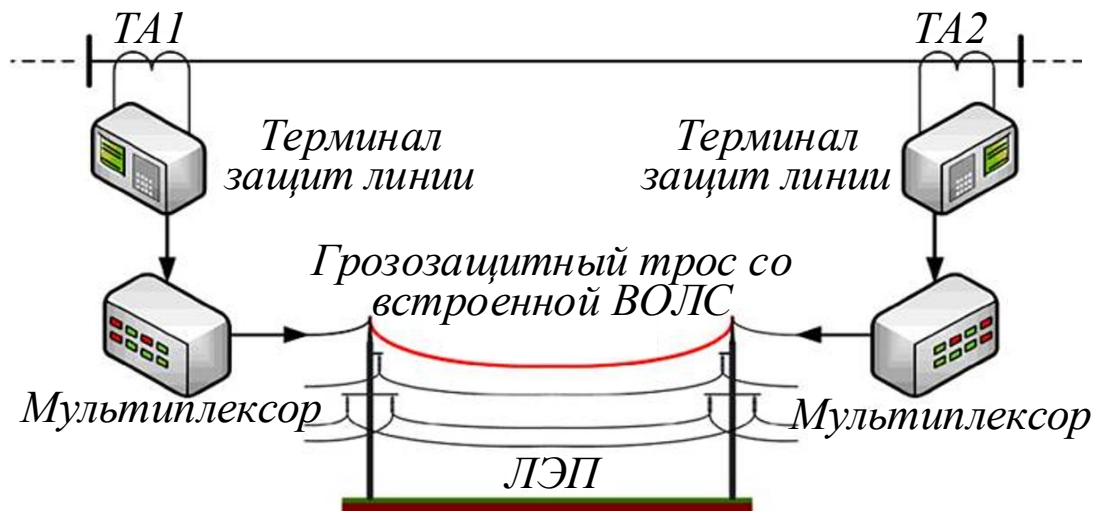


Рисунок 4.8 – Реализация ВОЛС в грозозащитном тросе ВЛ

4.2.3 Описание алгоритма прототипа устройства защиты

Как за рубежом, так и в России наблюдается интерес к использованию АОЛС или FSO для передачи данных в различных областях техники [144].

Следует учитывать, что эффективная дальность применения АОЛС в настоящее время ограничивается расстоянием 3 км в пределах прямой видимости при коэффициенте битовых ошибок 10^{-6} , что соответствует качеству беспроводной связи [145, 146]. Кроме того, дальность могут ограничивать погодные условия. Главной проблемой являются аэрозоли, находящиеся в воздухе во время густого тумана или снега. Поэтому при проектировании таких линий связи следует учитывать высоту установки приемо-передающего оборудования, ориентируясь на отметки, где плотность тумана меньше [147]. В связи с этим АОЛС рассматривается не как основной канал связи для основной защиты, а как

дополнительный, обеспечивающий минимально необходимое число каналов связи для требуемой надёжности.

В данной работе в качестве защиты ВЛ, которая будет реализована на базе передачи данных по АОЛС, принята ДФЗ, так как она позволяет передавать дискретные логические сигналы, манипулируемые и управляемые фазой тока с каждой стороны ЛЭП. Для создания такой защиты в однофазном исполнении разработан и представлен программный код и физическая реализация типoisполнения устройства на базе Arduino на учебном стенде. В качестве измерителей использовались датчики тока, а проверка производилась при помощи РЕТОМ-51. Выполнено несколько видов органов ДФЗ: пусковой, отключающий и орган сравнения фаз.

Как и в традиционном виде в ДФЗ срабатывание защиты на отключение происходит в случае, если замер по току превышает величину уставки отключающего органа, а так как уставки выбраны согласовано с обеих сторон, то с противоположного конца точно также будет произведен пуск приёмопередатчика по АОЛС в представленном учебном примере. Одним из главных преимуществ использования АОЛС в отличии от ВЧ канала связи является возможность непрерывной передачи данных без реализации пусковых органов так как отсутствует опасность перегрева приёмопередатчика. В случае внешнего КЗ через присоединения будет протекать один и тот же ток в противофазе примерно равным 180° и формировать единый сплошной сигнал, который будет означать запрет на срабатывание. При КЗ в зоне действия защиты токи со стороны питающих концов будут различны, что вызовет появление пауз в сигнале манипуляции и задержек в виде меандр, если длительность замера паузы будет больше уставки органа сравнения фаз, то произойдёт команда на срабатывание. Оптический сигнал для ДФЗ передаётся через атмосферу. Ввиду отсутствия на прототипе инфракрасного лазера и светофильтров для подобных лазеров, обычно применяемых в АОЛС, имитация атмосферного

канала выполнена с помощью закрытого от внешних засветок канала связи (рисунок 4.9).

Аппаратная часть прототипа состоит из следующих модулей:

1) Arduino Nano – плата микроконтроллеров, базирующаяся на микроконтроллере ATmega328. Все структуры Arduino Nano при необходимости активируются с помощью встроенных в Arduino IDE библиотек или напрямую через работу с регистрами микроконтроллера;

2) HW-493 – лазерный модуль для Arduino с красным лазерным светодиодом и медным цилиндрическим радиатором. Лазерный луч виден в задымленном помещении, он создает световое пятно на поверхности объекта, расположенного на расстоянии до 14 метров;

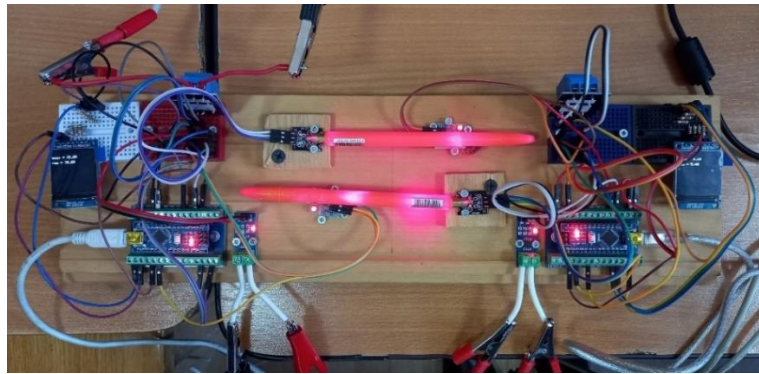
3) DS18B20 – цифровой температурный датчик, который является микроконтроллером и может хранить значения измерений. Модуль приемника лазерного датчика для Arduino реагирует на попадание лазерного луча от модуля HW-493: при наличии излучения он выдает логическую «1», при отсутствии – «0».

4) ACS712 – датчик для измерения силы тока в цепи, который измеряет как переменный, так и постоянный ток от 0 до 30 А. Датчик тока ACS712 состоит из датчика Холла и медного проводника.

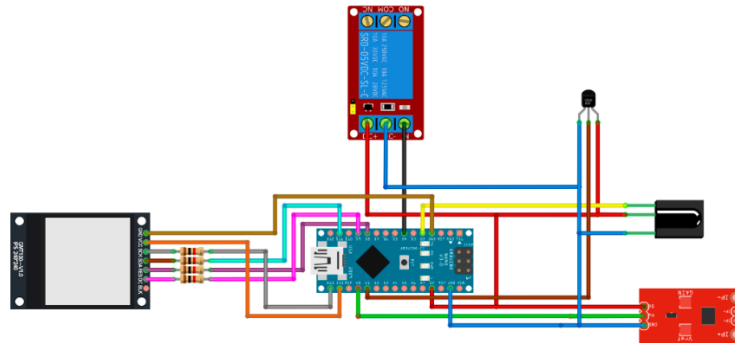
5) JQC-3FF – одноканальный модуль электромагнитного реле, может быть использован для управления нагрузкой – устройствами, потребляющими большие токи (как постоянные, так и переменные) до 10 А на переменном напряжении до 250 В, постоянном – до 30 В. Время срабатывания реле при включении – до 10 мс.

6) GMT 130-v1.0 – дисплей с размером матрицы в 1,3 дюйма и разрешением 240×240 пикселей. В дисплее установлен контроллер ST7789 с интерфейсом подключения SPI всего 4 проводами. Информация на экране может быть статична или изменяться при выполнении определённых условий.

На рисунке 4.9 приведена фотография разработанного прототипа и схема соединений одного полуконспекта.



а)



б)

Рисунок 4.9 – а) Внешний вид прототипа

б) схема внутренних соединений одного из полукомплектов

4.2.4 Оценка эффективности работы прототипа устройства защиты

Программная часть прототипа реализована таким образом, что при включении Arduino запускается автоматическая калибровка аналогового входа тока относительно нуля ампер. С датчика тока, подключенного к аналоговому входу A0, считывается 1000 значений и рассчитывается их среднее арифметическое (число уровней квантования 512 соответствует 0 А):

```
mean = 0.0;
for (n = 0; n < 1000; n = n + 1) {
    I = analogRead(A0);
    mean = mean + (float)I - 512.0;
}
metean = mean / 1000.0;
```

Для расчёта действующего (RMS) значения тока частотой 50 Гц запускается таймер с периодом 20 мс:

```
Timer1.setPeriod(20000);
Timer1.enableISR();
```

Далее при чтении данных с датчика тока производится вычитание среднего значения тока, полученного при калибровке:

```
I = analogRead(A0) - int(trunc(mean));
```

Расчёт силы тока:

```
current = ((float)I * 0.0048828 - 2.5) * 5.405405;
```

Для приближённого расчёта действующего значения тока через средневывпрямленное значение накапливается модуль мгновенной силы тока:

```
rms = rms + fabs(current);
m = m + 1;
```

При срабатывании таймера за период рассчитывается средневывпрямленное значение и делится на коэффициент формы 1,11:

```
rms = rms / m * 1.11;
```

Если полученное значение превышает 1 А (принятая уставка чувствительного органа), запускается работа лазеров. При положительном полупериоде тока лазер гаснет, при отрицательном – загорается:

```
float s = 0.1;
...
if (current >= s) {
    digitalWrite(LASER, LOW);
... }
if (current <= -s) {
    digitalWrite(LASER, HIGH);
... }
```

Если действующее значение тока превышает 1,5 А, выполняются дополнительные действия. Выполняется считывание значений с датчика освещенности:

```
ldr = digitalRead(15);
```

В случае синхронной работы лазеров фиксируется время:

```
tm1 = millis();
```

Если в течение одного периода синхронная работа лазеров длится более 3 мс, то увеличивается счётчик пауз. Если это событие происходит 3 периода подряд, вызывается процедура реакции на КЗ:

```
tm2 = millis() - tm1;
if ((tm2 > 2) and (np == true)) {
    sch = sch + 1;
}
if (sch == 3) {
    kz();
}
```

В процедуре `kz()` подаётся сигнал на реле, подключенное к цифровому выходу 4:

```
digitalWrite(4, HIGH);
bkz = true;
```

Далее сигнал с реле снимается, и алгоритм запускается повторно в том случае, если действующее значение тока будет снова ниже 1 А:

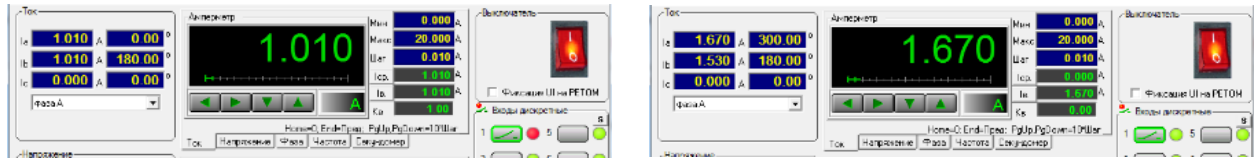
```
if ((bkz) and (rms < lim1)) {
    digitalWrite(4, LOW);
    tm1 = millis();
    bkz = false;
}
```

Произведена проверка работоспособности полученного прототипа с использованием испытательного устройства РЕТОМ-51 (рисунки 4.10-4.12). При проверке использовались следующие уставки:

- ток срабатывания чувствительного органа – 1 А;
- ток срабатывания грубого органа – 1,5 А;
- угол блокировки защиты – 54°;
- счётчик пауз в суммарном сигнале – три паузы подряд.

Экспериментально зафиксированные значения временных характеристик, замеров токов срабатывания от величины уставки, угла блокировки имеют некоторые отклонения от расчетных параметров, что обусловлено совокупностью следующих факторов в виде аппаратного ограничения платформы Arduino,

погрешности измерительных датчиков, аппроксимация характеристик при программной фильтрации. При этом для учебных целей погрешности измерений являются приемлемыми.



