

На правах рукописи

Бабырь Кирилл Валерьевич



**ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ
НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 кВ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ
НУЛЕВОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ**

*Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и
системы*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Устинов Денис Анатольевич

Официальные оппоненты:

Татевосян Андрей Александрович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», Энергетический институт, декан;

Зацепин Евгений Петрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра электрооборудования, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижевартовский государственный университет», г. Нижневартовск.

Защита диссертации состоится **24 декабря 2024 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 октября 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЖУКОВСКИЙ
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Один из наиболее распространенных видов аварий в электро-технических комплексах (ЭТК) напряжением 6-10 кВ предприятий минерально-сырьевого комплекса – это однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Своевременно неустроенный режим ОЗЗ приводит к значительным экономическим потерям и снижению надёжности функционирования ЭТК на промышленных предприятиях России. Режим однофазных замыканий на землю может вызвать поломку важного электрооборудования, нарушение технологических процессов и повышенный риск получения электротравм работниками. В связи с этим возникает необходимость разработки новых способов защиты от ОЗЗ, позволяющих минимизировать негативное влияние данного аварийного режима на работоспособность ЭТК. Однако переменные параметры контура нулевой последовательности, нестационарность параметров электротехнических комплексов и разнообразие режимов однофазного замыкания на землю усложняют реализацию защиты, обладающей необходимой чувствительностью и постоянством действия в рабочих условиях.

Степень разработанности темы исследования

Решением вопросов совершенствования способов защит в условиях существования однофазных замыканий на землю занимались отечественные и зарубежные ученые такие как: Кудрявцев А.А., Назаров В.В., Сирота И.Н., Шабад М.А., Абрамович Б.Н., Пеленев Д.Н., Жуковский Ю.Л., Федосеев А.М., Jeff Roberts, Dr. Hector J., Шадрикова Т.Ю., Шуин В.А. Несмотря на большое количество исследований и разработок в этой области, проблема создания селективной и чувствительной защиты от ОЗЗ в условиях постоянно изменяющихся параметров всего электротехнического комплекса остается открытой.

В этой связи представляется актуальной задача по разработке защиты от ОЗЗ, используя современные принципы построения систем релейной защиты и автоматики (РЗА). Это позволит создавать новые алгоритмы с требуемой селективностью и чувствительностью при однофазных замыканиях на землю в условиях изменчивости параметров

электротехнического комплекса при динамичности топологии системы электроснабжения.

Предмет исследования – селективность и чувствительность действия токовых защит от ОЗЗ электротехнических комплексов 6-10 кВ промышленных предприятий.

Объект исследования – электротехнический комплекс предприятий минерально-сырьевого сектора с изолированной или резистивно-заземлённой системой.

Цель работы – разработка селективной и чувствительной защиты в условиях существования кратковременных неустойчивых однофазных замыканий на землю (КрОЗЗ) при постоянно изменяющихся параметрах электротехнического комплекса.

Идея заключается в обеспечении необходимой селективности и чувствительности для защиты от однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах 6-10 кВ предприятий минерально-сырьевого сектора. Это достигается путем применения организационно технических мероприятий, направленных на разработку алгоритма, способного распознавать устойчивые (УОЗЗ), кратковременные неустойчивые, дуговые (ДОЗЗ) и неполные однофазные замыкания на землю в ЭТК с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью.

Поставленная в диссертации цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Выявить закономерности изменения параметров контура нулевой и обратной последовательностей в электротехнических комплексах 6-10 кВ угледобывающих предприятий в условиях устойчивых, кратковременных неустойчивых и дуговых ОЗЗ.

2. Разработать методы увеличения чувствительности защиты от однофазных замыканий в условиях высокой неоднородности и нестационарности параметров электротехнических комплексов с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью.

3. Разработать алгоритмы неизменного действия защиты от однофазных замыканий при изменении параметров электротехнических комплексов 6-10 кВ.

4. Создать структуру и реализацию аппаратно-программного комплекса для эффективного обнаружения аварийного режима в

условиях устойчивых, кратковременных неустойчивых и дуговых однофазных замыканий в электротехнических комплексах 6-10 кВ с изолированным или резистивным заземлением нейтрали.

Научная новизна работы:

1. Определены закономерности изменения электрических величин в электротехнических комплексах 6-10 кВ с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью в условиях существования режима ОЗЗ при вариации параметров относительной проводимости системы заземления нейтрали, что позволяет определить влияние составляющих обратной последовательности на селективность и чувствительность защиты от однофазных замыканий на землю.

2. Разработан метод выбора места установки разделительных трансформаторов на предприятиях минерально-сырьевого комплекса с изолированной нейтралью с целью повышения чувствительности защиты от однофазных замыканий на землю.

3. Разработан алгоритм повышения чувствительности защиты от ОЗЗ в условиях изменения параметров контура нулевой последовательности и нестационарности параметров электротехнических комплексов, основанный на измерении величин контура нулевой и обратной последовательностей.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по пунктам:**

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

2. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления.

3. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в

различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Получены сравнительные характеристики погрешностей методов расчёта тока ОЗЗ в ЭТК 6-10 кВ угледобывающих предприятий относительно экспериментальных значений.

2. Определены небалансы, существующие в электротехнических комплексах напряжением 6-10 кВ горных предприятий и установлены методы отстройки от них.

3. Разработаны алгоритмы действия защиты, предусматривающие селективную работу в режимах УОЗЗ, КрОЗЗ и ДОЗЗ в электротехнических комплексах 6-10 кВ с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью, основанные на измерении параметров контура нулевой и обратной последовательностей.

4. Определены зависимости между коэффициентом чувствительности защиты от ОЗЗ и переходным сопротивлением в месте замыкания, а также суммарной ёмкостью сети электротехнических комплексов промышленных предприятий 6-10 кВ.

5. Доказана эффективность использования резистивного заземления нейтрали в электротехнических комплексах предприятий минерально-сырьевого сектора для токовых ненаправленных защит путем анализа зависимостей коэффициентов чувствительности при изменении параметров контура нулевой последовательности и контура заземления нейтрали.

6. Разработана структура и реализация аппаратно-программной системы защит, на основе параметров нулевой и обратной последовательностей, применяемой в электротехнических комплексах промышленных предприятий 6-10 кВ. Данная система обладает повышенной селективностью выявления повреждённых присоединений в условиях устойчивых, кратковременных неустойчивых и дуговых однофазных замыканий на землю.

