

## ОТЗЫВ

**официального оппонента Татевосяна Андрея Александровича  
на диссертацию Бабыря Кирилла Валерьевича на тему «Защита от  
однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах  
напряжением 6-10 кВ на основе параметров нулевой и обратной  
последовательностей», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы**

**Актуальность темы.** На современном этапе развития релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем большое внимание уделяется исследованию защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью 6-10 кВ. Этот вид аварий (возникновение однофазных замыканий на землю) является наиболее распространенным в сетях распределения электрической энергии и одновременно с этим является наиболее сложно диагностируемым ввиду незначительного изменения тока в поврежденной фазе. Направление исследований в этом вопросе ведется по двум направлениям: в области разработки устройств идентификации места повреждения и разработки алгоритмов идентификации однофазного замыкания на землю. В последнее время оба направления исследований объединяются в одно в рамках создания программно-аппаратных комплексов различного исполнения.

Разнообразие режимов однофазных замыканий на землю, зависящих от конфигурации распределительной электрической сети, изменчивости параметров электротехнического комплекса, делает задачу разработки защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью 6-10 кВ творческой, во многом зависящей от большого количества факторов.

Применяемые устройства релейной защиты, построенные на дискретной базе, не удовлетворяют нынешнему темпу роста распределительных сетей и не позволяют гибко подстроить уставки под различные вариации параметров контура нулевой последовательности. Исследование работоспособности устройств защиты от токов однофазных замыканий на землю показывает, что более 70% их требуют ремонта (капитального или среднего) и лишь малая часть находится в рабочем состоянии. Исходя из этого, можно сделать вывод, что надежность функционирования защит находится на низком уровне, в этой связи диссертационное исследование соискателя актуально, поскольку направлено на решение научно-технической задачи по обеспечению селективной и чувствительной защиты от однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах предприятий минерально-сырьевого сектора. Предложенная к рассмотрению диссертация Бабыря К.В. посвящена разработке алгоритма, способного распознавать однофазные замыкания на землю при обеспечении требований селективности и чувствительности действия.

**Соответствие паспорту специальности.** Исследования, выполненные Бабырем К.В., направлены на разработку алгоритмов защиты от однофазных замыканий на землю в сетях среднего класса напряжения, поэтому диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – 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.

**Структура** диссертации и основные результаты разделов. Основной текст диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 112 наименований, изложенных на 141 страницах. Диссертация содержит 51 рисунок и 8 таблиц, а также приложения на 9 страницах. Общий объем работы составляет 150 страниц.

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, определены объект и направление исследований, оценивается уровень разработанности темы. Сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** проведен анализ причин возникновения аварий и ненормальных режимов работы электроприемников в сетях 6(10) кВ и показано, что ОЗЗ являются одной из наиболее распространенных причин нарушения нормального режима работы системы электроснабжения. Кроме этого, старение изоляции является одной из причин возникновения ОЗЗ, а перенапряжения являются следствием ОЗЗ. Таким образом, большая часть повреждений в сетях с изолированной нейтралью 6 - 10 кВ связаны с ОЗЗ.

Показано, что в условиях кратковременных однофазных замыканий на землю защита оказывается неработоспособной из-за того, что действующее значение тока нулевой последовательности находится то в зоне действия защиты, то вне ее, что не позволяет алгоритму обнаружения ОЗЗ селективно выявить и отключить повреждение.

Решение поставленной задачи находится на пути применения современных микропроцессорных терминалов релейной защиты, работающих на основе эффективных алгоритмов обнаружения ОЗЗ и отключения поврежденного участка сети. Вместе с тем разнообразие конфигураций электрической сети, многообразие режимов ОЗЗ, наличие переходного сопротивления, через которое происходит замыкание одной из фаз на землю, делает задачу разработки новых методов обнаружения ОЗЗ актуальной и экономически целесообразной.

Также в первой главе подробно рассматриваются режимы работы нейтрали в сети 6-10 кВ: сети с изолированной нейтралью, заземление нейтрали через реактор и резистор. Рассматриваются требования к защитам от ОЗЗ, а также приведена классификация защит от ОЗЗ по контролирующему параметру состояния системы электроснабжения (напряжению, току и направлению мощности нулевой последовательности). Проведен патентный поиск по современным терминалам релейной защиты и указаны возможности каждого из представленных устройств по определению ОЗЗ. В целом по первой главе диссертации сделан вывод о том, что вопрос создания высокочувствительной релейной защиты от ОЗЗ является нерешенным.