а)

б)

Рисунок 4.10 Результаты проверки токов срабатывания чувствительного органа: а) и грубого органа б) на прототипе ДФЗ



а)

б)

Рисунок 4.11 Проверка угла блокировки прототипа ДФЗ при увеличении (а) и уменьшении (б) одной из фаз токов в режиме внешнего КЗ



а)

б)

Рисунок 4.12 Проверка времени срабатывания прототипа ДФЗ при скачкообразном увеличении (а) и уменьшении (б) одной из фаз токов

Как итог показано, что с применением АОЛС физически имеется возможность создания модуля передачи данных для устройств основных защит ЛЭП на примере ДФЗ, в частности для коротких линий. Если вышеуказанные параметры с требованиями срабатывания и блокировки удалось реализовать на простом устройстве Arduino Nano, то на промышленных образцах не представляет труда сделать подобный аналог с

гораздо лучшими техническими характеристиками. Проверка на РЕТОМ-51 подтвердила работоспособность программного кода и устройства для использования в учебной программе.

Выводы по четвёртой главе

В четвёртой главе проведена оценка эффективности предложенных способов обеспечения правильной работы устройств РЗ. Выполнена верификация на уменьшенной физической модели ВЛ замеров защиты с абсолютной селективностью на ДМП для двухцепной ЛЭП, являющейся в концептуальном исполнении аналогом ДЗЛ. Приведено описание физической модели пролёта двухцепной ЛЭП, описаны используемые приборы, а также приведены сами замеры и погрешности сравнения замеров с физической и цифровой моделью. Результаты измерений показали, что погрешность модели не превышает 10% в сравнении с натурным экспериментом, что является приемлемым для устройств РЗ. Приведены рекомендации по используемым расчётным условиям для выбора уставок защиты на основе сравнения замеров с ДМП. Для проверки расчетного условия результирующего замера НМП, являющегося аналогом дифференциального тока в ДЗЛ, при КЗ в зоне действия защиты необходимо моделировать КЗ в схеме с минимальным сопротивлением системы и в конце защищаемой ЛЭП в режиме опробования, а для расчета небаланса результирующего замера НМП при внешнем КЗ нужно рассматривать КЗ на параллельной ЛЭП в начале линии в максимальном режиме. Уставку необходимо выбирать по условию обеспечения чувствительности с учётом проверки отстроенности защиты от небаланса при внешнем КЗ.

В вопросе реализации канала связи для устройств РЗ приведено обоснование пригодности использования АОЛС в качестве альтернативы традиционным ВЧ каналам связи и ВОЛС для ЛЭП малой протяжённости до 3 км. Для таких линий АОЛС может применяться в

качестве резервного канала связи для обеспечения большей надежности. Произведена разработка аппаратной и функционально-логической части ДФЗ, использующей для обмена информацией между полукomплектами защиты лазерный канал связи АОЛС, реализованный на базе микроконтроллеров Arduino Nano. Произведена апробация полученного прототипа при помощи РЕТОМ-51. В результате сложения сигналов органов манипуляции от полукomплектов в АОЛС получен сплошной сигнал при моделировании внешнего КЗ и сигнал с требуемым временем паузы при КЗ в зоне действия защиты для возможности выявления КЗ и выдачи выходного воздействия на отключение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены основные результаты работы:

1. Проведён обзор основных принципов реализации РЗ для ЛЭП, основанных на токовом (МТЗ, МФТО, ТЗНП, ТЗОП), дистанционном (ДЗ), дифференциальном принципах (ДФЗ, ДЗЛ), а также на принципе направленности (ВЧБ, НВЧЗ). Определено, что у традиционно применяемых устройств РЗ основными источниками информации об аварийных процессах в первичной сети являются сигналы от измерительных ТТ и ТН. При этом замеры с ТН могут не использоваться в токовых и дифференциальных защитах, тогда как замеры с ТТ используются абсолютно во всех типах исполнения защит. Рассмотрены основные причины, приводящие к возникновению КЗ, а также описаны последствия КЗ. Выполнен анализ основных факторов, оказывающих влияние на корректность работы устройств РЗ. К ним относятся: наличие погрешности ТТ, вызванной эффектами насыщения при аварийных переходных режимах в первичной сети; ложная работа устройств РЗ при обрывах в цепях напряжения; влияние переходного сопротивления электрической дуги на работу ДЗ; неисправности в каналах связи для основных защит с абсолютной селективностью.

2. При рассмотрении вопроса насыщения ТТ определена степень влияния эффекта насыщения на корректность работы различных устройств РЗ. Существует вероятность задержки срабатывания токовых защит при насыщении ТТ на время размагничивания ТТ током КЗ и восстановления действующего значения тока до величины уставки, замедление может достигать до 0,3 с при возникновении неблагоприятных условий для защиты. В случае внешнего КЗ для дифференциальных защит может возникнуть вероятность излишней работы при насыщении ТТ из-за появления тока небаланса. Возможная опасность для ДЗ состоит в искажении замера угла тока и возможного выхода замера сопротивления из зоны характеристики срабатывания защиты. Анализ влияния насыщения на работу защит выполнен с использованием модели ТТ в программной среде MATLAB Simulink. Особенностью разработанной модели является то, что в отличие от большинства аналогов в ней реализовано снижение

уровня остаточного намагничивания, то есть постепенное размагничивание ТТ при длительном протекании периодического тока КЗ, где степень затухания зависит от величины постоянной времени вторичного контура ТТ. Проведена верификация характеристик моделируемого ТТ с реальным ТТ типа ТПЛ-10-50/5. Расхождение замеренных и расчетных параметров составило не более 5%.

3. В части неисправностей в цепях напряжения защит рассмотрены основные недостатки БНН для электромеханических и МП устройств РЗ. Отмечена вероятность отказа защиты при устранении указанных недостатков путём заведения всех ступеней ДЗ под БК. Показано отсутствие данных недостатков для ЛЭП 330 кВ с двумя основными защитами и ЛЭП 500 кВ с использованием замеров от двух независимых ТН. Рассмотрены недостатки применения аварийной МТЗ для обеспечения защит ВЛ в случае потери цепей напряжения.

4. При рассмотрении влияния переходного сопротивления электрической дуги на работу устройств ДЗ предложено использование динамической модели электрической дуги, базирующейся на дифференциальных уравнениях Касси. Верификация модели дуги выполнена посредством сравнения полученных семейств ВАХ с действительными характеристиками дуги, представленными в исследованиях других авторов, посвящённых изучению электрических процессов при горении дуги. Также проводились сравнения замеров сопротивления на модели дуги с известными расчетными методами. Выполнена интеграция модели дуги в модель первичной сети для линий большой (более 100 км) и малой (менее 10 км) протяжённости. Наибольшее влияние искажения замеров сопротивления и выхода за пределы характеристики срабатывания ДЗ наблюдался для ЛЭП малой протяжённости с большой мощностью системы с приёмной стороны. Применение динамической модели дуги позволило выявить, что искажение замеров сопротивления ДЗ для линий малой протяжённости до 10 км в сети с малыми токами КЗ порядка 1,25 кА из-за влияния переходного сопротивления дуги приводило к выходу за пределы второй зоны ДЗ более чем на 50% от границ характеристики. При использовании

классической модели дуги посредством моделирования её активным сопротивлением в тех же условиях работы все замеры сопротивления находились внутри характеристики срабатывания защиты. Для линий большой протяжённости (более 100 км) классическая и динамическая модели показали практически идентичные результаты, отличия составили не более 2%.

5. При исследовании существующих каналов связи для устройств РЗ (ВЧ и ВОЛС) выполнено их сравнение и описание преимуществ и недостатков. На основании статистических данных, собранных АО «СО ЕЭС» по результатам функционирования устройств РЗА в ЕЭС России, выявлено, что за период с 2019 по 2024 года общая доля неисправностей ДФЗ-201 из-за неполадок в канале связи или её аппаратуре могла достигать до 44% от всех остальных причин неправильной работы ДФЗ-201. Следовательно, традиционные способы реализации каналов связи не всегда обеспечивают требуемый уровень надежности, и применение альтернативных вариантов, таких как АОЛС на линиях малой протяжённости в качестве дополнительных и резервных каналов связи может снизить общее количество случаев ложной работы устройств РЗ, так как они базируются на ином принципе действия и не обладают частью недостатков традиционных каналов.

6. Произведено моделирование магнитного поля, создаваемого многопроводной системой переменного тока, для выделения и расчета ортогональных составляющих магнитного поля и его полного действующего значения. Разработана программа для визуализации НМП, в частности получены картины магнитного поля возле одноцепных и двухцепных ЛЭП в нормальном режиме и при всех видах КЗ. Произведена верификация расчетной модели посредством создания физической модели двухцепной ЛЭП в лаборатории Корпоративного учебно-исследовательского центра «ЕвроСибЭнерго-ИРНИТУ» и выполнено проведение на этой модели замеров среднеквадратичного значения НМП в различных точках пространства измерителем электромагнитного поля ПЗ-70 и магнитной антенной прибора КДЗ-1. Отличие измеренных и расчетных значений по всем составляющим магнитного поля не превысило 10%.

7. В качестве альтернативы проведения замеров с ТТ рассмотрены известные способы получения параметров фазного тока в каждом проводнике по замерам НМП с нескольких ДМП, расположенных под рассматриваемой ВЛ. Проведен обзор исследований отечественных и зарубежных авторов, где рассматривается применение ДМП, основанных на эффекте Холла, для получения фазных токов ЛЭП. Главный недостаток этих способов проявляется в том, что все алгоритмы получения таких замеров применимы при расположении токоведущих частей в один горизонтальный ряд, что является актуальным только для ЛЭП с П-образными опорами, применяемых в основном для сверхвысокого напряжения, тогда как одноцепные опоры ЛЭП более низкого класса напряжения выполнены с произвольным расположением фаз в пространстве. Ещё одним недостатком существующих методов получения замера фазных токов через параметры магнитного поля является невозможность их применения для ЛЭП на двухцепных опорах.

8. Рассмотрены альтернативные способы реализации бесконтактных систем измерения магнитного поля: индукционные катушки, бесконтактная измерительная система по радиоканалу, катушки Роговского, герконы, преобразователи Холла в виде магнитотранзисторов. Проанализированы преимущества и недостатки каждого из рассматриваемых измерителей. Выявлено, что наиболее подходящими для выполнения защиты от КЗ являются преобразователи на основе эффекта Холла. Произведен обзор современных устройств измерения магнитного поля промышленной частоты на основе эффекта Холла, что показывает техническую возможность создания измерительного органа требуемой точности, необходимого для практической реализации РЗ на ДМП.

9. Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на погрешности измерений у ДМП: измерение слабых магнитных полей; влияние температуры окружающего воздуха; влияние случайных помех от блуждающих токов, от импульсных токов при кратковременных перенапряжениях, от токов молнии; погрешности, связанные с влиянием токов смежных ЛЭП разных уровней

напряжения; погрешности, вызванные отклонением координат размещения ДМП по двум сторонам ЛЭП от оптимальных; наличие смещения проводов при ветровых нагрузках, а также изменение их стрелы провеса при различных температурах воздуха и динамическом действии токов КЗ. Помимо самих факторов рассмотрены способы и мероприятия для устранения или значительного снижения их влияния на уже разработанные, известные из уровня техники бесконтактные системы на основе эффекта Холла. К таким мероприятиям относятся: применение магнитных усилителей-концентраторов магнитного поля, подбор параметров усилителей и магниточувствительного материала датчика Холла для взаимокompенсации их влияния на итоговые показатели при изменении температуры, применение экранов, усилителей и отражателей, использование одновременных замеров по вертикальной и горизонтальной составляющим магнитного поля, применение фрагмента с жесткой ошиновкой в местах установки ДМП.