7. Результаты диссертации использованы в производственной деятельности АО «Шахта «Полосухинская» (акт внедрения от 02.02.2024 г.) и ООО «НПП «КИТ» (акт внедрения от 20.03.2024 г.) для повышения чувствительности и селективности защит от однофазных замыканий на землю.

8. Результаты диссертации подтверждены свидетельством о государственной регистрации патента на изобретение № 2769099 «Устройство селективной защиты от однофазных замыканий на землю электрических сетей среднего класса напряжения» от 29.10.2021 г.

9. Результаты диссертации подтверждены свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615131 «Программа для микропроцессорных терминалов защит от однофазных замыканий на землю электрических сетей среднего класса напряжения» от 02.03.2023 г.

10. Результаты диссертации подтверждены заявкой на регистрацию патента на изобретение № 2024109732 «Устройство токовой защиты обратной последовательности от однофазных замыканий на землю электрических сетей среднего класса напряжения» от 10.04.2024 г.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы имитационного моделирования в системе MatLab Simulink, численного анализа с использованием пакета MathCAD, экспериментального исследования путем физического моделирования в лабораторных условиях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Применение установленных закономерностей изменения коэффициента чувствительности в условиях вариации параметров относительной проводимости системы заземления нейтрали позволяют повысить чувствительность действия защит при кратковременных неустойчивых и дуговых однофазных замыканиях на землю в системах электроснабжения 6-10 кВ электротехнических комплексов горных предприятий.

2. Контроль тока обратной последовательности позволяет повысить чувствительность и селективность действия защиты в режиме однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью при повышенных значениях собственного ёмкостного тока отдельных присоединений.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается использованием математических методов обработки статистических данных, применением лицензионного программного обеспечения для проведения расчетов, а также данными экспериментальных исследований, направленных на определение зависимостей, возникающих при однофазных замыканиях на землю в контуре нулевой и обратной последовательностей электротехнических комплексов 6-10 кВ.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: 2021 IEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2021 ElConRus) (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); Международная научно-техническая конференция, посвященная 5-летию Института энергетики «Автоматизация, энергетика и машиностроение: технологии и инновации» (г. Грозный, 2024 г.); VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы энергетики» (г. Иваново, 2024 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии и последние достижения в энергетике, науках о Земле и окружающей среде» (онлайн конференция, 2024 г.); VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы энергетики» (г. Омск, 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке новых алгоритмов для защиты от однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах предприятий минерально-сырьевого комплекса с изолированной или резистивно-заземленной нейтралью. Оценка влияния вариации параметров контура нулевой последовательности на эффективность защиты от замыканий на землю в режимах устойчивого, кратковременного неустойчивого и дугового ОЗЗ. Разработке методики выбора оптимального места установки разделительных трансформаторов. Проведение теоретических и экспериментальных исследований, в результате которых обосновано использование в структуре алгоритмов защиты от ОЗЗ параметров нулевой и обратной последовательности.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях

из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 заявка на патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 112 наименований. Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 8 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность кандидату технических наук, доценту Устинову Денису Анатольевичу за научное руководство над работой. За помощь при выполнении экспериментальной части диссертации автор выражает благодарность главному энергетiku АО «Шахта «Полосухинская» Бабырь Валерию Викторовичу и директору по маркетингу ООО «НПП «КИТ» Зимовцу Алексею Ивановичу. За ценные научные консультации автор выражает благодарность кандидату технических наук, доценту Пеленеву Денису Николаевичу и доктору технических наук, профессору Назарычеву Александру Николаевичу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены научно-технические проблемы обеспечения селективности действия защит от ОЗЗ на землю в электротехнических комплексах напряжением 6-10 кВ с различными режимами нейтрали. Обоснована необходимость повышения чувствительности и селективности действия защит в условиях возникновения устойчивых, кратковременных неустойчивых и дуговых однофазных замыканий на землю в ЭТК напряжением 6-10 кВ предприятий минерально-сырьевого сектора. Исходя из результатов

проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе проведен анализ существующих методик расчёта тока однофазного замыкания на землю в системах электроснабжения 6-10 кВ ЭТК угледобывающих предприятий и построены сравнительные характеристики погрешностей методов.

Выполнено исследование влияния небалансов тока на действие защиты от ОЗЗ и определены методы отстройки от них.

Разработана и доказана эффективность методики выбора места установки разделительных трансформаторов, в качестве меры снижения влияния однофазных замыканий на землю на работоспособность ЭТК 6-10 кВ с изолированной нейтралью.

Проведена количественная оценка свойств симметричных составляющих токов и напряжений нулевой и обратной последовательностей на предприятиях минерально-сырьевого сектора.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе рассмотрены способы повышения чувствительности действия токовых защит в условиях однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения 6-10 кВ электротехнических комплексов горных предприятий.

Разработан алгоритм токовой защиты нулевой последовательности позволяющий фиксировать возникновение неустойчивых ОЗЗ, сигнализировать о наличии кратковременных однофазных замыканий на землю и отключать перемежающиеся неустойчивые однофазные замыкания на землю в электротехнических комплексах напряжением 6-10 кВ. С целью проверки эффективности алгоритма защиты в условиях возникновения кратковременных ОЗЗ было выполнено имитационное моделирование в программном комплексе *MatLab Simulink*.

Разработан алгоритм действия защиты от ОЗЗ основанный на измерении тока обратной последовательности в условиях вариации параметров контура нулевой последовательности ЭТК. В программном комплексе *MATLAB Simulink* проведена оценка его эффективности в режимах устойчивых, кратковременных неустойчивых и дуговых однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения

электротехнических комплексов с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью.

В результате проведенных исследований получены осциллограммы токов и напряжений в различных режимах ОЗЗ и построены зависимости перенапряжений при использовании в структуре ЭТК 6-10 кВ угледобывающих предприятий резистивно-заземлённой нейтрали относительно изолированной системы заземления.

В четвертой главе разработана структура и реализация аппаратно-программного комплекса защиты от ОЗЗ в индивидуальном исполнении для внедрения её в ЭТК с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью. Приведены результаты экспериментальных исследований неизменности действия аппаратно-программного комплекса защиты и выполнена оценка чувствительности его действия.

В заключении обобщены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение установленных закономерностей изменения коэффициента чувствительности в условиях вариации параметров относительной проводимости системы заземления нейтрали позволяют повысить чувствительность действия защит при кратковременных неустойчивых и дуговых однофазных замыканиях на землю в системах электроснабжения 6-10 кВ электротехнических комплексов горных предприятий.