**Во второй главе** рассматривается методика определения тока замыкания на землю. Решение данного вопроса связано с определением собственного емкостного тока линии относительно земли. На примере схемы распределительной сети АО «Шахта «Полосухинская» различными способами определен емкостный ток девяти линий при их замыкании на землю. Установлено, что результаты общепринятых методик расчета определяют большой разброс полученных значений тока. В связи с этим в диссертации приведено три эксперимента для выявления наиболее точного метода расчета. Было выполнено экспериментальное замыкание одной из фаз в ячейке КСО к шине внутреннего контура заземления, соединение одной из фаз двигателя к заземляющему контуру и подключение одной из фаз двигателя к заземляющей шпильке. На основании полученных экспериментальных данных проведено обоснование метода расчета емкостного тока при ОЗЗ линии.

Также приведено исследование влияния небалансов на действия защит от ОЗЗ. Представлены зависимости коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ от переходного сопротивления и суммарной емкости сети. Определены ограничения коэффициента чувствительности в зависимости от изменения параметров контура нулевой последовательности. Разработана методика расчета расположения разделительных трансформаторов с целью повышения коэффициента чувствительности.

**Третья глава** посвящена разработке алгоритмов неизменного действия защиты от ОЗЗ в условиях непостоянства контура нулевой последовательности. Предложены структурная схема устройства и алгоритм защиты от неустойчивых ОЗЗ, структурная схема и алгоритм токовой защиты обратной последовательности от ОЗЗ. Проведено имитационное моделирование эффективности действия защиты от кратковременных неустойчивых замыканий на землю, а также токовой защиты обратной последовательности. Моделирование выполнено в среде MATLAB/Simulink. На основе результатов моделирования сделан вывод о возможности использования в качестве входного сигнала тока обратной последовательности, что позволяет использовать одну и ту же уставку срабатывания на всех электрически связанных линиях. Кроме этого, использование токовой защиты обратной последовательности позволяет повысить чувствительность и селективность как при низких значениях параметра контура нулевой последовательности, так и при дуговых или дуговых прерывистых ОЗЗ. Показано, что значения перенапряжения в системе с заземлением нейтрали через резистор значительно снижают перенапряжение в системе электроснабжения при ОЗЗ.

**В четвертой главе** представлена разработка аппаратно-программного комплекса защиты от неустойчивых ОЗЗ, а также комплекса токовой защиты обратной последовательности. Представленный комплекс защиты внедрен в логику работы терминала релейной защиты БМРЗ-152 (ООО «НТЦ Механотроника»). В главе приведен эксперимент по проверке срабатывания защиты с использованием РЕТОМ-61. В результате экспериментальных исследований действия аппаратно-программного комплекса установлено, что разработанный алгоритм позволяет обеспечить работу защиты в условиях наличия неустойчивых однофазных замыканий на землю, что подтверждает неизменность характеристик срабатывания защиты. Сделан вывод об обеспечении надежного срабатывания токовой защиты на основе обратной последовательности.

**В заключении** изложены основные выводы по результатам работы.

**Новизна исследований и полученных научных результатов** заключается в разработке метода выбора места установки разделительных трансформаторов с целью повышения коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ, а также в предложении новых алгоритмов повышения чувствительности защит от ОЗЗ, основанных на измерении тока нулевой и обратной последовательностей.

Получены зависимости изменения значения коэффициента чувствительности от величины сопротивления в точке однофазного замыкания на землю с учётом вариации ёмкости сети, позволяющие оценить работоспособность защиты в режиме однофазных замыканий на землю через переходное сопротивление.

Определено влияние составляющих обратной последовательности на селективность и чувствительность защиты от ОЗЗ в условиях вариации параметров относительной проводимости системы заземления нейтрали.

### **Ценность полученных результатов для науки и практики.**

В диссертации Бабыря К.В. содержится ряд новых научных результатов, среди которых особенно значимыми являются следующие:

– создана методика, определяющая место установки разделительных трансформаторов, позволяющая увеличить чувствительность и селективность действия защиты от однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах напряжения 6-10 кВ;

– разработаны алгоритмы, учитывающие непостоянство параметров контура нулевой последовательности в системах электроснабжения 6-10 кВ предприятий минерально-сырьевого комплекса, позволяющие селективно определить наличие неустойчивых, дуговых, устойчивых однофазных замыканий на землю.

Полученные зависимости коэффициентов чувствительности защиты от однофазных замыканий на землю от величины переходного сопротивления в месте повреждения и суммарной емкости сети могут стать важным инструментом для других исследователей, занимающихся изучением организации селективной и чувствительной защиты в электротехнических комплексах 6-10 кВ.