10. Разработано концептуальное решение по реализации РЗ с абсолютной селективностью для ЛЭП на одноцепных опорах любого уровня напряжения, а также для ЛЭП на двухцепных опорах 35 кВ с использованием замеров от ДМП. Главным отличием от ранее разработанных подходов по использованию ДМП для измерения фазных токов каждого проводника является применение иного принципа реализации РЗ с использованием только результирующего замера НМП в конкретной точке пространства от всех проводников. Основой предлагаемого типа защиты является дифференциальный принцип, когда при внешних КЗ или нагрузочных режимах в одноимённых фазах в начале и конце ВЛ протекает один и тот же ток, отличающийся лишь направлением. Так, если в начале и конце ВЛ будут находиться однотипные опоры, то картины магнитного поля в начале и конце линии также будут одинаковы. Если применить данный принцип для реализации аналога ДЗЛ, то для одноцепных опор достаточно использования по одному трёхкоординатному ДМП с каждой стороны ЛЭП, которые будут обмениваться друг с другом замерами по каналам связи и по дифференциальному принципу формировать результирующий замер НМП, являющегося аналогом

дифференциального тока в традиционной ДЗЛ. Таким образом, можно значительно сократить количество используемых ДМП по сравнению с ранее разработанными подходами. Так как в общем случае для измерения тока одного провода в N -проводных системах с помощью ДМП и исключения влияния магнитных полей других проводов необходимо использовать $2N$ ДМП, то для двухцепной трёхфазной ЛЭП для выявления параметров фазных токов через замеры магнитного поля на каждую фазу понадобилось бы по 6 датчиков. В совокупности для всех фаз ЛЭП на двухцепной опоре необходимо использовать 36 датчиков, а с учётом реализации защиты с двух сторон ЛЭП суммарно необходимо 72 датчика. Вместе с тем при использовании предлагаемого способа замера результирующего магнитного поля для выявления аварийного режима посредством применения дифференциального принципа достаточно использовать только по 6 датчиков с каждой стороны, т. е. всего 12 датчиков для двухконцевой ЛЭП. Это позволяет в 6 раз сократить число ДМП по сравнению с ранее применённым подходом и повысить общую надёжность системы за счёт снижения количества её элементов. Актуальным направлением развития работы является совершенствование защиты на ДМП для ЛЭП на двухцепных опорах с целью обеспечения её чувствительности не только к междуфазным КЗ, но и однофазным КЗ. Тогда данный тип защиты может быть реализован для ВЛ напряжением 110 кВ и выше. Помимо обеспечения чувствительности ко всем видам КЗ разработка способа защиты на ДМП при применении разнотипных опор по концам ЛЭП сможет расширить область её применения.

11. Для ЛЭП на одноцепных опорах решена задача оптимального размещения ДМП по условию обеспечения максимального результирующего замера НМП при КЗ в зоне действия защиты и обеспечению безопасного расстояния от токоведущих частей при размещении ДМП. Определена оптимальная траектория в виде дуг окружностей вокруг фазных проводников, на которой можно разместить ДМП. Разработана целевая функция, одним из аргументов которой является угол центра окружности, а оптимизируемой величиной является минимальный из всех возможных результирующих замеров

НМП при всех видах междуфазных и однофазных КЗ. Поскольку целевая функция содержит в себе несколько локальных экстремумов, то традиционные методы оптимизации, такие как метод наименьших квадратов, методы нелинейной оптимизации не могли устойчиво находить глобальный экстремум функции. Для решения задачи данного типа был применен эвристический метод генетического алгоритма, реализованный в модуле оптимизации «Optimization Toolbox» программно-вычислительного комплекса MATLAB. Данный метод безошибочно и на постоянной основе определял оптимальную точку размещения ДМП при любом количестве итераций. Определена область применения данной защиты, это линии до 110 кВ включительно без отпаяк и ответвлений. В случае установки ДМП между проводниками допускается наличие рядом стоящих ВЛ, если ДМП находится на внешнем контуре, тогда только одиночные ВЛ. Необходимы одинаковые опоры в начале и конце ЛЭП. Защита может применяться для тупиковых ВЛ, где нет ТТ со стороны приёмного конце, а также для ВЛ, где выполнена только одна релейная обмотка для ТТ, и к которой подключены только ступенчатые защиты и на ВЛ нет основной защиты. В данном случае линии 220 кВ не рассматриваются, так как как правило данные условия на них не встречаются. Могут использоваться на тех ВЛ, где наблюдаются большие токи КЗ и времена постоянной времени первичной сети, и, соответственно, есть вероятность отказа защиты из-за насыщения ТТ. В этом случае защита на ДМП используется как альтернативный способ получения информации об аварийных параметрах режима в первичной сети.

12. Для определения оптимального размещения ДМП возле ЛЭП на двухцепной опоре помимо условия обеспечения максимального замера НМП при КЗ на защищаемой ЛЭП и обеспечения безопасных расстояний до проводников, дополнительным условием оптимизации являлось обеспечение минимального, близкого к нулевым значениям, результирующего замера НМП при КЗ на параллельной ЛЭП. Для решения этой задачи применительно к ЛЭП на двухцепной опоре потребовалось по три ДМП с каждого конца ЛЭП: два боковых датчика с каждой стороны опоры и один срединный, размещенный на оси

симметрии опоры, замеры с которого используются для выполнения защиты каждой из параллельных цепей ЛЭП. Благодаря использованию замеров со среднего ДМП выполнена компенсация замеров НМП, создан эффект демпфирования магнитного поля от внешних КЗ на параллельной ЛЭП и достигнуто уменьшение практически до нулевых значений результирующего замера НМП. Для двухцепных ВЛ в случае размещения ДМП в точках с координатами, указанными в «Приложение Б – Результаты расчёта координат оптимального размещения датчиков для различных типов опор линий 35 кВ», удалось получить соотношение порядка 1000 между результирующим значением магнитного поля при КЗ в зоне действия защиты и замерами небаланса при внешних КЗ при прочих равных условиях. Если принимать худшие условия при КЗ в зоне действия защиты, когда рассматривается минимальный режим работы системы, КЗ происходит в конце защищаемой ВЛ при каскадном действии защит и наблюдается наибольший небаланс результирующего замера при внешнем КЗ (максимальный режим работы системы, КЗ в начале смежной параллельной ВЛ), то для КЗ в зоне абсолютное значение результирующего замера для наихудшего случая при токах КЗ порядка 1 кА составило 88 А/м, тогда как наибольшее значение небаланса при токе внешнего КЗ 40 кА составило 1,5 А/м, что подтверждает возможность использования данной защиты и выбора её уставки для датчика каждого типа только по условию обеспечения чувствительности с $K_{\text{ч}} = 2$.

13. Для снижения вероятности неправильной работы защиты с абсолютной селективностью для ЛЭП на двухцепной опоре предложено применение двух комплектов ортогонально размещаемых ДМП: три однокоординатных ДМП, реагирующие на замеры вертикальной составляющей магнитного поля, а также три однокоординатных ДМП, реагирующие на замеры горизонтальной составляющей магнитного поля. Для каждого комплекта ортогонально размещаемых ДМП выбираются свои независимые уставки срабатывания, и отключающее воздействие формируется только после одновременного превышения уставки в обоих комплектах. Снижение вероятности

ложной работы происходит за счет того, что случайная помеха, превышающая уставку защиты, не сможет одновременно создать достаточный уровень небаланса сразу по обоим ортогональным составляющим магнитного поля. Рассмотрены варианты независимого размещения однокоординатных ДМП разных типов в разных координатах пространства возле двухцепной ЛЭП, а также в одних и тех же точках пространства для упрощения проведения регулировочных, монтажных и наладочных работ. Определено, что размещение комплектов ДМП в одних и тех же точках приводит к значительному снижению чувствительности защиты по сравнению с оптимальными координатами, полученными независимо для каждой ортогональной составляющей поля. При размещении ДМП для каждой из ортогональных составляющих в разных точках наименьшее абсолютное значение НМП при КЗ в зоне составляло 406 А/м, тогда как при размещении ДМП ортогональных составляющих в одной точке их соотношение снизилось практически в 4 раза до значения 88 А/м при прочих равных условиях. При этом во всех случаях отношение замеров НМП при КЗ в зоне и внешнем КЗ составляло более 1000. По условию отстройки от ёмкостного тока указано ограничение в 100 км для ВЛ напряжением до 220 кВ. Диапазон выбора уставок находится в районе от 10 А/м до 1000 А/м. ЭДС на выходе прямо пропорциональна изменению поля ($10 \text{ В} \equiv 1000 \text{ А/м}$), что удобно для проверки защит. Диапазон выдачи уставок может изменяться от 0,1 В до 10 В. Такие значения способно выдавать устройство РЕТОМ-61 с соответствующим шагом в 0,01 В.

14. По результатам исследований получено, что трёхкоординатные ДМП, а также индуктивные катушки, непригодны для реализации данной защиты ЛЭП на двухцепной опоре, так как реагируют на результат совместного действия всех трёх ортогональных составляющих магнитного поля, и для них нет возможности подобрать оптимальный компенсирующий коэффициент торможения для отстройки от КЗ на параллельной ЛЭП. Применение набора из трёх однокоординатных ДМП для реализации полукомплекта селективной защиты обеих цепей двухцепной ЛЭП (два боковых и один срединный) позволяет произвести компенсацию магнитного поля от КЗ на параллельной ЛЭП только

для междуфазных КЗ. По этой причине применение такого типа защиты будет особенно актуально для двухцепных ЛЭП 35 кВ, работающих в сети с малыми емкостными токами замыкания на землю, которые многократно меньше токов междуфазных КЗ. Также применение защиты данного типа актуально для ВЛ с односторонним питанием, когда со стороны приёмного конца отсутствуют коммутационные аппараты и ТТ, что делает физически невозможным реализацию ДЗЛ на данной ЛЭП. Отключение таких линий происходит только с питающей стороны ступенчатыми защитами, имеющими выдержку времени по условию согласования с основными защитами силовых трансформаторов. Использование ДМП позволит избежать затрат на покупку дорогостоящего первичного измерительного оборудования, обеспечит безопасное проведение работ в цепях защиты для обслуживающего персонала, а также позволит производить наладку и регулировку ДМП, когда ЛЭП находится под напряжением в нагрузочном режиме, при соблюдении безопасных расстояний до токоведущих частей.

15. Для реализации защиты начального участка ЛЭП от линейного портала до опоры ЛЭП, рядом с которой будет устанавливаться полукомплект ДМП, предложена концепция УСДЗ, осуществляющей визуальный обзор и мониторинг защищаемого участка посредством двух оптических приборов с фоточувствительными датчиками, установленных на портале/опоре или рядом с ними и реагирующими на одновременное появление вспышки света с определённой стороны от датчиков и с определенным спектральным излучением ионов алюминия, содержащихся в электрической дуге при КЗ на сталеалюминиевых проводах. От вспышек молнии УСДЗ отстроено посредством применения определенного светофильтра, выделяющего диапазон длин световых волн при горении алюминия. Длина волны светового излучения при горении частиц алюминия составляет от 460 нм до 530 нм, что позволяет селективно отличить такую дугу от длины волны при вспышке молнии, длины волн излучения которой находятся в диапазоне от 777,19 нм до 777,54 нм. Для обеспечения надежности защиты в УСДЗ также встроен трёхкоординатный ДМП, реагирующий на скорость изменения действующего значения НМП, вызванного

появлением тока КЗ. Помимо перекрытия мертвой зоны, имеющейся у защиты на ДМП и у других традиционных РЗ, УСДЗ, использующее неэлектрический способ получения информации об аварийных процессах в первичной сети, является актуальным для резервирования ДЗ при КЗ в начале ВЛ, когда напряжение снижается практически до нуля, а также когда присутствует глубокое насыщение ТТ, так как наибольшие токи, как правило, наблюдаются именно при КЗ в начале ВЛ. Применение защиты данного типа также может быть актуальным для ЛЭП малой протяжённости (до 2 км), где при обеспечении защиты 100-200 метров начала линии со стороны каждой из ПС, в процентном соотношении удастся обеспечить защитой 5-10% всей протяжённости данной ЛЭП, что можно сравнить с зоной действия МФТО.

16. В качестве альтернативного канала связи для обмена информацией между полуккомплектами основных РЗ по концам ЛЭП рассмотрено устройство АОЛС. Рассмотрены различные сферы техники, в которых производится активное внедрение АОЛС. На основании проведенных исследований показана возможность применения АОЛС в качестве дополнительного и резервного канала связи для обмена информацией между терминалами устройств РЗ. Рассмотрены области применения существующих устройств АОЛС на базе зарубежного и отечественного производства. Коэффициент готовности устройств АОЛС удовлетворяет требованию в 0,99 при дальности передачи данных в области до 3 км. Это актуально для ВЛ малой протяжённости, где создание канала связи через ВЧ или ВОЛС может быть более дорогостоящим решением. Вероятность ложной работы устройства не выходит за пределы 10^{-6} в самом тяжелом для устройства режиме, что также удовлетворяет требуемым нормам. При бóльших расстояниях на качество и точность передачи данных начинают оказывать влияние такие погодные факторы, как туман, дождь, снег, метель и т. д.