При выполнении диссертации были установлены расхождения в значениях собственных ёмкостных токов линий, рассчитанных по четырём методикам. На основе полученных результатов экспериментальных исследований на угледобывающем предприятии был выполнен их сравнительный анализ, представленный на рисунке 1.

Было определено, что наименьшее отклонение коэффициента чувствительности по отношению к его экспериментальному значению имеет методика, основанная на учете сечения кабельных линий.

Установлено, что для повышения чувствительности действия защиты от ОЗЗ в расчете уставки срабатывания необходимо учитывать небалансы, существующие в электротехнических комплексах.

В связи с учетом небалансов в контуре нулевой последовательности уставку токовой защиты $I_{уст}$ от ОЗЗ необходимо рассчитывать согласно неравенству (1):

$$I_{уст} \geq I_{лci} \cdot (I_{НБ.ТНП} + I_{НБ.УГ} + I_{НБ.СМЕЖ} + I_{НБ.КС}) \cdot K_{отс}, \quad (1)$$

где $I_{лci}$ – собственный ёмкостной ток линии относительно земли, А;
 $I_{НБ.ТНП}$ – ток небаланса, вызванный кабельными трансформаторами тока нулевой последовательности, А;
 $I_{НБ.УГ}$ – ток небаланса, вызванный угловыми погрешностями измерительных трансформаторов, А;
 $I_{НБ.СМЕЖ}$ – ток небаланса, вызванный влиянием смежных линий, А;
 $I_{НБ.КС}$ – небаланс токов нулевой последовательности в защитах, установленных на пучках кабелей, и вызванные нарушением контактных соединений, А;
 $K_{отс}$ – коэффициент отстройки защиты.

Для выполнения анализа чувствительности действия токовых защит от ОЗЗ, применяемых в структуре ЭТК, необходимо оценить значение тока I_3 , проходящего в месте замыкания, которое в свою очередь определяется по выражению (2):

$$I_3 = I_{C\Sigma} \cdot \sqrt{d_n^2 + 1} \cdot \beta, \quad (2)$$

где $I_{C\Sigma}$ – ток замыкания на землю, учитывающий значение всех неповреждённых гальванически связанных линий, А;
 d_n – коэффициент относительной проводимости системы заземления нейтрали;
 β – коэффициент полноты замыкания на землю.

В режиме неполного ОЗЗ ток I_3 будет снижаться пропорционально увеличению сопротивления в месте замыкания, учитываемого коэффициентом полноты замыкания на землю $-\beta$, величина которого определяется следующим уравнением (3):

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{C_\Sigma}{g_3} + \frac{d_n \cdot C_\Sigma}{g_3} + 1\right)^2 + \left(\frac{C_\Sigma}{g_3}\right)^2}}, \quad (3)$$

где C_Σ – ёмкость фаз гальванически связанных линий сети относительно земли, Ф;
 g_3 – активная проводимость в месте замыкания, См.

С учетом вышеприведенных выражений формула определения K_q защиты от однофазных замыканий на землю с учетом рассмотренных параметров, примет следующий вид (4):

$$K_q = \frac{I_{C_\Sigma} \cdot \sqrt{d_n^2 + 1}}{K_{omc} \cdot I_{лси} \cdot \sqrt{\left(\frac{C_\Sigma}{g_3} + \frac{d_n \cdot C_\Sigma}{g_3} + 1\right)^2 + \left(\frac{C_\Sigma}{g_3}\right)^2}} \geq 1,25 \quad (4)$$

Коэффициент относительной проводимости системы заземления нейтрали d_n позволяет исследовать влияние смены режима заземления нейтрали с изолированного на резистивно-заземленный на чувствительность защиты от ОЗЗ предприятий минерально-сырьевого комплекса. Так при изолированной нейтрали значение коэффициента d_n составит 0, а при включении в нейтраль резистора относительная проводимость может составлять $(2 \div 4) d_n$.

С учетом этого были построены зависимости коэффициента чувствительности K_q защиты от ОЗЗ в условиях вариации переходного сопротивления в месте аварии и суммарной ёмкости гальванически связанных кабельных линий на предприятиях минерально-сырьевого комплекса, которые приведены на рисунке 2.

Для повышения чувствительности действия защиты от ОЗЗ предложено использовать разделительные трансформаторы, установленные на линиях с большим коэффициентом долевого участия, что позволит увеличить соотношение между собственным ёмкостным током линии и суммарным током замыкания на землю сети, вследствие чего повысится чувствительность действия защиты и увеличится работоспособность всего ЭТК.

В качестве мероприятий, направленных на обеспечение селективно-чувствительной защиты от замыканий на землю в условиях вариации параметров электротехнических комплексов с целью минимизации влияния режима ОЗЗ на элементы системы ЭТК необходим переход от изолированной нейтрали к заземлению нейтрали через резистор.

На рисунке 3 показан результат внедрения в систему угледобывающего предприятия предложенных мероприятий, коэффициент относительной проводимости d_n был выбран исходя из условий обеспечения селективности защиты и составил $d_n = 4$.

Для повышения селективности действия защиты был разработан алгоритм, позволяющий фиксировать возникновение неустойчивых ОЗЗ, сигнализировать о наличии КрОЗЗ и отключать опасные перемежающиеся неустойчивые однофазные замыкания на землю, а также селективно выявлять режимы УОЗЗ и ДОЗЗ. Структурная схема защиты от неустойчивых ОЗЗ приведена на рисунке 4.

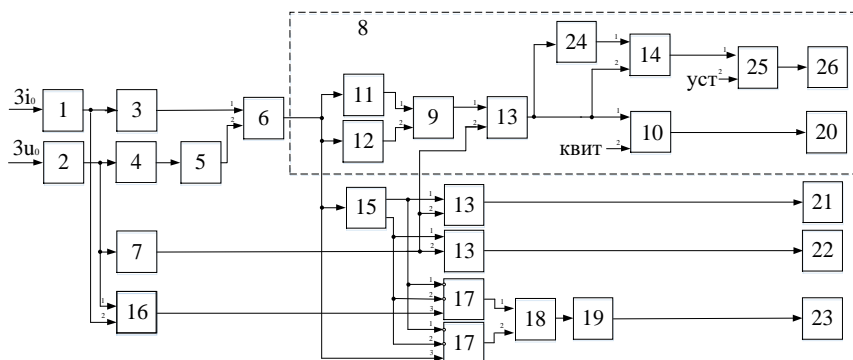


Рисунок 4 – Структурная схема защиты от неустойчивых ОЗЗ

Функционирование разработанной защиты осуществляется согласно алгоритму, блок-схема которого приведена на рисунке 5.