Разработанные структуры действий защит от кратковременных, устойчивых, неполных, дуговых и дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю, основанные на измерении параметров контура нулевой и обратной последовательностей, позволят организовать селективную и чувствительную защиту электротехнических комплексов 6-10 кВ без дополнительных затрат, направленных на модернизацию устройств релейной защиты. Это достигается за счет дополнения существующих логических алгоритмов работы микропроцессорных устройств РЗА при помощи функций гибкой логики.

Научная ценность работы состоит в разработке алгоритма повышения чувствительности защит от ОЗЗ на основе измерения токов обратной и нулевой последовательностей. Определены ограничения коэффициента чувствительности в зависимости от переходного сопротивления участка сети, а также суммарной емкости сети. В работе приведено обоснование эффективности использования резистивного заземления нейтрали для токовых ненаправленных защит на основе

исследования коэффициента чувствительности при изменении параметров контуров нулевой и обратной последовательностей и заземления нейтрали.

Практическая ценность заключается в предложенной структуре и аппаратно-программном комплексе системы защит на основе параметров обратной и нулевой последовательностей.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.** Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечена использованием математических методов обработки статистических данных, методов имитационного моделирования, а также результатами проведенных натурных экспериментов на предприятии угледобывающего сектора АО «Шахта «Полосухинская», подтверждающих адекватность используемых математических моделей.

**Полнота отражения результатов диссертации в опубликованных работах.** Основные результаты опубликованы в 10 научных работах, из них статей, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ – 2, работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science, – 2; свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ – 1, патент на изобретение – 2.

#### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Полученные результаты могут быть использованы в деятельности компаний минерально-сырьевого сектора, промышленных и угледобывающих предприятий, при организации релейной защиты и автоматики систем электроснабжения 6-10 кВ от однофазных замыканий на землю.

**Автореферат** отражает содержание диссертации.

**По диссертационной работе К.В. Бабыря имеются следующие вопросы и замечания:**

1. На рисунке 1.1 указаны причины возникновения аварий и ненормальных режимов работы в системах электроснабжения 6-10 кВ электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевого сектора. Чем обусловлен выбор указанного периода времени?

2. В главе 1 указано, что однократные кратковременные замыкания на землю с длительными бестоковыми паузами не являются серьезной угрозой для сети электротехнических комплексов 6-10 кВ. О каком временном промежутке бестоковых пауз идет речь и, исходя из каких условий, он выбран?

3. В разделе 2.2 в ходе натурального эксперимента однофазного замыкания на землю на угледобывающем предприятии метод по расчету емкостного тока №4 показал наибольшую точность. Можно ли рекомендовать этот метод для расчета величины тока ОЗЗ на всех угледобывающих предприятиях?

5. В разделе 3.1 указано, что подключение резистора к нейтрали энергосистемы позволяет увеличить чувствительность токовой защиты более чем в 5 раз. Необходимо уточнить, про какие исполнения токовой защиты идет речь и относительно какого варианта происходит сравнение?

6. В разделе 3.2 на структурной (рисунок 3.6) и структурно-функциональной (рисунок 3.8) схемах используется элемент дифференциатор. Необходимо уточнить для чего служит внедрение данного блока в схемы токовой защиты обратной последовательности от однофазных замыканий на землю?

7. В разделе 3.4 представлена модель электрической сети угледобывающего предприятия, на которой было выполнено имитационное моделирование в программном комплексе MatLab Simulink, емкости исследуемой сети относительно


земли – Са, Сб, Сс представлены сосредоточенными параметрами. По какой причине был выбран данный вариант моделирования кабельных линий?

8. На стр. 67 диссертации некорректно указано, что соединение резистора заземления нейтрали можно использовать в обмотке трансформатора соединенную в «треугольник», так как в этом режиме соединения обмотки нейтраль трансформатора отсутствует физически.

#### **Заключение.**

Высказанные замечания не снижают общей значимости диссертационной работы, связанной с разработкой новых алгоритмов защит от однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ. Диссертация Бабыря Кирилла Валерьевича «Защита от однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах напряжением 6-10 кВ на основе параметров нулевой и обратной последовательностей», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор, Бабырь Кирилл Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры «Электрическая техника»  
ФГАОУ ВО «Омский государственный  
технический университет»  
доктор технических наук, доцент

  
А.А. Татевосян  
20.11.24

Сведения об оппоненте и организации:

Татевосян Андрей Александрович – профессор кафедры «Электрическая техника» ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», кандидат технических наук (05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы), доцент.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

644050, г. Омск, проспект Мира, 11

Тел. +7 (381) 265-31-65; Email: [aatatevosyan@omgtu.ru](mailto:aatatevosyan@omgtu.ru)

Подпись Татевосяна А.А. удостоверяю

Ученый секретарь ученого совета

  
А.Ф. Немцова