17. Разработан учебный прототип устройства ДФЗ в однофазном исполнении, полуккомплекты которого осуществляют обмен информацией посредством АОЛС, состоящей из лазера и фотоприёмника. Приведено описание алгоритма функционирования прототипа и его физической реализации на базе

микроконтроллеров Arduino Nano. Управление токами, измеряемыми полукompлектами защиты, осуществлялось с помощью устройства РЕТОМ-51, выполнено моделирование режимов КЗ в зоне действия защиты и внешних КЗ. По результатам проведенных испытаний установлено, что устройство передачи манипулированных сигналов о полярности тока на базе АОЛС работает стабильно, и АОЛС может быть рассмотрена для реализации быстродействующей защиты с абсолютной селективностью с временем срабатывания порядка 40 мс. Во избежание эффекта «засветки» от внешних источников света канал связи прототипа АОЛС выполнен в светоизолирующем корпусе. Данная проблема может быть решена посредством применения инфракрасного лазера у передатчика и светофильтром у приёмника, настроенным на длину волны лазера. Для АОЛС регламентировано применение длин волн в диапазонах 780–850 нм и 1520–1600 нм.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

FSO	– Free-space optics (оптика свободного пространства)
RMS	– root mean square (среднеквадратичное значение)
АДТН	– Аварийно допустимый ток нагрузки
АМТЗ	– Аварийная максимальная токовая защита
АОЛС	– Атмосферная оптическая линия связи
АЭС	– Атомная электрическая станция
БК	– Блокировка при качаниях
БНН	– Блокировка при неисправности в цепях напряжения
ВАХ	– Вольтамперная характеристика
ВЛ	– Воздушная линия
ВОЛС	– Волоконно-оптическая линия связи
ВЧБ	– Высокочастотная защита с блокировкой
ВЧ	– Высокочастотный
ДДТН	– Длительно допустимый ток нагрузки
ДЗ	– Дистанционная защита
ДЗЛ	– Дифференциальная защита линии
ДЗШ	– Дифференциальная защита шин
ДМП	– Датчик магнитного поля
ДФЗ	– Дифференциально-фазная защита линии
ИО	– Измерительный орган
КВЧ	– Крайне высокочастотное электромагнитное излучение
КЗ	– Короткое замыкание
ЛЭП	– Линия электропередачи
МП	– Микропроцессорный
МТЗ	– Максимальная токовая защита
МФТО	– Междофазная токовая отсечка
НВЧЗ	– Направленная высокочастотная защита
НМП	– Напряжённость магнитного поля

ПС	– Подстанция
ПХН	– Прямоугольная характеристика намагничивания
РЗ	– Релейная защита
СВЧ	– СВЧ-излучение
СХН	– Спрямлённая характеристика намагничивания
ТН	– Трансформатор напряжения
ТТ	– Трансформатор тока
ТЗНП	– Токовая защита нулевой последовательности
ТЗОП	– Токовая защита обратной последовательности
УСДЗ	– Устройство спектрально-дуговой защиты
ЭДС	– Электродвижущая сила

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумов И. В. Вопросы надежности транспорта электрической энергии (на примере компании ПАО «Красноярскэнергосбыт») // Надежность и безопасность энергетики. – 2023. – Т. 16. – №. 1. – С. 15-26.
2. Раскулов Р. Ф. Анализ условий работы измерительных трансформаторов и исследование влияний воздействующих факторов на точностные характеристики трансформаторов в энергосистемах: дис. – М.: [НИИ электроэнергетики], 2004.
3. Novobritsky V. A, Fedosov D. S. Determination of the primary time constant of the DC component of the short circuit current using the AC component parameters // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9111891. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111891.
4. Воробьев В. С. О неправильной работе устройств РЗА в переходных режимах при насыщении трансформаторов тока //Заседание некоммерческого партнерства «Научно-технический совет единой энергетической системы» (г. Москва, 11 сентября 2015 г.). М. – 2015. – С. 12-43.
5. Новобрицкий В. А., Федосов Д. С. Анализ влияния переходного сопротивления электрической дуги на работу дистанционной защиты с использованием динамической модели // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 2(51). – С. 12-18.
6. Kletsel M. Ya., Mashrapov B. E., Mashrapova R. M. Reed switch protection of double-circuit lines without current and voltage transformers / M // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2023. – Vol. 154. – P. 109457. – DOI 10.1016/j.ijepes.2023.109457
7. Шульгинов Н. Г., Жуков А. В., Воробьев В. С., Максимов Б. К., Арцишевский Я. Л., Расщепляев, А. И., Лебедев В. Д. Патент № 2446534 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/28, H02H 7/22. Устройство для защиты от

коротких замыканий в «мертвой зоне» открытых распределительных устройств объектов энергетики: № 2011117118/07 : заявл. 04.05.2011: опубл. 27.03.2012.

8. Chen K. L., Chen J. H. Contactless current measurement for suspended overhead lines using a magnetic field sensor array //IET Generation, Transmission & Distribution. – 2024. – Т. 18. – №. 7. – С. 1360-1371.

9. Tsai Y. P., Chen K. L., Chen Y. R., Chen N. Design of a new Hall overcurrent protection relay with instantaneous characteristics //Journal of the Chinese Institute of Engineers. – 2015. – Т. 38. – №. 8. – С. 1045-1054.

10. Majumder R., Dolui S., Agasti D., Biswas S. Micro-controller based over current relay using Hall Effect current sensor //2018 Emerging Trends in Electronic Devices and Computational Techniques (EDCT). – IEEE, 2018. – С. 1-4.

11. Lisowiec A., Habrych M., Michalski P., Miedzinski B., Wisniewski G. Interference Level Detector with PCB HDI Rogowski Coil for PLC Narrow-Band Applications //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 15. – С. 6682.

12. Новобрицкий В. А., Федосов Д. С. Патент на полезную модель № 220793 U1 Российская Федерация, МПК H02H 7/26, G01R 31/08. Устройство спектрально-дуговой защиты: № 2022126870: заявл. 14.10.2022: опубл. 03.10.2023.

13. Гладков А. Ю., Бершадский И. А., Ковалев А. П. Экспериментальные исследования разряда короткого замыкания емкостной искробезопасной цепи // Взрывозащищенное электрооборудование. – 2017. – № 1(52). – С. 154-164.

14. ГОСТ Р 59909-2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Классификация. – М., 2021 г. – 6 с.

15. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М., 2007 г. – 6 с.

16. Костюков А. В. Анализ причин возникновения коротких замыканий в энергетических хозяйствах и их последствия. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4. – С. 65-69.

17. Хайруллин Д. А. Последствия возникновения короткого замыкания // Академия педагогических идей Новация. Серия: Студенческий научный вестник. – 2017. – №. 6. – С. 758-762.
18. Лачугин В. Ф., Платонов П. С. Использование волновых процессов при разработке релейной защиты ВЛ //Электрические станции. – 2016. – №. 7. – С. 44-50.
19. «Об утверждении правил технического учета и анализа функционирования релейной защиты и автоматики». Приказ Минэнерго России от 08.02.2019 № 80, 25 с.
20. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения //М.: Энергоиздат. – 2005. – Т. 273.
21. Григорьев В. А., Милохин В. Е., Михайлов Б. В. Чувствительность оптоэлектронных дуговых защит //Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №. 4. – С. 36-38.
22. Dragan R., Terry T., Gautami B. «Current Transformers in Protection Applications: The ANSI and International Electrotechnical Commission Standards», Industry Applications Magazine IEEE, vol. 27, no. 5, pp. 47-57, 2021.
23. Скотников Р. В. Анализ технологических нарушений в ПАО «ФСК ЕЭС», вызванных насыщением магнитопроводов индуктивных трансформаторов тока //Научные исследования XXI века. – 2021. – №. 1. – С. 182-191.
24. Дмитриев М. В., Евдокунин Г. А. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной системы // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – №2. – С. 37-48
25. Naseri Z., Kazemi M., Arefi M., Farjah E. «Fast discrimination of transformer magnetizing current from internal faults: An extended Kalman filter-based approach», IEEE Trans. Power Del., vol. 33, no. 1, pp. 110-118, Feb. 2018.
26. Баженов Н. Г., Антипанова И. С. Математическое описание электромагнитных процессов в трансформаторах. Известия высших учебных

заведений. Проблемы энергетики. 2015;(1-2):107-114.
<https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-1-2-107-114>

27. Глухов В. П., Дроздов В. А. О возможности обобщения характеристик перемагничивания массивных ферромагнитных сердечников. Изв. АН Латв.ССР. Сер. физ. и техн. наук, 1975, № 4, с. 79-87.

28. Сафин А. Р. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021;23(3):14-33. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33>

29. Кужеков С. Л., Дегтярев А. А., Воробьев В. С., Москаленко В. В. Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий // Электрические станции. – 2017. – № 1 (1026). – С. 42-47.

30. Афанасьев В. В., Адоньев Н. М., Кибель В. М., Сирота И. М., Стогний Б.С. Трансформаторы тока: учеб. пособие / Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. 416 с.

31. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T., "Electromagnetic Properties Determination Of Electrical Steels", Advanced Trends in Radioelectronics Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) 2020 IEEE 15th International Conference on, pp. 185-189, 2020.

32. Новожилов М. А., Пионкевич В. А. MATLAB в электроэнергетике: учебное пособие. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 246 с.

33. ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Дополнительные требования к трансформаторам – М.: Стандартинформ, 2015. – 108 с.

34. Мухаметгалеева Т. С., Федосов Д. С. Разработка упрощенной модели трансформатора тока для исследования работы релейной защиты в переходных режимах // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 4(159). – С. 450-462. – DOI 10.21285/1814-3520-2021-4-450-462.

35. Hargrave A., Thompson M. J., Heilman B. «Beyond the knee point a practical guide to CT saturation», 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 1-23, 2018.

36. ГОСТ Р 58669-2019 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях— М.: Стандартинформ, 2019. – 58 с.

37. ГОСТ 7746-2015 Трансформаторы тока. Общие технические условия— М.: Стандартинформ, 2015. – 43 с.

38. Евдаков А. Е., Яблоков А. А., Филатова Г. А. Исследование имитационной модели электромагнитного трансформатора тока с учетом эффектов насыщения и остаточной намагниченности магнитопровода // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 3(36). – С. 24-29.

39. Kuzhekov S. L., Degtyarev A. A., Doni N. A., Shurupov A. A., Petrov A. A., Kostarev L. N., Koshelkov I. A. “Analysis of the non-selective actions of differential collecting busbar protection during external single-phase short circuits with saturation of the current transformer in an fault-free phase,” Rel. Zashch. Avtomat., No. 1, 28 – 36 (2019).

40. Федосов Д. С., Булгадаев И. А., Жоголь А. В., Маркевич Т. В. Разработка способа восстановления формы вторичного тока для обеспечения правильной работы цифровой дифференциальной защиты // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Иркутск, 19–23 апреля 2023 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 61-67.

41. Воробьев Е. С., Иванов Н. Г., Глазырин А. В., Антонов В. И., Солдатов А. В. Алгоритмы блокировки при неисправностях цепей напряжения. Сравнение напряжений звезды и разомкнутого треугольника //Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. – 2021. – С. 16-20.

42. Вуколов В. Ю., Петров А. А., Юртаев С. Н., Бедретдинов Р. Ш. Разработка универсального алгоритма выявления неисправностей цепей напряжения микропроцессорных устройств защиты и автоматики //Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2021. – №. 3. – С. 33-41.

43. Руководство по эксплуатации «Терминал ступенчатых защит и автоматики управления выключателем присоединения 110 - 220 кВ типа «ТОР 300 КСЗ 5хх», «ТОР 300 АУВ 5хх»». [Электронный ресурс]. Режим доступа URL <https://relematika.ru/upload/iblock/dc3/210708%D0%A0%D0%AD2%D0%A2%D0%9E%D0%A0%20300%D0%9A%D0%A1%D0%97%205%D0%A5%D0%A5%20r6%20v21.2.pdf> (дата обращения: 17.01.2024).