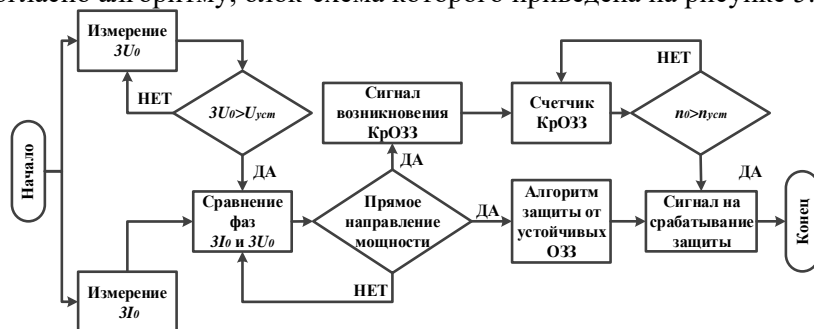


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма действия защиты от неустойчивых однофазных замыканий на землю

Анализ полученных результатов моделирования показал, что разработанный алгоритм действия защиты позволяет надежно выявлять и фиксировать кратковременные ОЗЗ в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности ЭТК 6-10 кВ.

2. Контроль тока обратной последовательности позволяет повысить чувствительность и селективность действия защиты в режиме однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью при повышенных значениях собственного ёмкостного тока отдельных присоединений.

Токи обратной последовательности защищаемых линий в режиме ОЗЗ будут равны:

– на неповреждённых линиях рассчитываются согласно формуле (5):

$$\dot{I}_{2n}^{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{An}^{(1)} + \alpha^2 \cdot \dot{I}_{Bn}^{(1)} + \alpha \cdot \dot{I}_{Cn}^{(1)}) = \dot{I}_{нагр.н}^{(1)} + 0 = \dot{I}_{нагр.н}^{(1)}, \quad (5)$$

где $\dot{I}_{An}^{(1)}$, $\dot{I}_{Bn}^{(1)}$, $\dot{I}_{Cn}^{(1)}$ – фазные токи неповреждённых линий в режиме ОЗЗ, А;

α – оператор поворота.

– на повреждённых линиях рассчитываются согласно формуле (6):

$$\dot{I}_{2n}^{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{An}^{(1)} + \alpha^2 \cdot \dot{I}_{Bn}^{(1)} + \alpha \cdot \dot{I}_{Cn}^{(1)}) = \dot{I}_{2нагр.н}^{(1)} + \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_3^{(1)} = \dot{I}_{2нагр.н}^{(1)} + \frac{1}{3} \cdot I_3, \quad (6)$$

где $\dot{I}_{An}^{(1)}$, $\dot{I}_{Bn}^{(1)}$, $\dot{I}_{Cn}^{(1)}$ – фазные токи повреждённых линий в режиме ОЗЗ, А.

Таким образом, значения тока обратной последовательности на всех неповреждённых линиях при возникновении ОЗЗ, будут равны нулю (практически они могут быть равны незначительной величине тока небаланса $\dot{I}_{2нi} \approx \dot{I}_{2нбi}$). Только на повреждённой линии ток I_2 будет наибольшим.

Если рассматривать схему ЭТК с режимом нейтрали заземлённой через резистор, то ток однофазного замыкания увеличится за счет активной составляющей тока через резистор, что в свою очередь также увеличит значение тока I_2 согласно формуле (7):

$$\dot{I}_{2n}^{(1)} = \frac{1}{3} \cdot I_3 = I_{C_\Sigma} \cdot \sqrt{d_n^2 + 1} \cdot \beta \quad (7)$$

Значение токов обратной последовательности на всех неповреждённых линиях будут равны нулю (как и в системе электроснаб-

жения с изолированной нейтралью). То есть в системе электроснабжения с заземлением нейтрали через резистор чувствительность защиты будет ещё более высокой.

На основании осциллограмм, представленных на рисунке 6, установлено что применение в качестве рабочего сигнала тока I_2 , в отличии от тока нулевой последовательности, позволяет выбрать уставку срабатывания на всех электрически связанных линиях единую, так как ток обратной последовательности имеет неизменную величину независимо на каком отходящем присоединении будет формироваться режим ОЗЗ.

Таким образом, существует возможность в построении принципиально новых алгоритмов от однофазных замыканий на землю. Структурная схема токовой защиты, фиксирующей токи обратной последовательности от ОЗЗ, приведена на рисунке 7.

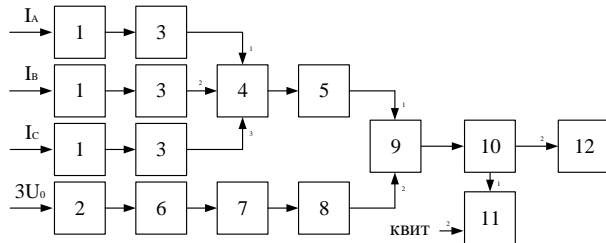


Рисунок 7 – Структурная схема токовой защиты обратной последовательности от однофазных замыканий на землю

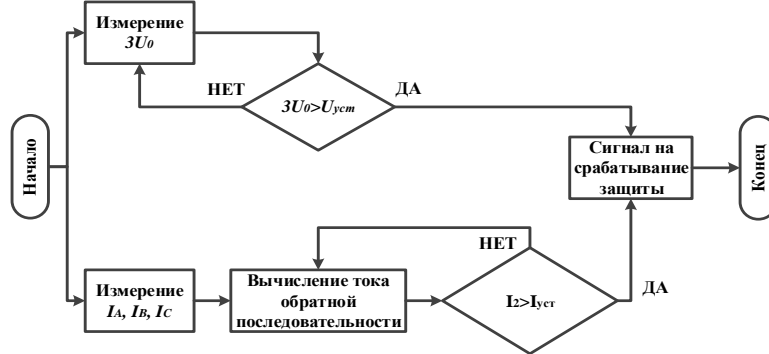


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма действия разработанной токовой защиты обратной последовательности от однофазных замыканий на землю

Функционирование токовой защиты обратной последовательности на предприятиях минерально-сырьевого комплекса осуществляется в соответствии с разработанным алгоритмом действия, приведенным на рисунке 8.

