

На правах рукописи



НОВОКРЕЩЕНОВ ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА С ПОВЫШЕННОЙ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ НА
ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРОДОЛЬНОЙ
КОМПЕНСАЦИЕЙ

2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Иванов Игорь Юрьевич

Официальные оппоненты: **Лачугин Владимир Федорович**, доктор технических наук, кафедра «Релейная защита и автоматизация энергосистем» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор.
Лебедев Владимир Дмитриевич, кандидат технических наук, кафедра «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доцент.

Ведущая организация: **Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «ЭКРА», г. Чебоксары**

Защита состоится «06» октября 2026 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д- 224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <http://www.kgeu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зиганшин Ш.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Согласно принципам построения интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС), способом оптимизации работы электросетей Единой энергетической системы России выступает интеграция в сеть активных компонентов на основе силовой электроники. Эти компоненты обеспечивают возможность динамической регулировки параметров электрической сети.

В то время как зарубежные страны активно используют различные FACTS-технологии (управляемые системы электропередачи переменного тока), специфика Российской энергосистемы, обусловленная обширными расстояниями между объектами электросетевого комплекса, определяет актуальность применения устройств продольной компенсации (УПК). Внедрение УПК на линиях электропередачи (ЛЭП) даёт целый ряд преимуществ: существенное увеличение пропускной способности ЛЭП благодаря компенсации индуктивного сопротивления, улучшение статической и динамической устойчивости энергосистемы за счёт подавления электромеханических колебаний, возможность эффективного управления потоками активной мощности в параллельных ЛЭП. Практическое применение УПК требует тщательной проработки вопросов адаптации функционирования систем защиты. Это связано как с переменным характером параметров защищаемого объекта, так и со спецификой работы продольно-компенсированных ЛЭП при степени компенсации реактивного сопротивления ЛЭП более 50 %, связанной с появлением явлений инверсий токов, напряжений, низкочастотных колебаний при коротких замыканиях (КЗ).

Значительный вклад в решение проблем, стоящих перед системами защиты ЛЭП внесли советские и российские учёные: Я.С. Гельфанд, Ю.Н. Алимов, Л.С. Зисман, В.С. Скитальцев, А.И. Левиуш, Л.А. Надель, В.А. Рубинчик, Н.А. Дони, А.М. Наумов, В.С. Фурашов, А.А. Шурупов, А.Н. Подшивалин, В.А. Ефремов, Д.Б. Антонов, В.Ф. Лачугин, В.Д. Лебедев, Е.Н. Колобродов и другие.

На сегодняшний день большинство исследований в области адаптации алгоритмов функционирования устройств защиты продольно-компенсированных ЛЭП сосредоточено на совершенствовании алгоритмов работы дистанционной защиты.

Существуют решения и для дифференциальной релейной защиты. Одно из них, авторами которого являются Altuve H.J., Mooney J.B. и Alexander G.E., заключается в переходе от одномерной плоскости к двумерной путём деления токов по концам линии друг на друга. Однако этот метод имеет один очень важный недостаток: если внутреннее короткое замыкание сопровождается подсинхронным резонансом время обнаружения КЗ может достигать 0,179 секунд. Другое решение, предложенное Patrick T. Manditereza, представляет собой алгоритм позволяющий детектировать короткие замыкания с переходным сопротивлением до 330 Ом. Работа алгоритма основывается на измерении активной и реактивной мощностей в начале и конце линии, а также в непосредственной близости от УПК, и последующей математической обработке сигналов. К недостаткам этого алгоритма можно отнести ограниченность диапазона его работы (степень компенсации до 90% включительно), правильная работа только с фиксированными значениями ёмкости УПК, а также необходимость установки дополнительных промежуточных измерительных устройств и терминалов релейной защиты.

С учётом сказанного выше, остаётся нерешённой важная проблема: дифференциальная защита линий (ДЗЛ) демонстрирует недостаточную чувствительность при КЗ на ЛЭП, особенно в условиях повышенной компенсации. Это может быть чревато отказом в действии данного вида защит. В связи с чем, повышение чувствительности дифференциальной защиты при КЗ на ЛЭП с продольной компенсацией представляет собой значимую и актуальную научно-техническую задачу.

Объект исследования – электротехнический комплекс линий электропередачи с продольной компенсацией.