44. Галлямов Д. Ф., Михайлов А. О. Анализ алгоритмов блокировки при неисправностях цепей напряжения в устройствах РЗА. Пути повышения надежности РЗА при неисправностях в цепях напряжения //Электроэнергетика глазами молодежи. – 2015. – № 1. – С. 129-132.

45. «Об утверждении требований к оснащению линий электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики». Приказ Минэнерго России от 13.02.2019 № 101, 30 с.

46. «Об утверждении требований к релейной защите и автоматике различных видов и ее функционированию в составе энергосистемы». Приказ Минэнерго России от 10.06.2020 № 546, 14 с.

47. Назаренко Е. А., Винаковская Н. Г. Анализ блокировок дистанционной защиты от синхронных качаний и асинхронного режима //Высокие технологии и инновации в науке. – 2020. – С. 169-172.

48. Удрис А. П. Релейная защита воздушных линий 110-220 кВ типа ЭПЗ-1636. – Энегоатомиздат, 1988.

49. Иманаева А. Р., Пушкарева А. З. Повышение надежности энергосистемы путем применения аварийной максимальной токовой защиты

ЛЭП, автоматически вводимой при неисправности цепей напряжения релейных защит. //Электроэнергетика глазами молодежи. – 2019. – С. 50-53.

50. Покаккий А. Ю. Организация функционирования релейной защиты, имеющей цепи напряжения в условиях их неисправности //Электроэнергетика глазами молодежи-2019. – 2019. – С. 30-33.

51. Замыслов И. Д. Разработка формы «Контроль отстройки автоматически вводимой аварийной МТЗ от токов нагрузочного режима» для ПК СК-11//Электроэнергетика глазами молодежи. – 2023. – № 1. – С. 216-217.

52. Seghir S., Bouthiba T., Boukhari R., Bouricha A., Dadda S. Electrical Short Circuit Arc Effect on the Distance Protection in the Transmission Line // University of Mohamed-Boudiaf. – 2019.

53. Титов И. Т., Бычков А. В., Дони Н. А. Учет влияния открытой электрической дуги на параметры срабатывания дистанционной защиты // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2020. – № 2 (129). – С. 85-93.

54. Конова Е. А. Анализ работы дистанционной защиты при учете переходного сопротивления в месте короткого замыкания // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 193-199.

55. Zhao Y., Zhang X., Dong Y., Li W. Characteristics Analysis and Detection of AC Arc Fault in SSPC Based on Wavelet Transform // 2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems. – 2016. – Pp. 476-481.

56. Goda Y., Iwata M., Ikeda K., Tanaka S. Arc Voltage Characteristics of High Current Fault Arcs in Long Gaps // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – № 2. – Pp. 791-795.

57. Дони Н. А., Шурупов А. А., Гарке В. Г., Конова Е. А. Анализ работы микропроцессорной дистанционной защиты // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 4 (9). – С. 22-28.

58. Radojević Z. M. A New Spectral Domain Approach to the Distance Protection, Fault Location and Arcing Faults Recognition on Transmission Lines //

International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2007. – Vol. 29. – № 2. – Pp. 183-190.

59. Guardado J. L., Maximov S. G., Melgoza E., Naredo J. L., Moreno P. An Improved Arc Model Before Current Zero Based on The Combined Mayr and Cassie Arc Models // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. – № 1. – Pp. 138-142.

60. Верещаго Е. Н., Костюченко В. И. Модель электрической дуги в Matlab / Simulink // Електротехніка і електроенергетика. – 2013. – № 2. – С. 40-46.

61. Высикайло Ф. И., Кузьмин М. И., Тивков А. С., Чекалин Б. В., Чернов В. А. Физико-математические модели кумуляции электрического поля в структурах газоразрядной плазмы // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18. – № 11. – С. 104-116.

62. Климов П. Л., Тушков Д. Б., Вачаева М. Н., Доденгефт Е. А. Определение активного переходного сопротивления дуги при междуфазном коротком замыкании // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2015. – № 5-6. – С. 157-162.

63. Terzija V. V., Koglin H. J. On the Modeling of Long Arc in Still Air and Arc Resistance Calculation // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 3. – Pp. 1012-1017.

64. Висящев А. Н., Умаров Р. И., Федосов Д. С. Разработка моделей цифровых реле сопротивления с различными алгоритмами и сравнительный анализ их работы в переходных режимах // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Иркутск, 20-24 апреля 2021 года. – Иркутск: ИРНИТУ, 2021. – Т. 1. – С. 72-77.

65. «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок». Приказ Минэнерго России от 03.08.2018 № 630, 16 с.

66. «Об утверждении требований к каналам связи для функционирования релейной защиты и автоматики». Приказ Минэнерго России от 13.02.2019 № 97, 19 с.
67. Скитальцев В. С. Высокочастотные каналы релейной защиты. приемопередатчик ПВЗ-90М //СПб.: Центр подготовки кадров энергетики. – 2005.
68. Информация о результатах функционирования устройств РЗА в ЕЭС России [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.soups.ru/functioning/tech-base/rza/rza-account-analys/rza-results-info/2024> (дата обращения: 12.12.2024).
69. Аракелян А. Г. Преимущества и недостатки волоконно-оптической связи //Научное Образование. – 2020. – №. 3. – С. 303-305.
70. Мамлеев А. А. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение для расчета магнитных полей // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – 2022. – С. 175.
71. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Пелевин Д. Е., Яковенко В. М. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока //Технічна електродинаміка. – 2012– № 1. – С. 3-9.
72. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Пилюгина О. Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи //Технічна електродинаміка. – 2014. – №. 5. – С. 11-13.
73. Moro F., Turri R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – No. 2. – Pp. 1042–1048.
74. Moro F., Turri R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment // Progress In Electromagnetics Research B. – 2012. – Vol. 37. – Pp. 343–364.
75. Новобрицкий В. А., Федосов Д. С. Применение датчиков магнитного поля в качестве измерительных органов для устройств релейной защиты // Электроэнергетика глазами молодежи – 2023. Том 1. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 264-267.

76. Асанов А. А., Шайдуллаев Р. Б., Дегай С. В., Орозов К. К. Обзор одноцепных и двухцепных металлических опор // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2017. – №. 3. – С. 190-194.

77. Меерович Э. А., Назаров П. А., Карабаев Г. Х., Кокуркин Б.П. Измерение токов линий высшего напряжения по его магнитным полям //Электричество. – 1980. – №. 7. – С. 32-40.

78. Меерович Э. А., Назаров П. А. Авторское свидетельство № SU 610426 СССР. МПК G01R 9/00, G01R 27/16. Фильтр токов обратной последовательности: № 1616395: заявл. 29.01.1971: опубл. 30.07.1981

79. Кузник Ю.С. Авторское свидетельство № SU 1030746 A1 СССР. МПК H02H 3/16, G01R 29/16. Фильтр тока нулевой последовательности для трехфазной воздушной линии электропередачи: № 3418316: заявл. 07.04.1982: опубл. 23.07.1983.

80. Висящев А. Н. Исследование и улучшение характеристик защит линий 500 кВ. с каскадными трансформаторами тока: ики: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.00.00/ Висящев Александр Никандрович. - Томск., 1970. - 23 с

81. Chen K. L. Intelligent contactless current measurement for overhead transmission lines //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2022. – Т. 13. – №. 4. – С. 3028-3037.

82. Chen K. L., Chen N. A new method for power current measurement using a coreless Hall effect current transformer //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2010. – Т. 60. – №. 1. – С. 158-169.

83. Chen N., Chen K. L., Tsai Y. P. Replacing current transformers with power current microsensors based on hall ICs without iron cores //2010 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems. – IEEE, 2010. – С. 22-26.

84. Selva K. T., Forsberg O. A., Merkoulouva D., Ghasemifard F. Non-contact current measurement in power transmission lines //Procedia Technology. – 2015. – Т. 21. – С. 498-506.

85. Самарин А. В., Рыгалин Д. Б., Шкляев А. А. Методы измерения тока в проводах системы мониторинга высоковольтных воздушных ЛЭП // Естественные и технические науки. – 2012. – № 5(61). – С. 349-359.
86. Сирота И. М. Схемы индукционного измерения тока в трехфазных цепях высокого напряжения // Электричество, 1967. № 4. С.22-24.
87. Бабаназарова Н. К., Жумабоев С. Х. Дистанционный электромагнитный преобразователь больших токов трехфазных высоковольтных линий //Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации. – 2019. – С. 132-137.
88. Селивахин А. И., Пронникова М. И., Якубовский Д. Д. Авторское свидетельство № SU 559188 A1 СССР. МПК H02H 3/08, G01R 15/06. Устройство для измерения токов линии электропередачи: № 2131020: заявл. 06.05.1975: опубл. 25.05.1977.
89. Буряк В. А. Обзор принципов выполнения устройств, заменяющих высоковольтные трансформаторы тока. М.: Информэнерго, 1971. - 61с.
90. Remote Measuring System № 2,724, 821 Nov.22 1955. Патент США.
91. Rzayeva S. V., Guseynova I. A. Application of automatic monitoring and control systems for reliability of power transmission lines //Reliability: Theory & Applications. – 2024. – Т. 19. – №. 2 (78). – С. 64-69.
92. Shafiq M., Stewart B. G., Hussain G. A., Hassan W. A. Design and applications of Rogowski coil sensors for power system measurements: A review //Measurement. – 2022. – Т. 203. – С. 112014.
93. Shi Y., Xin Z., Loh P. C. A review of traditional helical to recent miniaturized printed circuit board Rogowski coils for power-electronic applications //IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Т. 35. – №. 11. – С. 12207-12222.
94. Фесенко М. Е., Скорик В. Г. Катушка Роговского как альтернативный измерительный орган в релейной защите //Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2021. – Т. 2. – С. 63-67.

95. Новожилов Т. А., Новожилов А. Н., Попов А. П. Максимальная токовая защита на герконе //Омский научный вестник. – 2015. – №. 3 (143). – С. 251-254.
96. Клецель М. Я., Машрапов Б. Е., Исабеков Д. Д., Амренова Д. Т. Релейная защита на герконах без трансформаторов тока // Электротехника. – 2022. – № 4. – С. 39-45. – DOI 10.53891/00135860_2022_4_39.
97. Mashrapov B. E. Improving the reliability of diagnosing reed switch-based overcurrent protection circuits //2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – IEEE, 2020. – С. 1-5.
98. Molnár J., Kováčová I. Distance remote measurement of magnetic field // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2007. – Т. 7. – №. 1. – С. 4.
99. Лебедев В. Д. Разработка магнитотранзисторных датчиков тока для систем защиты и измерений: ики: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02/ Лебедев Владимир Дмитриевич. - Иваново., 1997. - 18 с
100. Лебедев В. Д., Филатова Г. А., Нестерихин А. Е. Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики //Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем. – 2013. – С. 167-173 с
101. Barukin A., Kaltayev A., Lenkov Y. Majority voting schemes of differential protections without current transformers with functional diagnostics for converting units and electric motors //2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2020. – С. 1-5.
102. Кобус А. В., Тушинский Я. А. Датчики Холла и магниторезисторы. М.: Энергия, 1967. – 230 с
103. Полищук А. Е. Некоторые применения линейных интегральных датчиков Холла компании Allegro Microsystems //Компоненты и технологии. – 2006. – №. 60. – С. 96-100.
104. Меерович Э. А., Андреевская Л. И. Групповая работа датчиков Холла, находящихся в оптимальном режиме // Электричество. 1974. №4. С.69-72.

105. Харламов В. А. Эффективная организация цифровых каналов связи для устройств РЗА и ПА //Электроэнергия. Передача и распределение. – 2013. – №. 3. – С. 92-93.

106. «Об утверждении правил по охране труда при эксплуатации электроустановок». Приказ Минтруда России от 15.12.2020 № 903н, 68 с.

107. Бездушный Д. И. Методы распознавания аварийных режимов электротехнических комплексов на основе имитационного моделирования и алгоритмов анализа данных: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Бездушный Дмитрий Игоревич. - М., 2022. - 22 с

108. Асмоловский В. Е. Новейшие методы оптимизации затрат предприятия с использованием искусственного интеллекта и информационных технологий //Теория и практика общественного развития в свете современного научного знания. – 2023. – С. 8-16.

109. Певнева А. Г., Калинин М. Е. Методы оптимизации // СПб: Университет ИТМО. – 2020.

110. Кныш Д. С., Курейчик В. М. Параллельные генетические алгоритмы: обзор и состояние проблемы // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2010. – №. 4. – С. 72-82.