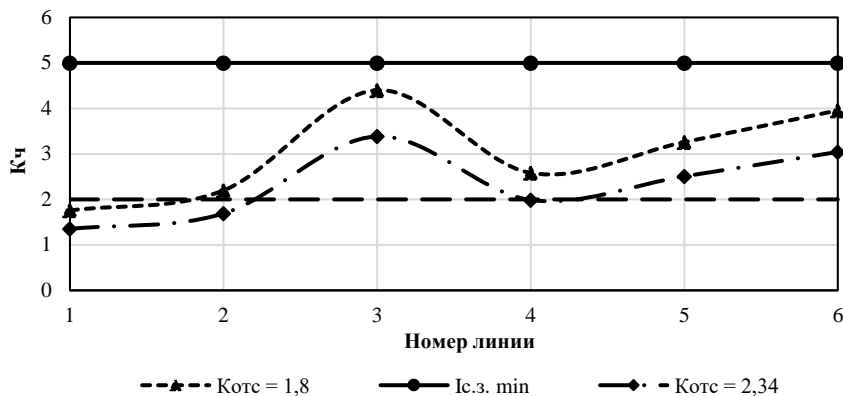


Рисунок 9 – Зависимости коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ при работе РЗиА по току нулевой последовательности, и по току обратной последовательности

Выполнена оценка эффективности действия предлагаемой защиты от ОЗЗ, устанавливаемой в структуру предприятий минерально-сырьевого сектора, фиксирующей токи обратной последовательности, путем расчёта коэффициентов чувствительности для каждого из рассматриваемых способов защиты, результаты представлены на рисунке 9.

Уставка срабатывания защиты по току обратной последовательности – $I_{уст.min}$ выбирается исходя из вычислительных возможностей микропроцессорной системы релейной защиты и автоматики, а также с учетом небалансов, присутствующих в системе электроснабжения электротехнических комплексов 6-10 кВ.

Оценка действия аппаратно-программного комплекса защиты в режиме неустойчивых ОЗЗ проводилась на физической модели угледобывающего предприятия, представленной на рисунке 10, результаты эксперимента работы защиты от неустойчивых однофазных замыканий на землю представлены на рисунке 11.

Также была оценена адекватность работы разработанного алгоритма токовой защиты нулевой последовательности и внедренного в логику работы микропроцессорного устройства БМРЗ, результаты представлены на рисунке 12.

Анализ экспериментальных данных, показывает, что ток обратной последовательности на микропроцессорном устройстве релейной защиты и автоматики (МУРЗаА) фиксируется только на защищаемом присоединении, что соответствует результатам имитационного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации обосновано применение комплекса организационно технических мероприятий позволяющих повысить селективность и чувствительность действия защиты при возникновении кратковременных неустойчивых, устойчивых, дуговых и неполных однофазных замыканий на землю в системе электроснабжения 6-10 кВ электротехнических комплексов с изолированным или резистивным заземлением нейтрали. По результатам выполнения диссертации сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выявлены закономерности изменения параметров контура нулевой и обратной последовательностей защищаемых присоединений в ЭТК с изолированной или резистивно-заземлённой нейтралью в условиях устойчивых, кратковременных неустойчивых и дуговых ОЗЗ, позволяющие определить поврежденное присоединение с малыми токами замыкания.

2. Разработан метод по повышению чувствительности действия защиты от ОЗЗ в условиях высокой неоднородности и нестационарности параметров электротехнических комплексов горных предприятий с изолированной нейтралью, позволяющий определить наиболее рациональные места установки разделительных трансформаторов.

3. Разработаны алгоритмы неизменного действия защиты от ОЗЗ, в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности и нестационарности топологии системы электроснабжения электротехнических комплексов 6-10 кВ, позволяющие определить степень эффективности от включения в систему заземления резистора.

4. Разработана структура и реализация аппаратно-программного комплекса защиты от однофазных замыканий на землю, позволяющая эффективно обнаруживать аварийный режим в условиях устойчивых, кратковременных неустойчивых и дуговых ОЗЗ в системе электроснабжения электротехнических комплексов 6-10 кВ с изолированной или резистивно-заземлённой системой.

5. Установлено, что ток обратной последовательности может быть использован как идентификационный признак выявления ОЗЗ в предприятиях минерально-сырьевого сектора. Разработан метод, основанный на контроле тока обратной последовательности, позволяющий повысить селективность действия защиты от ОЗЗ на всех электрически связанных линиях, так как ток обратной последовательности имеет неизменную величину независимо на каком отходящем присоединении будет формироваться режим ОЗЗ.

6. Проведено внедрение разработанных алгоритмов защиты от УОЗЗ, КрОЗЗ и ДОЗЗ в логику работы микропроцессорных устройств РЗиА и доказана их адекватность работы в различных режимах однофазных замыканий на землю. Проведенные экспериментальные исследования в ЭТК, показывают увеличение селективности и чувствительности в применяемых повсеместно МУРЗиА.

Перспективным направлением темы исследований является оценка работоспособности структурных схем аппаратно-программных комплексов защиты от неустойчивых однофазных замыканий на землю и токовой защиты обратной последовательности в условиях существования ОЗЗ в системах с компенсированной нейтралью.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Абрамович, Б.Н. Исследование эффективности функционирования инвариантной защиты от неполных однофазных замыканий на землю в составе микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики / Б.Н. Абрамович, Д.Н. Пеленев, **К.В. Бабырь**, А.И. Зимовец // Промышленная энергетика. – 2021. – №1. – С. 13-19.

2. Назарычев, А.Н. Исследование защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на измерении тока обратной последовательности / А.Н. Назарычев, Д.А. Устинов, Д.Н. Пеленев, **К.В. Бабырь** // Электричество. – 2024. – № 2. – С. 31–41.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Ustinov, D. Improving Electrical Safety of the Maintenance Personnel in the Conditions of Incomplete Single-Phase Ground Faults / D. Ustinov, **K. Babyr**, D. Pelenev // Occupational Safety in Industry. – 2022. – № 8. – P. 55-61.

4. Ustinov, D. Investigation of the Effect of Current Protections in Conditions of Single-Phase Ground Fault through Transient Resistance in the Electrical Networks of Mining Enterprises / D. Ustinov, A. Nazarychev, D. Pelenev, **K. Babyr**, A. Pugachev // Energies. – 2023. – № 16. – P. 1-15.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Патент № RU 2769099 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/16(2006.01), G01R 31/08(2006.01). Устройство селективной защиты от однофазных замыканий на землю электрических сетей среднего класса напряжения: № 2021131773: заявл. 29.10.2021: опубл. 28.03.2022 / Д.Н. Пеленев, **К.В. Бабырь**, Д.А. Устинов; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 14 с.: 2 ил.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023615131 Российская Федерация. Программа для микропроцессорных терминалов защит от однофазных замыканий на землю электрических сетей среднего класса напряжения: № 2023613636: заявл. 02.03.2023: опубл. 10.03.2023 / **К.В. Бабырь**, Д.А. Устинов; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 51,8 МБ.