Предмет исследования – дифференциальная защита линий электропередачи с продольной компенсацией.

Цель исследования – повышение значений коэффициента чувствительности дифференциальных защит, которые позволят обеспечить соответствие требованиям, предъявляемым Правилами устройства электроустановок к таким защитам при их установке на ЛЭП с продольной компенсацией.

Задачи исследования. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта применения

защит на ЛЭП с продольной компенсацией.

2. Разработка компьютерной модели электротехнического комплекса ЛЭП с продольной компенсацией от 0 до 100 %, позволяющей количественно оценить влияние УПК на значения токов КЗ по концам линии и рассчитать значение коэффициента чувствительности ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП.

3. Исследование системных свойств и связей электротехнического комплекса ЛЭП с продольной компенсацией, влияющих на чувствительность ДЗЛ в аварийном режиме продольно-компенсированной ЛЭП.

4. Разработка нового алгоритма функционирования и функциональной схемы ДЗЛ, позволяющих повысить чувствительность защиты при КЗ на ЛЭП с продольной компенсацией.

Методология и методы диссертационного исследования.

В диссертационной работе применены теоретические (методы теоретических основ электротехники, теоретических основ релейной защиты, компьютерного моделирования переходных и установившихся режимов при КЗ, функционального программирования) и эмпирико-теоретический методы (при написании диссертации применялся метод аналогии, в ходе которого поведение разработанной модели сравнивалось с результатами натуральных экспериментов).

Степень достоверности результатов. Адекватность математической модели, используемой при компьютерном моделировании аварийных режимов на ЛЭП с УПК, подтверждается сходимостью полученных результатов с данными регистрации аварийных событий, записанными на реально действующих энергообъектах с продольной компенсацией отходящих ЛЭП.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе состоит в следующем:

1. Разработан способ оценки длины участка мёртвой зоны дифференциальной защиты продольно-компенсированной ЛЭП, основанный на проведении расчётов угла сдвига между векторами токов одноименных фаз по разным концам ЛЭП в зависимости от локации точки КЗ и степени продольной компенсации.

2. Получены результаты экспериментов имитационного моделирования по оценке влияния величины падения напряжения в

точке КЗ на снижение дифференциального тока ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП, а также результаты исследования переходных и установившихся режимов КЗ на ЛЭП с продольной компенсацией, подтверждающие, что УПК влияют на снижение коэффициента чувствительности ДЗЛ только в установившихся режимах КЗ.

3. Предложен новый алгоритм функционирования ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП, основанный на проведении расчётов активной составляющей токов по концам защищаемой ЛЭП. Контроль дифференциального значения активного тока позволяет обнаруживать КЗ на ЛЭП даже в режимах инверсии полного тока на одном из концов защищаемого участка.

4. Разработана функциональная схема защиты, реализуемая на дифференциальном принципе с контролем дифференциального значения активного тока. Предлагаемая ДЗЛ обладает более высокими значениями коэффициента чувствительности (≥ 2) в сравнении с ранее известными видами ДЗЛ.

Практическая значимость работы заключается в том, что предлагаемая ДЗЛ с контролем дифференциального значения активного тока:

1. Позволяет выполнить быстродействующую защиту линии, правильно функционирующую при всех видах КЗ на защищаемой ЛЭП с продольной компенсацией. Максимальное собственное время срабатывания предлагаемого алгоритма ДЗЛ при внутренних КЗ не превышает 25 мс.

2. Позволяет обеспечить соответствие требованиям, предъявляемым Правилами устройства электроустановок к таким защитам при их установке на ЛЭП с продольной компенсацией.

3. Исключает наличие мёртвой зоны ДЗЛ на ЛЭП со степенью продольной компенсации более 50 %. Тем самым снимаются ограничения по степени компенсации продольного сопротивления ЛЭП, что является особо актуальным для нашей страны ввиду большой протяжённости электрических сетей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ оценки длины участка мёртвой зоны дифференциальной защиты продольно-компенсированной ЛЭП, основанный на проведении расчётов угла сдвига между векторами токов одноименных фаз по разным концам ЛЭП в зависимости от локации точки КЗ и степени продольной компенсации.

2. Результаты экспериментов имитационного моделирования по оценке влияния величины падения напряжения в точке КЗ на снижение дифференциального тока ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП, а также результаты исследования переходных и установившихся режимов КЗ на ЛЭП с продольной компенсацией, подтверждающие, что УПК влияют на снижение коэффициента чувствительности ДЗЛ только в установившихся режимах КЗ.