111. Чертков А. А., Вардомская А. А., Дмитриев А. А. Рекурсивный метод оптимизации логистических путей средствами MATLAB //Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала СО Макарова. – 2015. – №. 6 (34). – С. 196-204.

112. Беляева М. А. Применение ППП MATLAB для решения экономико-математических задач оптимизации // Информатика: проблемы, методология, технологии. Информатика в образовании: материалы XVIII Международной школы-конференции, Воронеж, 08–09 февраля 2018 года. Том 7. – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью "Вэлборн", 2018. – С. 180-183. – EDN YUTMNO.

113. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шапиро И. М. Справочник по проектированию электрических сетей. -М.: Изд-во ЭНАС, 2007. -352 с.

114. Карабцев С. Н., Стуколов С. В. Построение диаграммы Вороного и определение границ области в методе естественных соседей //Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – №. 3. – С. 65-80.

115. Шляга А. Ю. Многокритериальная оптимизация // Вестник Московского государственного университета печати. – 2016. – №. 1. – С. 99-102.

116. Roberts J. J. et al. Gatoobox: a matlab-based genetic algorithm toolbox for function optimization //The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission–Clagtee. – 2017.

117. Cao Y. J., Wu Q. H. “Teaching Genetic Algorithms Using Matlab,” Int. Eng. Eductaion, vol. 36, pp. 139–153, 1999. doi.org/10.7227/IJEEE.36.2.4

118. Tamaki H., Kita H., Kobayashi S. Multi-objective optimization by genetic algorithms: A review //Proceedings of IEEE international conference on evolutionary computation. – IEEE, 1996. – С. 517-522.

119. Busacca P. G., Marseguerra M., Zio E. Multiobjective optimization by genetic algorithms: application to safety systems //Reliability Engineering & System Safety. – 2001. – Т. 72. – №. 1. – С. 59-74.

120. Дегтярев А. А., Кужеков С. Л., Дони Н. А., Шурупов А. А. Анализ и проверка соответствия характеристик трансформаторов тока класса Р условиям функционирования первых ступеней дистанционных защит линий электропередачи при переходных процессах //Электрические станции. – 2020. – №. 3. – С. 43.

121. Воробьев Е. С., Иванов Н. Г., Степанова Д. А., Петряшин И. Е. Функционирование дистанционной защиты при близких коротких замыканиях с насыщением трансформаторов тока //Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. – 2022. – С. 366-373.

122. Рекомендации по выбору уставок функции продольной ДЗЛ [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://ekra.ru/product/rz-ps-110-750kv/srza/sh-lin/> (дата обращения: 03.04.2025).

123. Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е. Горение наночастиц алюминия (обзор) //Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51. – №. 2. – С. 37-63.

124. Полетаев Н. И., Флорко А. В. Излучательные характеристики пылевого факела алюминия. Конденсированная фаза //Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43. – №. 4. – С. 49-58.

125. Ruesch M. D. Characterization of the influence of aluminum particle size on the temperature of composite-propellant flames using CO absorption and AlO emission spectroscopy //Proceedings of the Combustion Institute. – 2021. – Т. 38. – №. 3. – С. 4365-4372.

126. Квитка В. Е., Корх А. В. Создание детектора молний для Международной космической станции //Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – Т. 66. – №. 1. – С. 42-49.

127. Позаненко А. С. и др. Регистрация молниевой активности в проекте Конвергенция: научные задачи и ожидаемы результаты //Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции" Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – 2017. – С. 462-462.

128. Новобрицкий В. А., Федосов Д. С. Применение защиты «мёртвой зоны» для начального участка воздушной линии электропередачи малой протяжённости // Планирование и управление электроэнергетическими системами : материалы XV научно-практической конференции имени В. Н. Ясникова: Кемерово: ОДУ Сибири, 10 сентября 2024 года. – С. 65-69.

129. Измеритель электромагнитного поля «ПЗ-70/1» [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.istu.edu/oborudovanie/element/46352/> (дата обращения: 04.01.2025).

130. Медяков Е. А. Автоматическое тестирование трехфазных дифференциальных защит с помощью комплексов РЕТОМ-61/71 //Релейная защита и автоматизация. – 2019. – №. 3. – С. 51-55.

131. Басова А. Е., Шуин В. А. Анализ методики расчета тока небаланса в продольной дифференциальной токовой защите //Электроэнергетика глазами молодежи-2017. – 2017. – С. 341-344.

132. Набатов К. А., Афонин В. В. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств: учеб. пособие // Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ. – 2010.

133. Смоловик С. В., Халилов Ф. Х. Выбор оптимальных длин и сечений, рабочего напряжения и передаваемой мощности в сетях 0.38-110 кВ // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – №. 5. – С. 155-163.

134. Есенбаев С. Х. Современное оборудование для энергетиков // Автоматика. Информатика. – 2008. – №. 1-2. – С. 55-57.

135. Khalighi M. A., Uysal M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – Т. 16. – №. 4. – С. 2231-2258.

136. Уймин А. А. Беспроводной защищенный канал передачи данных «Оптическая Система Связи ОСС» // Связь в Вооруженных Силах Российской Федерации-2010. М.: ООО «Компания «Информационный мост». 2010. С. 156.

137. ГОСТ Р 53363-2009. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. – М. Издательство стандартов, 2009. – 41 с.

138. Бережной Д. Н., Кульбикаян Х. Ш., Мищенко Е. Н. Особенности применения атмосферных оптических линий связи в структуре РЖД // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – №. 1. – С. 62-69.

139. ГОСТ ИЕС 60050-713-2017. Международный электротехнический словарь. Радиосвязь: приемники, передатчики, сети и их режимы работы. – М.: Стандартиформ, 2017. – 64 с.

140. Кузнецов С. Н., Огнев Б. И., Поляков С. Ю. 4,5 километра FSO-соединения с операторской надёжностью. Практические результаты // Технологии и средства связи. – 2008. – № 6. – С. 47-49

141. Журавлёв Д. А., Загудаев Д. А., Бойко А. П. Оценка энергетического потенциала атмосферной оптической линии связи для определения возможности расширения диаграммы направленного действия оптических систем. //

Инновационная деятельность в вооруженных силах российской федерации. – 2020. – № 1. – С. 102-105

142. Полянский С. В., Игнатов А. Н. Определение дистанции атмосферного канала связи с заданным коэффициентом готовности для г. Новосибирска // Вестник СибГУТИ. – 2009. – №. 4. – С. 73-82.

143. Антропов Д. А. Перспективные системы радиорелейной связи военного (двойного) назначения на основе применения лазерных телекоммуникационных технологий // Военная мысль. – 2020. – №. 11. – С. 85-95.

144. Новобрицкий В. А., Федосов Д. С. Применение атмосферной оптической линии в качестве канала связи для устройств релейной защиты // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Иркутск: ИРННТУ, 2024. – С. 250-255.

145. Pachedjieva B., Grigorova C. Influence of the Atmospheric turbulence on Free- Space Optics power design // Научни трудове на Съюза на учените- Пловдив. Серия В: Техника и технологии. – 2016. – Vol. 13. – P. 149-152.

146. Молчанов С. В., Дашинский А. В. Эффективность применения многоканальной системы в атмосферно-оптических линиях связи // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. – 2010. – № 4. – С. 58-64.

147. Тобышева С. В. Факторы, влияющие на качество сигнала в беспроводных атмосферных оптических линиях связи // E-Scio. – 2020. – № 11(50). – С. 90-94.

148. ВЕ-метр. Модификация «АТ-004» и «50Гц» с блоком управления «НТМ-Терминал» [Электронный ресурс]. Режим доступа URL:<https://ntm.ru/products/44/8310> (дата обращения: 18.12.2024).

149. В-50-2 Измеритель магнитного поля промышленной частоты [Электронный ресурс]. Режим доступа URL:<https://ntm.ru/products/44/8410> (дата обращения: 18.12.2024).

150. Аблаев А. Т. Разработка и исследование магниточувствительных преобразователей тока для электроэнергетики: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.11.16 / Аблаев Амет Талытович. - М., 1994. - 18 с

151. Вайс Г. А. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение. М: Энергия, 1974. – 384 с.

152. Игнатьев А. А., Куликов М. Н., Маханьков А. В. Магнитометрия слабых магнитных полей //Гетеромагнитная микроэлектроника. – 2013. – №. 15. – С. 11-32.

153. Трошин А. В., Трошин С. В. Перспективы применения композиционных магнитоэлектрических структур при разработке современных датчиков //Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2006. – №. 2. – С. 10-14.

154. Назаров П. А. Исследование и разработка первичных магниточувствительных информационно-измерительных систем для электроэнергетики: автореф. дис. ... доктора. тех. наук: 05.14.02 Назаров Полат Аршинович /. - М., 1992. - 39 с

ПРИЛОЖЕНИЕ А ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

А.1 Современные устройства измерения магнитного поля промышленной частоты на основе датчика Холла

К современным ДМП, способным производить замеры магнитных полей промышленной частоты, относятся такие отечественные устройства как ВЕ-метр, В-50-2, или зарубежное PCE-MFM 3000.

Хоть нижеуказанные устройства по области применения относятся к измерителям магнитного поля промышленной частоты, но они используются для контроля санитарно-гигиенических требований, а также с целью контроля магнитного поля для проведения диагностики состояния электротехнического оборудования и непригодны для использования для замеров, необходимых устройству РЗ. Примеры показывают, что современный уровень технического прогресса позволяет производить и создавать ДМП, удовлетворяющие требованию необходимого диапазона измерения, работе с полями промышленной частоты ЛЭП на открытой местности, а также при небольшом улучшении технических показателей данных ДМП можно значительно снизить их погрешности измерений. Произведен обзор существующих современных отечественных и зарубежных ДМП, посредством которых можно производить измерение магнитного поля промышленной частоты возле ЛЭП.

Измерители параметров магнитного поля - трёхкомпонентные датчики «ВЕ-метр» предназначены для измерения НМП вблизи промышленных объектов для соблюдения санитарно-эпидемиологических требований к воздействию магнитных полей в производственных и бытовых условиях. Принцип действия измерителей состоит в преобразовании измеряемого переменного магнитного поля с помощью трёхкомпонентных датчиков в виде антенны в колебания ЭДС, частотной фильтрации и усилении этих колебаний с последующей оцифровкой и

анализом сигналов непосредственно в самом устройстве [148]. Общий вид измерителя представлен на рисунке А.1.



Рисунок А.1 – Общий вид измерителей параметров магнитного поля трёхкомпонентный «ВЕ-метр»

Метрологические характеристики устройства приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Метрологические характеристики устройства «ВЕ-метр» для параметров магнитного поля

Диапазон частот	От 48 Гц до 52 Гц
Диапазон измерения среднеквадратичных значений НМП	От 800 мА/м до 4 кА/м (от 1 мкТл до 5 мТл)
Предел допускаемой относительной погрешности измерения среднеквадратичных значений НМП	$\pm 10\%$

Устройство производит измерение НМП по каждому направлению трёхкоординатного датчика Холла, где каждый замер ортогональной составляющей X, Y и Z пропорционален электрическому сигналу выражающим каждую компоненту. Измеряемые метрологические показатели В-50-2 показаны в таблице А.2.

Измеритель НМП промышленной частоты В-50-2. Общий вид устройства представлен на рисунке А.2.



Рисунок А.2 – Внешний вид измерителя В-50-2

Таблица А.2 – Метрологические характеристики устройства В-50-2 для параметров магнитного поля

Наименование характеристики	Значение
Диапазон частот	От 49 до 51 Гц
Диапазон измерения среднеквадратичных значений модуля НМП	от 0,05 до 150 мТл (от 0,04 до 120 кА/м)
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения среднеквадратичных значений модуля НМП	$\pm 10\%$

Основными компонентами измерителя являются: блок индикации с LCD-экраном, изотропный датчик в виде антенны. Данные измерений представляются в единицах индукции магнитного поля (мТл) или в НМП (кА/м). Перевод одной системы в другую производится по формулам: $1 \text{ кА/м} = 1,26 \text{ мТл}$, $1 \text{ мТл} = 0,8 \text{ кА/м}$ [149].