7. Заявка на регистрацию патента на изобретение № 2024109732 «Устройство токовой защиты обратной последовательности от однофазных замыканий на землю электрических сетей среднего класса напряжения» от 10.04.2024 / А.Н. Назарычев, Д.А. Устинов, Д.Н. Пеленев, **К.В. Бабырь**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (патент № RU 2827652 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/16(2006.01), опубл. 01.10.2024).

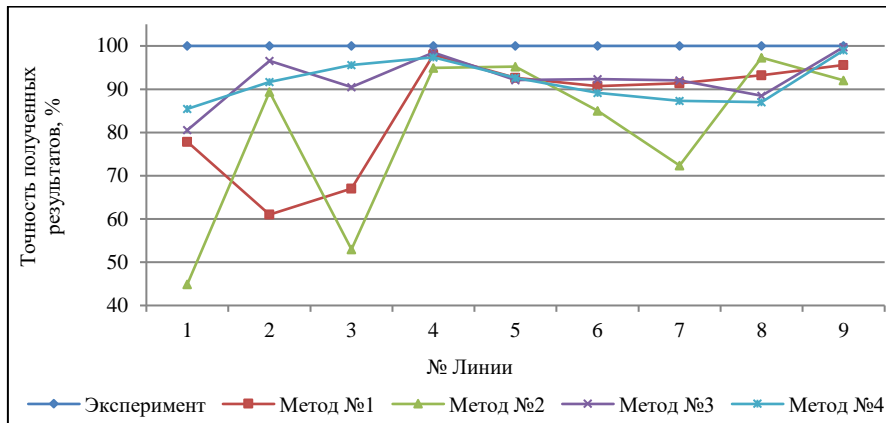


Рисунок 1 – Графические зависимости коэффициентов чувствительности защиты

Метод №1, основан на учете ёмкостей фаз линии относительно земли, рассчитывается по выражению (8):

$$I_{лси} = U_{\phi} \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_{i\Sigma}, \quad (8)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, кВ;

ω – угловая частота напряжения, рад/с;

$C_{i\Sigma}$ – суммарная ёмкость фаз линий сети относительно земли, Ф.

Метод №2, предполагающий определение ёмкостных токов относительно земли на основе опытных зависимостей, согласно формуле (9):

$$I_{лси} = \frac{U_{л} \cdot I_i}{10}, \quad (9)$$

где $U_{л}$ – линейное напряжение сети, кВ.

Метод №3, основанный на учете удельного значения ёмкостного тока, равняется формуле (10):

$$I_{лси} = I_{уди} \cdot l_i, \quad (10)$$

где $I_{уди}$ – удельное значение ёмкостного тока i -ой линии, А/км.

Метод №4, основанный на учете сечения кабельных линий, согласно уравнению (11):

$$I_{лси} = 0,6 \cdot l_i \cdot \sqrt{\frac{S_{кли}}{50}}, \quad (11)$$

где $S_{кли}$ – сечение i -ой кабельной линии, мм².