3. Новый алгоритм функционирования ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП, основанный на проведении расчётов активной составляющей токов по концам защищаемой ЛЭП, позволяющий обнаруживать КЗ на ЛЭП в режимах инверсии полного тока на одном из концов защищаемого участка.

4. Усовершенствованная функциональная схема ДЗЛ с контролем дифференциального значения активного тока, позволяющая повысить чувствительность защиты при КЗ на ЛЭП с продольной компенсацией.

Соответствие научной специальности. Тема диссертационного исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»:

- п. 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 промышленного назначения»;

- п. 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления».

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных и научно-технических конференциях: Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ (Казань, 2018 г.); Тинчуринские чтения (Казань, 2019 г.); Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (Тольятти, 2019 г.); Аспирантско-магистерский научный

семинар, посвящённый дню энергетика (Казань, 2020 г.); Устойчивая энергетика и энергомашиностроение (Казань, 2021 г.); Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники (Казань, 2021 г.); Системные исследования в энергетике (Иркутск, 2021 г.); Фёдоровские чтения (Москва, 2021 г.); Энергетика и цифровая трансформация (Казань, 2022 г.); Электротехнические комплексы и системы (Челябинск, 2022 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 13 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК РФ, 1 статья в журналах, входящих в международные системы цитирования (Scopus), 4 статьи в сборнике трудов, индексируемом в РИНЦ, 4 тезиса конференций. Имеется 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 125 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа включает в себя 11 таблиц и 61 рисунок. Список литературы содержит 90 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дана информация о структуре и объёме диссертации.

В первой главе выполнен литературный обзор и оценено состояние проблемы функционирования комплексов релейной защиты при применении их на ЛЭП с УПК. Исследования показали, что при превышении порога продольной компенсации в 50% на таких ЛЭП возникают специфические эффекты. К ним относятся: инверсия тока, инверсия напряжения, низкочастотные колебания при коротких замыканиях. Данные явления создают серьёзные проблемы в работе системы защиты ЛЭП, поскольку могут вызывать отказы в работе защитных устройств и нарушать их основные характеристики – селективность и чувствительность.

Во второй главе приведены аналитические выражения, описывающие процессы, возникающие в аварийном режиме на ЛЭП с УПК, обосновываются методы исследования электротехнических комплексов и систем и разрабатывается

методика компьютерного моделирования электротехнического комплекса ЛЭП с продольной компенсацией для исследования работы ДЗЛ в различных режимах.

Для исследования влияния параметров сети, содержащей УПК, на работу ДЗЛ с помощью программного комплекса разработана структурная схема модели и сама модель электротехнического комплекса ЛЭП с продольной компенсацией, представленные на рисунках 1, 2.