Зарубежное устройство PCE-MFM 3000. Представляет собой портативный магнитометр, который реагирует на НМП, создаваемую как постоянным током (DC), так и переменным (AC). Отображает результаты измерений в гауссах (Гс) или миллитеслах (мТл). Данное портативное устройство для измерения магнитного поля поставляется с внешним датчиком и имеет порт RS-232 для загрузки данных на персональный компьютер. Представлено на рисунке А.3. Метрологические характеристики устройства PCE-MFM 3000 представлены в таблице А.3.



Рисунок А.3 – Внешний вид магнитометра PCE-MFM 3000

Таблица А.3 – Метрологические характеристики PCE-MFM 3000 для параметров магнитного поля

Наименование характеристики	Значение
Диапазон частот	50/60 Гц
Диапазон измерения среднеквадратических значений модуля магнитной индукции магнитного поля (НМП)	от 0 до 150 мТл (от 0 до 1500 Гаусс)
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения среднеквадратических значений модуля магнитной индукции магнитного поля (НМП)	$\pm 5\%$

А.2 Факторы погрешностей и способы их устранения для датчиков магнитного поля на основе эффекта Холла

Преобразователи на основе эффекта Холла позволяют получать замеры эквивалентного результирующего значения НМП от одного или нескольких проводников в точке своей установки. Однако существует несколько проблем, связанных с возможностью измерения магнитных полей рассматриваемой ЛЭП сверхвысокого напряжения. К ним относятся:

1. Необходимость замера слабых магнитных полей в связи с тем, что при повышении напряжения рассматриваемой ЛЭП при прочих равных параметрах уменьшаются рабочие токи и токи КЗ, а также с тем, что ДМП необходимо

размещать на более дальних расстояниях от проводов по условию безопасности проведения замеров.

2. Влияние температуры окружающего воздуха на параметры магниточувствительности полупроводниковой пленки преобразователей Холла, что приводит к искажению замеров и изменению постоянной Холла, от которой зависит связь измеряемого напряжения на выходе устройства с изменением магнитного поля.

3. Влияние случайных помех от блуждающих токов, импульсных токов кратковременных перенапряжений, токов молнии, помех, вызванных источниками питания преобразователей Холла, наводок в соединительных кабелях выходных цепей датчиков, временных изменений характеристик ДМП и измерительного тракта в целом. При возникновении замыканий, связанных с током нулевой последовательности возникают помехи от токов в земле.

4. Погрешности, связанные с влиянием токов соседних смежных ЛЭП разного уровня напряжения, а также погрешности, вызванные отклонением параметров по координатам размещения ДМП по двум сторонам ЛЭП.

5. Наличие фактора смещения проводов при ветровых нагрузках, а также изменения их стрелы провеса при различных температурах воздуха или возникновении наледей из-за гололеда.

Вопрос разработки ДМП, у которых снижены или полностью ликвидированы вышеуказанные факторы, оказывающие влияние на погрешность измерения, приведены в диссертационной работе Аблаева А.Т. [150] посвятившего исследование вопросу разработки ДМП, максимально пригодных для замеров магнитного поля высоковольтных ЛЭП и используемых в устройствах РЗ.

Для защиты от влияния внешних магнитных полей токов параллельных ЛЭП разработаны магниточувствительные преобразователи тока, реагирующие на разность индукции магнитного поля в двух точках. Они обладают более высокой помехозащищённостью и направленностью действия. Дифференциальные магниточувствительные преобразователи тока обладают погрешностью

преобразования тока высоковольтной ЛЭП в районе 8-10%, что удовлетворяет требованию современных релейных защит линий 35-110 кВ.

Известны также магниточувствительные преобразователи тока, где в качестве усилителей магнитного поля использованы концентраторы магнитного поля, представляющие собой ферромагнитные элементы оптимальной формы, между зазорами которых помещаются ДМП. Совокупность применения концентраторов и ДМП позволяют получать точные сигналы по фазе и форме тока ЛЭП при возникновении КЗ, что даёт возможность их использования в цепях быстродействующих устройств РЗ. Для устранения температурной погрешности датчиков с преобразователями Холла предложены множество способов, которые усложняют схемы устройства и уменьшают надежность. Кроме того, при использовании концентраторов следует учесть увеличение рассеиваемой тепловой мощности с поверхности последних.

Основная трудность, возникающая при измерении токов высоковольтных ЛЭП по их магнитному полю, заключается в том, что магниточувствительные преобразователи тока, произвольно размещённые под проводами линии, реагируют на магнитные поля токов всех проводов ЛЭП, а также токов в земле. Исследованы дифференциальные магниточувствительные преобразователи тока, реагирующие на разность вертикальных составляющих индукции магнитного поля проводов с током.

Разработаны новые конструкции дифференциальных ДМП, реагирующих на линейную комбинацию вертикальных и горизонтальных составляющих индукции магнитного поля. На рисунке А.4 показана конструкция нового магниточувствительного преобразователя тока для запуска устройства РЗ, расширяющая функциональные возможности магниточувствительного преобразователя тока за счет одновременной регистрации тока и направления мощности и снижения влияния помех от токов соседних проводов, токов в земле и других внешних электромагнитных полей.

Магниточувствительный элемент содержит U-образный магнитопровод 1, на ответвляющихся стержнях 2 которого расположены преобразователи Холла 3 и

индукционные катушки 4. Ответвляющиеся стержни 2 U-образного магнитопровода 1 закреплены шарнирно, что позволяет изменять угол их ориентации по отношению к проводам высоковольтной ЛЭП. Индуктивные катушки включаются по схеме суммирования выходного сигнала и служат для измерения тока контролируемой линии. Токовые электроды преобразователей Холла 3 включены на выход ТН, поэтому на выходе преобразователей Холла, включенных по схеме суммирования, получается сигнал, пропорциональный направлению мощности, который регистрируется реагирующим органом.

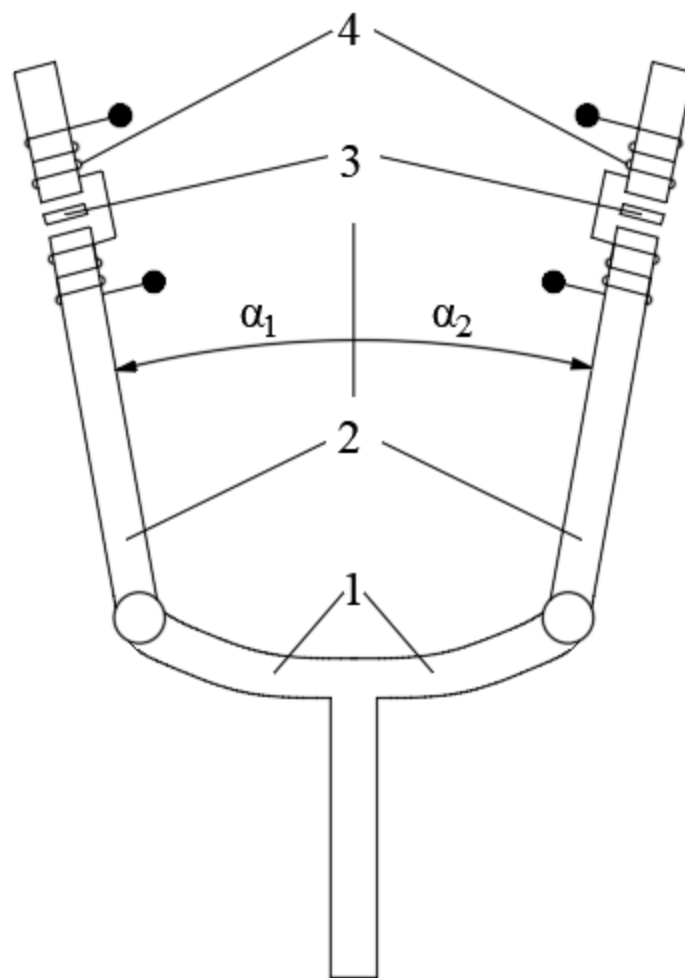


Рисунок А.4 – Дифференциальный ДМП для запуска устройства РЗ

В вышеуказанной работе рассмотрен вопрос выбора параметров дифференциальных ДМП и их размещение под проводами высоковольтной ЛЭП с точки зрения минимизации суммарной погрешности преобразования, вызванной

помехами токов соседних фаз линии, внешними электромагнитными полями, токами в земле, а также неточностью размещения ДМП под проводами ЛЭП. При использовании компенсирующих ДМП влияние магнитного поля токов соседних фаз и грозозащитных тросов на показания МПТ может быть сведено до минимума. Для выявления случайных помех наиболее прост способ сравнения результатов двойных измерений токов с помощью ДМП. Для реализации этого способа контролируемый ток измеряется с разных точек пространства с помощью двух комплектов ДМП, и сравниваются результаты измерений. При отсутствии случайных помех результаты измерений с двух комплектов ДМП совпадают, а при наличии помехи указанные результаты различаются.

Чувствительность существующих преобразователей Холла находится на промежутке от 5 до 80 мкВ·м/А² [151], поэтому их выходной сигнал в магнитных полях ЛЭП высокого напряжения не превышает сотни микровольт. Передача столь слабых сигналов в условиях распределительных устройств электрических станций и подстанций представляет значительную трудность. Для усиления сигналов можно использовать электронные усилители. Однако последние из-за необходимости устранения собственных шумов, возникающих при усилении малых входных сигналов, получаются достаточно сложными и ненадёжными.

Значительно более прочным и надежным является усилитель измеряемой индукции магнитного поля. Он представляет собой длинный и тонкий стержень из ферромагнитного материала с большой магнитной проницаемостью и с зазором посередине, перпендикулярным его оси. Индукция магнитного поля в зазоре при достаточно малых его размерах в сотни раз больше индукции внешнего возбуждающего поля [152]. Такой усилитель в диапазоне измеряемых величин не создает дополнительных шумов и обеспечивает измерение проекции вектора индукции магнитного поля на ось датчика. Время переходного процесса поля в зазоре определяется в основном вихревыми токами в стержне, и в случае выполнения последнего из материала с высоким удельным сопротивлением, например, из феррита, невелико – порядка $10^{-6} - 10^{-7}$ с [153].

Известно, что широкому применению преобразователей Холла в точных приборах препятствует дрейф их основных параметров при изменении температуры окружающей среды. Существует множество способов, позволяющих устранить частично или полностью этот дрейф. Эти способы компенсации могут быть представлены в виде двух групп: термостатирование преобразователей Холла и схемные решения. Однако указанные способы компенсации температурной погрешности усложняют схемы устройства.

С учётом того, что температурный коэффициент постоянной Холла гальваномагнитных преобразователей и температурный коэффициент относительной магнитной проницаемости некоторых ферромагнитных материалов, например, феррита, имеют противоположные знаки, в существующих устройствах ДМП предложен способ компенсации температурной погрешности различных устройств, содержащих ферромагнитные сердечники и преобразователи Холла.

Зависимость относительной магнитной проницаемости ферритов марок 400НН, 600НН, 700НМЗ от температуры в диапазоне $(-40+120^{\circ}\text{C})$ можно представить в виде $\mu(t) = \mu_{n0} + v_1 t$, где v_1 – коэффициент, зависящий от марки феррита. Для практических расчетов зависимость постоянной Холла для преобразователей Холла, изготовленных из арсенида индия, в диапазоне температуры $-40^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$ можно представить в виде $R_d(t) = R_0 + v_2 t$, где v_2 – коэффициент, зависящий от материала и размеров преобразователя Холла. Тогда ЭДС Холла датчика, размещенного в зазоре между двумя ферромагнитными стержнями, будет определяться по формуле А.1 [150].

$$e_x(t) = \frac{0,745 \cdot B_0 \cdot I_y \cdot (R_0 - v_2 t)(\mu_0 + v_1 t)(l - l_3)}{0,745 \cdot l_3 \cdot (\mu_0 + v_1 t) + l \cdot \left[1 + 0,765 d^2 \cdot (\mu_0 + v_1 t) \frac{l_n \frac{2l_d}{d} - 1}{l_n^2} \right]} \quad (\text{A.1})$$

где B_0 – магнитная индукция внешнего магнитного поля, μ_0 – начальная магнитная проницаемость определенной марки феррита при стандартной температуре 20°C ,

R_0 – начальная постоянная Холла при стандартной температуре 20°C. I_y – величина тока управления датчика Холла, l_n и d – длина и диаметр ферромагнитного усилителя, l_3 – расстояние между стержнями усилителя, l_d – длина датчика Холла, l – общая длина усилителя с учетом длины магнитного зазора.