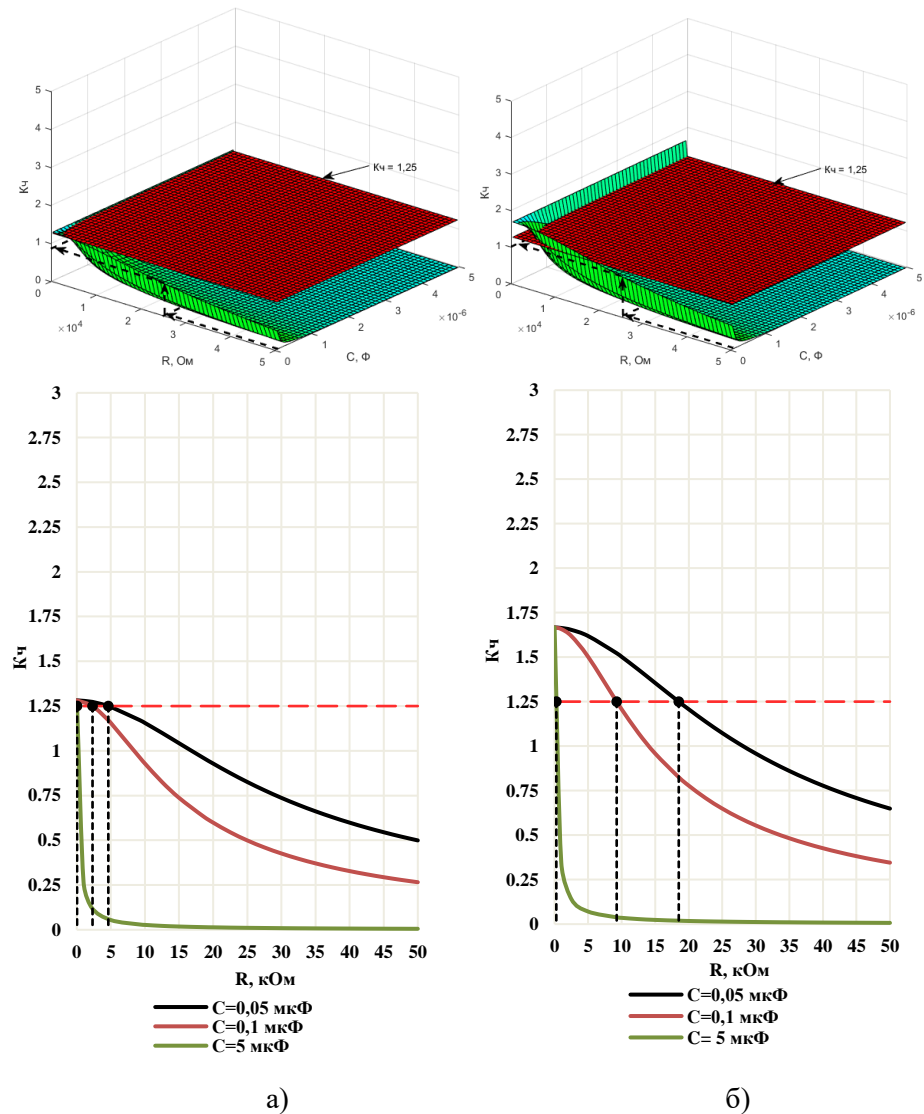
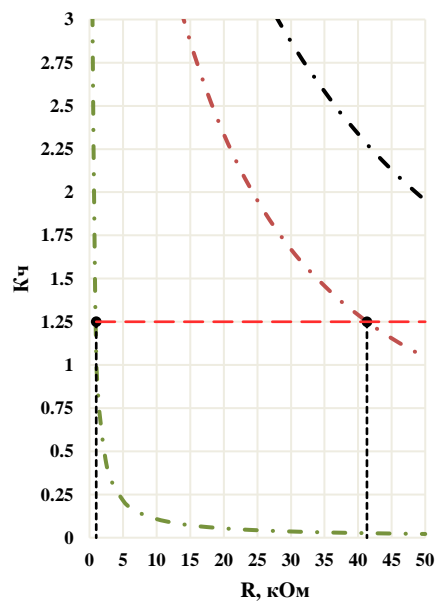
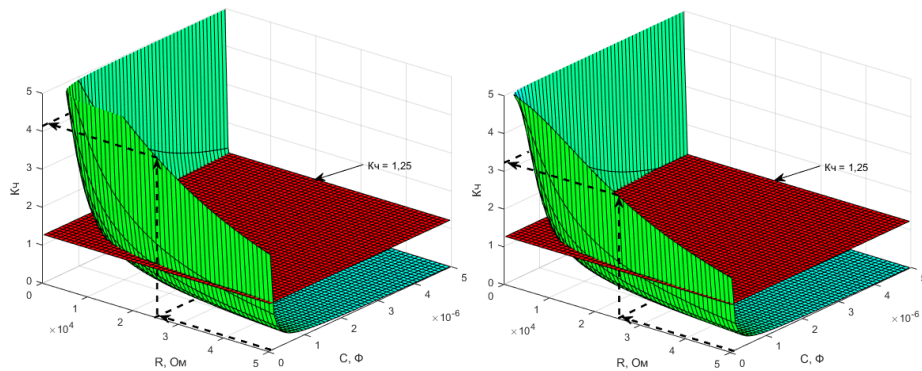
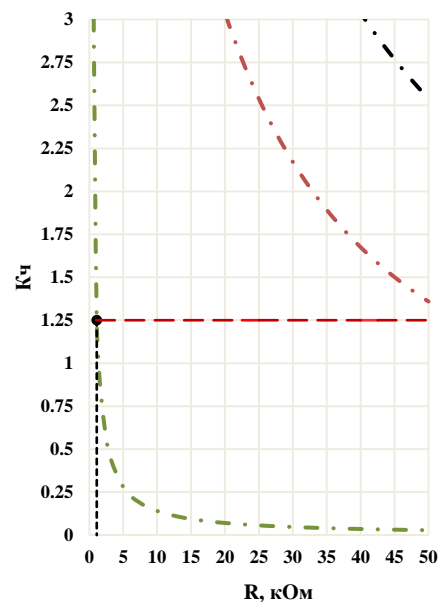


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента чувствительности защиты однофазных замыканий на землю от переходного сопротивления в месте ОЗЗ и суммарной ёмкости сети участка электроснабжения 6 кВ АО «Шахта «Полосухинская»: а) $K_{омс} = 1,8$; б) $K_{омс} = 2,34$

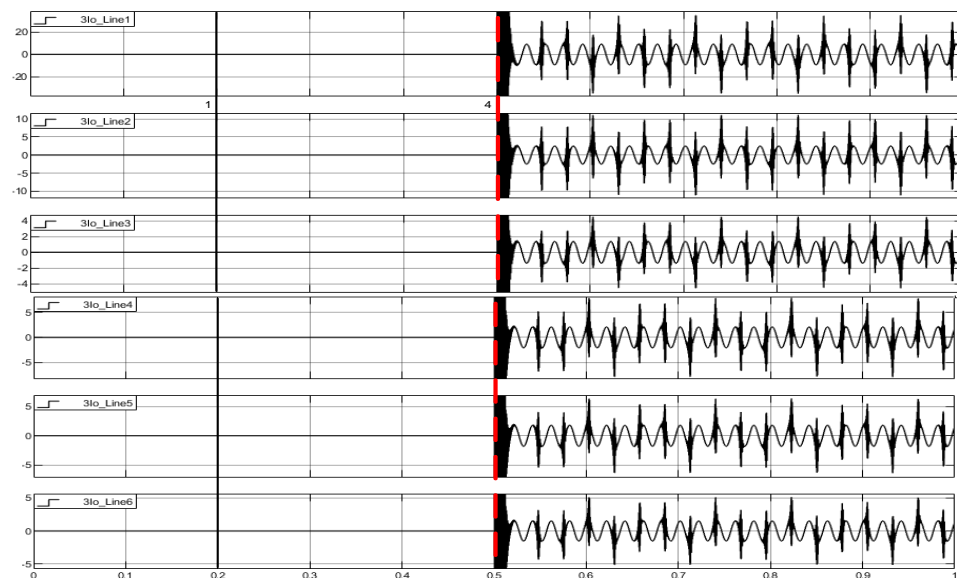


а)

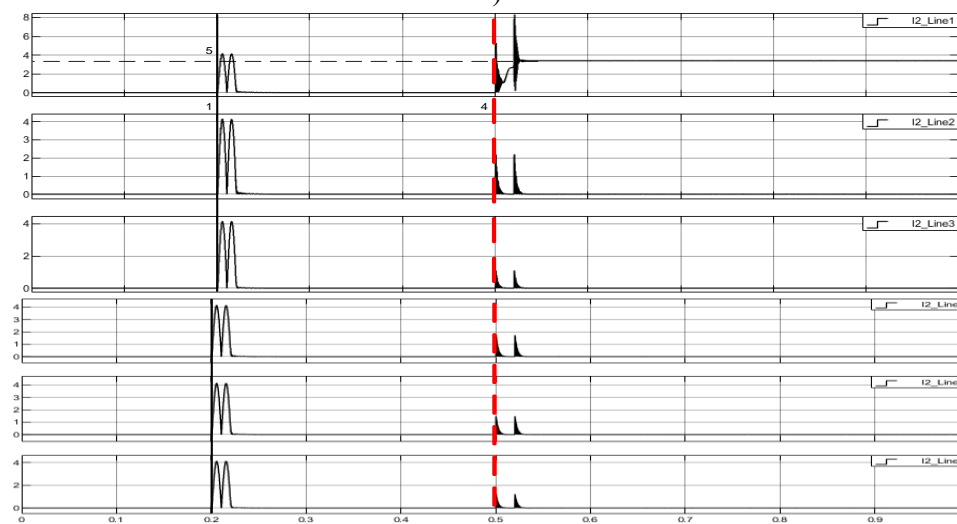


б)