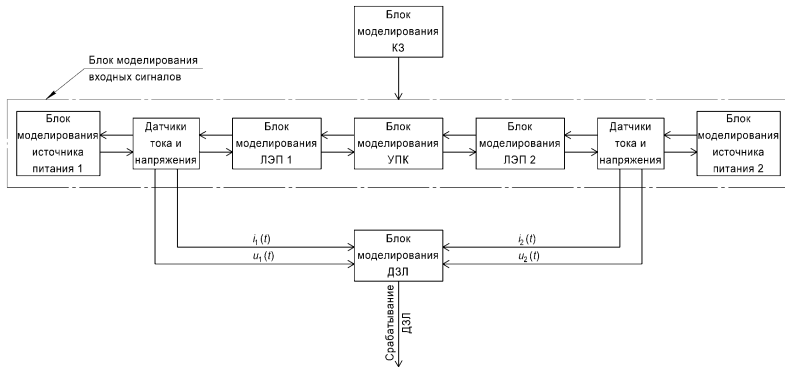


Рисунок 1 – Структурная схема компьютерной модели ДЗЛ

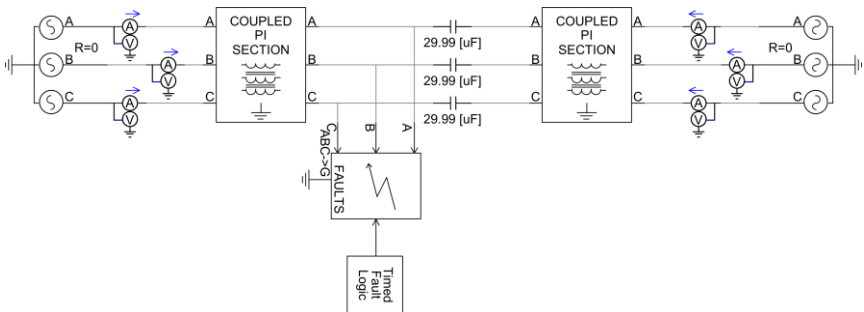


Рисунок 2 – Компьютерная модель электротехнического комплекса ЛЭП с продольной компенсацией

В блоке моделирования КЗ задавались: сопротивление в месте КЗ, вид КЗ, длительность КЗ. В блок моделирования входных сигналов входили компоненты: модули для имитации работы источников электропитания; модули моделирования ЛЭП; модули воспроизведения работы УПК; дополнительные модули для контроля параметров тока и напряжения в системе.

Блоки моделирования источников питания представляли собой трёхфазные генераторы синусоидального напряжения с настраиваемыми параметрами: уровень ЭДС, сдвиг по фазе (использовался для симуляции перетоков активной мощности, а также для симуляции качания), внутреннее сопротивление (в зависимости от целей эксперимента задавалось равным от 0 до значений сопротивлений, характерных для энергосистем соответствующего класса напряжения).

В блоке моделирования ЛЭП задавались параметры: погонное активное сопротивление прямой и нулевой последовательности, индуктивное сопротивление прямой и нулевой последовательности, а также длина участка ЛЭП. В случае потребности подробного анализа, линии электропередачи делились на более мелкие секции.

Блок моделирования УПК реализован на основе идеального конденсатора с функцией изменения ёмкости. Ёмкость конденсатора задавалась исходя из требуемой степени компенсации по формуле:

$$C = \frac{1}{kj\omega X_L}, \quad (1)$$

где C – ёмкость конденсатора, Ф; k – степень (коэффициент) компенсации, j – мнимая единица; ω – угловая частота, рад/с; X_L – индуктивное сопротивление, Гн.

В процессе выполнения исследовательской работы был применён стандартный алгоритм дифференциальной защиты, принцип действия которого базируется на сопоставлении текущих значений силы тока в различных точках электрической цепи:

$$i_{\text{диф}}(t) = i_1(t) + i_2(t), \quad (2)$$

где $i_1(t)$ и $i_2(t)$ – мгновенные значения силы тока на противоположных концах ЛЭП.

В третьей главе приводятся результаты компьютерного моделирования аварийных режимов на ЛЭП с продольной компенсацией от 0 до 100 %. При этом рассматривались два типа ЛЭП с разным соотношением индуктивного сопротивления провода к его активному сопротивлению: 15,2:1, что соответствует параметрам ЛЭП 500 кВ (для сечения провода $3 \times 500 \text{ мм}^2$) и 5,6:1, что соответствует соотношению сопротивлений на ЛЭП 220 кВ (для сечения провода 500 мм^2). В ходе проведённых исследований

получены графики зависимости угла сдвига между векторами токов одноименных фаз по разным концам линии от локации точки КЗ и степени продольной компенсации (рисунок 3).