Основное достоинство представленного в работе метода термокомпенсации – простота и автоматическая, без каких-либо дополнительных элементов, взаимокompенсация параметров, реагирующих на изменение температуры с противоположными знаками.

Возможная погрешность измерения из-за ошибки в месте установки ДМП. Неточность размещения ДМП под линией может быть обусловлена неточностью монтажа и изменением стрелы провеса проводов под действием температуры окружающей среды и других природных факторов. При этом отклонения параметров от расчетных значений x , y могут составлять соответственно Δx , Δy . Одним из вариантов решения данной проблемы может быть установка рассматриваемых ДМП возле опорных изоляторов первой линейной опоры защищаемой ЛЭП. В данной работе указано [154], что проводились испытания бесконтактной системы токов ЛЭП через ДМП. Измерения производились в течение 7 месяцев при разных погодных условиях, что дало возможность проверить работоспособность бесконтактной системы на промежутке температуры от +26 до -23°C. Для измерения относительной и угловой погрешностей в стационарных и квазистационарных режимах в качестве сравниваемого (образцового) сигнала был принят сигнал ТТ класса точности 0,5 указанной ЛЭП. Ближайшее расстояние между проводами ЛЭП 18,5 м. Расстояние от провода ЛЭП 750 кВ до ДМП по соображениям безопасности обслуживания было принято равным 12 м. Датчики крепились на дюралевах мачтах, позволяющих регулировать угол наклона ДМП и высоту их расположения. Выходные сигналы соответствующих фаз ДМП и ТТ поступали на шлейфовый осциллограф, самопишущие приборы, электронные вольтметры, многолучевой электронный осциллограф. Поскольку по осциллограмме трудно

было определить угловую погрешность устройства в интервале долей градуса, определение угловой погрешности производилось с помощью потенциометра по схеме повышенной точности. Результаты измерений показали, что в вышеуказанном диапазоне температур и при различных значениях токов ЛЭП угловая погрешность не превышает $2,7^\circ$, а относительная токовая погрешность 6%.

Для определения погрешности бесконтактной системы измерения от изменения стрелы провеса проводов ЛЭП с помощью теодолита ТБ-1 контролировалась стрела провеса при различных температурах окружающей среды. В результате расчетов получено, что за счет провеса проводов ЛЭП в указанном диапазоне температур погрешность устройства может составлять 4,75%, поэтому при расположении ДМП ближе к опорным изоляторам относительная погрешность измерителя существенно уменьшается.

Как показала практика, при монтаже ДМП возле опорных изоляторов можно с достаточной точностью удовлетворить равенство $\Delta x=0$, $\Delta y=0$. В дополнении к этому можно использовать жесткую ошиновку на том участке ЛЭП, рядом с которым будут установлены ДМП, чтобы полностью ликвидировать влияние данного негативного фактора на проведение замеров.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА КООРДИНАТ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОПОР ЛИНИЙ 35 кВ

*— Параметр высоты по оси ординат может быть скорректирован в зависимости от длины изоляторов, на которых установлены фазные провода, и отклонении высоты опоры от стандартной величины, указанной заводом-изготовителем

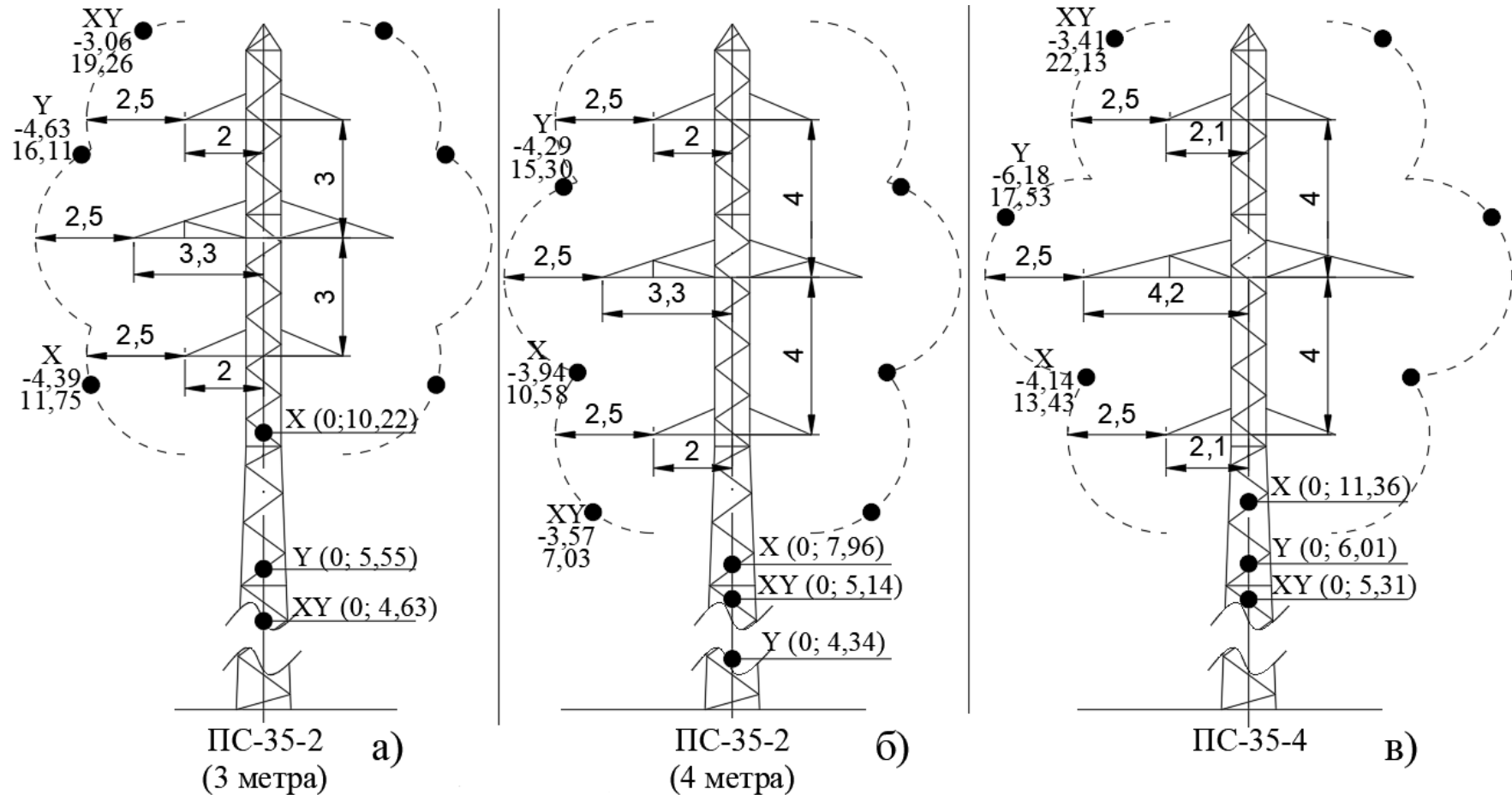


Рисунок Б.1 – Оптимальные координаты размещения ДМП, реагирующих на вертикальную (X), горизонтальную (Y) составляющие НМП. Размещения ДМП X и Y в одной точке (XY): а) ПС-35-2 (3 метра), б) ПС-35-2 (4 метра) в) ПС-35-4

ПРИЛОЖЕНИЕ В ПАТЕНТЫ И СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 220793

УСТРОЙСТВО СПЕКТРАЛЬНО-ДУГОВОЙ ЗАЩИТЫ

Патентообладатель: **Новобрицкий Владислав Александрович (RU)**

Авторы: **Новобрицкий Владислав Александрович (RU),
Федосов Денис Сергеевич (RU)**

Заявка № **2022126870**

Приоритет полезной модели **14 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **03 октября 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **14 октября 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025617138

**Программа для расчёта и визуализации напряжённости
магнитного поля, создаваемого воздушными ЛЭП
высокого напряжения**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический
университет» (RU)*

Авторы: *Федосов Денис Сергеевич (RU), Новобрицкий
Владислав Александрович (RU), Давыдов Владимир Юрьевич
(RU)*

Заявка № 2025615016

Дата поступления 13 марта 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 марта 2025 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0d92e7c1a6300b54240f670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025617136

**Программа управления прототипом дифференциально-
фазной защиты ЛЭП с применением атмосферной
оптической линии связи**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический
университет» (RU)*

Авторы: *Федосов Денис Сергеевич (RU), Анненков Евгений
Олегович (RU), Новобрицкий Владислав Александрович (RU)*



Заявка № 2025614994

Дата поступления 13 марта 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 марта 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0492e7c1a6300b544240670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», к.х.н., доцент



В.В. Смирнов

«26» февраля 2025 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
аспиранта гр. аЭЭС-21-1 **Новобрицкого Владислава Александровича**
на тему «**Разработка способов выполнения релейной защиты воздушных линий**
электропередачи на основе измерений магнитного поля и оптических сигналов»,
представляемой на соискание учёной степени кандидата технических наук

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Новобрицкого В.А. используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» при подготовке обучающихся по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, магистерская программа «Электрические станции, системы и сети», а именно:

- программа для расчёта и визуализации магнитного поля используется при проведении практических занятий по дисциплине «Электромагнитная совместимость и кибербезопасность в электроэнергетике»;
- разработанный прототип защиты с атмосферно-оптической линией связи используется при проведении лабораторных работ по дисциплине «Релейная защита ЭЭС»;
- результаты разработки абсолютно селективной защиты линии электропередачи на основе измерения сигналов магнитного поля включены в курс лекций по дисциплине «Релейная защита ЭЭС».

Директор института энергетики,
к.т.н., доцент

Е.В. Самаркина

Научный руководитель,
заведующий кафедрой
электрических станций,
сетей и систем, к.т.н., доцент

Д.С. Федосов

Профессор кафедры
электрических станций,
сетей и систем, к.т.н., профессор

А.Н. Висящев



ИРКУТСКАЯ
ЭЛЕКТРОСЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ

Акционерное общество «Иркутская электросетевая компания» (АО «ИЭСК»)



АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяется, что результаты, содержащиеся в диссертационной работе Новобрицкого Владислава Александровича на тему «Разработка способов выполнения релейной защиты воздушных линий электропередачи на основе измерений магнитного поля и оптических сигналов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика, используются в АО «Иркутская электросетевая компания»:

- программа для расчета и визуализации магнитного поля, создаваемого высоковольтными линиями электропередачи, используется для составления карт напряженности магнитного поля и оценки допустимости длительного пребывания персонала в зоне влияния магнитного поля воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше;
- рассмотрена возможность установки датчиков магнитного поля рядом с однотипными опорами в начале и в конце линии электропередачи для проведения сбора и статистической обработки напряженности магнитного поля в рамках разработки пилотного образца защиты с абсолютной селективностью по измерению сигналов магнитного поля с выходным воздействием защиты на сигнал.

Заместитель главного инженера
по технологическому развитию
и инновациям

28 февраля 2025 г.



Ю.Н. Терских



Акционерное общество "ХОЛДИНГ ЭРСО" (АО "ХОЛДИНГ ЭРСО")
ИНН 7718013390 КПП 771801001 ОГРН 1027700157605 ОКПО 05758078
107023, г. Москва, ул. Электрозаводская, д. 21
Тел.: +7 965 927-58-17 E-mail: info@erso.group

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Новобрицкого Владислава Александровича
на тему «Разработка способов выполнения релейной защиты воздушных
линий электропередачи на основе измерений магнитного поля и
оптических сигналов»

Результаты диссертационной работы Новобрицкого Владислава Александровича «Разработка способов выполнения релейной защиты воздушных линий электропередачи на основе измерений магнитного поля и оптических сигналов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 «Электроэнергетика» переданы для использования в АО «ХОЛДИНГ ЭРСО» в виде моделей и результатов расчетов магнитного поля от одно- и двухцепных воздушных ЛЭП с применением разработанной автором программы для ЭВМ, а также рекомендаций для разработки прототипа предложенной автором абсолютно селективной защиты воздушных ЛЭП с применением бесконтактных датчиков магнитного поля.

Разработанная Новобрицким В.А. модель устройства спектрально-дуговой защиты для охвата «мертвых зон» ошиновок и начального участка воздушных ЛЭП будут использованы в практических целях при создании оптических измерительных трансформаторов тока, разрабатываемых АО «ХОЛДИНГ ЭРСО».

Директор Дивизиона
Энергетические Системы
к.т.н., доцент

26.02.2025 г.



И.Ю. Усов