Рисунок 3 – Зависимость коэффициента чувствительности защиты однофазных замыканий на землю от переходного сопротивления в месте ОЗЗ и суммарной ёмкости сети участка электроснабжения 6 кВ АО «Шахта «Полосухинская» при коэффициенте относительной проводимости заземления нейтрали $d_n = 4$: а) $K_{omc} = 1,8$; б) $K_{omc} = 2,34$



а)



б)

Рисунок 6 – Осциллограммы токов участка распределительной сети АО «Шахта «Полосухинская»; а) нулевой последовательности б) обратной последовательности

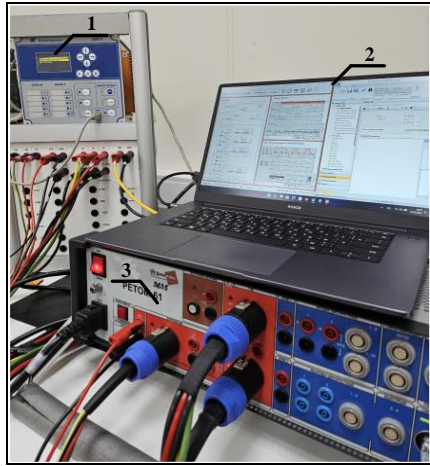


Рисунок 10 – Физическая модель проверки аппаратно-программного комплекса защиты неустойчивых однофазных замыканий на землю, где 1 - Микропроцессорный блок релейной защиты БМРЗ, выпускаемый компанией ООО «НТЦ «Механотроника»; 2 - Программный модуль тестирования; 3 - устройство РЕТОМ-61

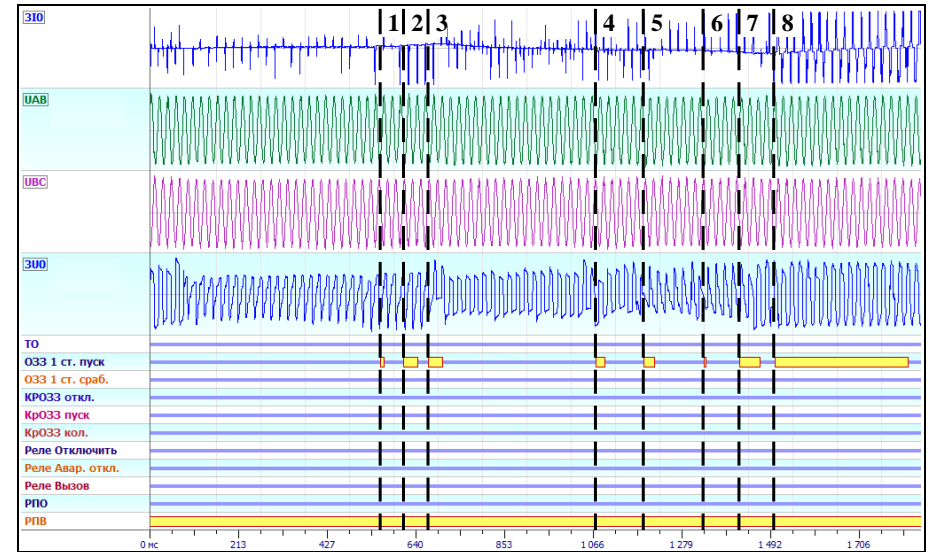


Рисунок 11 – Результаты эксперимента работы защиты от неустойчивых однофазных замыканий на землю при аварии на смежном присоединении

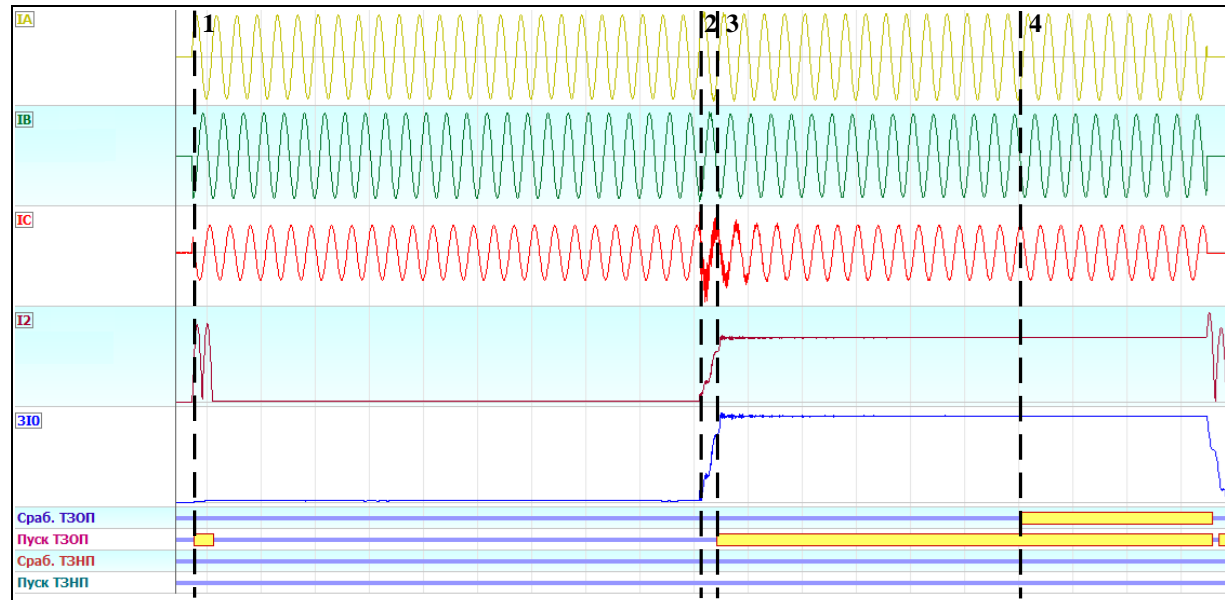


Рисунок 12 – Результаты эксперимента работы алгоритма ТЗОП в режиме ОЗЗ при аварии на защищаемом присоединении