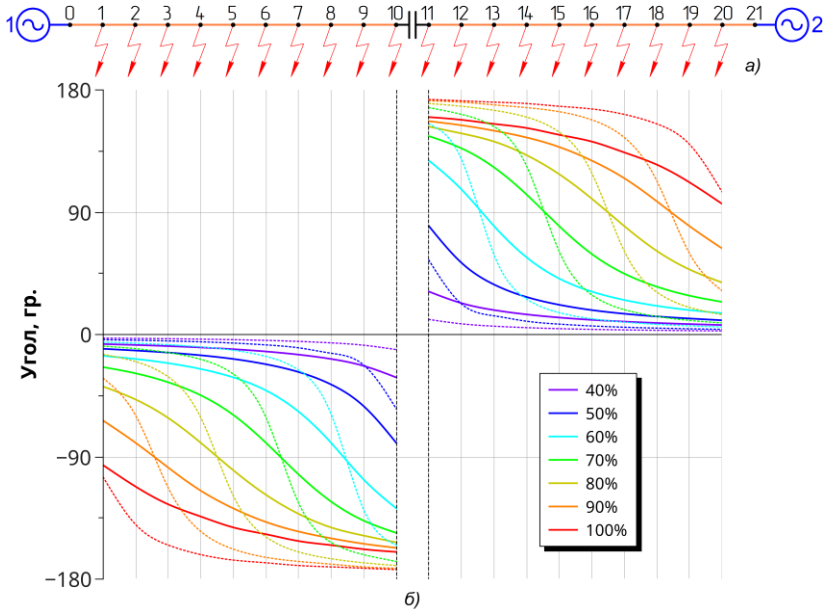


Рисунок 3 – Графики зависимости угла сдвига между векторами токов одноименных фаз по разным концам ЛЭП от локации точки КЗ и степени продольной компенсации: пунктирная линия – ЛЭП 500 кВ, сплошная линия – ЛЭП 220 кВ

Как видно из графиков, чем ближе точка КЗ находится к УПК, расположенному посередине линии, и чем больше степень продольной компенсации, тем больше угол между векторами токов одноименных фаз, причём зависимость нелинейная. Полученные результаты позволили оценить влияние степени продольной компенсации на длину участка мёртвой зоны ДЗЛ, возникающей вследствие инверсии токов в перекомпенсированном участке ЛЭП. Поскольку изменение соотношения индуктивного сопротивления к активному в диапазоне от 5,6:1 до 15,2:1 не оказывает заметного влияния на момент появления инверсии токов, это даёт основание сделать вывод, что на ЛЭП разных классов напряжения длины мёртвых зон ДЗЛ будут одинаковыми (таблица 1).

Таблица 1 – Протяжённость участка мёртвой зоны ДЗЛ при КЗ на ЛЭП 220-500 кВ

Степень продольной компенсации, %	Длина участка мёртвой зоны ДЗЛ, %
50 и меньше	0
60	16,5
70	36
80	56
90	75
100	>90

Получены зависимости величин дифференциального тока ДЗЛ на ЛЭП со 100% степенью продольной компенсации от величины падения напряжения (сопротивления) в точке КЗ. Зависимости выражены через отношения дифференциальных токов на компенсированной ЛЭП к дифференциальным токам на некомпенсированной ЛЭП (рисунок 4).

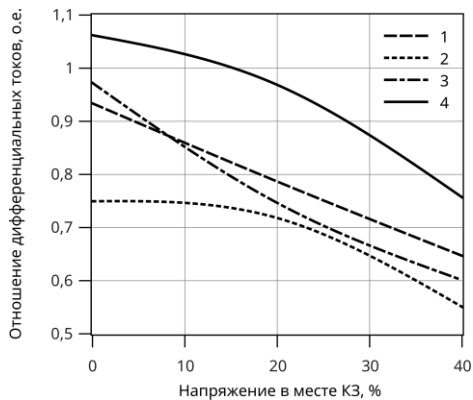


Рисунок 4 – Относительное значение минимального пика дифференциального тока на ЛЭП с УПК в зависимости от доли номинального напряжения в месте КЗ: 1 – при трёхфазном КЗ; 2 – при двухфазном КЗ; 3 – при двухфазном КЗ на землю; 4 – при однофазном КЗ

Графики демонстрируют значительное влияние переходного сопротивления в точке КЗ на значения дифференциального тока. Установлено, что на ЛЭП с УПК наблюдается существенное снижение минимальной амплитуды пикового значения дифференциального тока по сравнению с показателями некомпенсированной линии. Это в первую очередь объясняется, тем что повышение значения активного сопротивления в колебательном

контуре за счёт увеличения переходного сопротивления в месте КЗ приводит к увеличению скорости затухания переходного процесса, что пропорционально сказывается на величине амплитуды дифференциального тока. При однофазном и двухфазном КЗ данный эффект приобретает характер лавинообразного уменьшения.

Имеются особенности функционирования ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП в переходном режиме КЗ. Параметром, влияющим исключительно на переходной процесс и не затрагивающим установившийся, является угол (т.е. момент) возникновения КЗ. На рисунке 5 приводятся временные диаграммы переходного процесса токов КЗ, возникающих при углах ЭДС 0° и 90° при степени компенсации близкой к 100% и расположении точки КЗ в непосредственной близости от УПК.

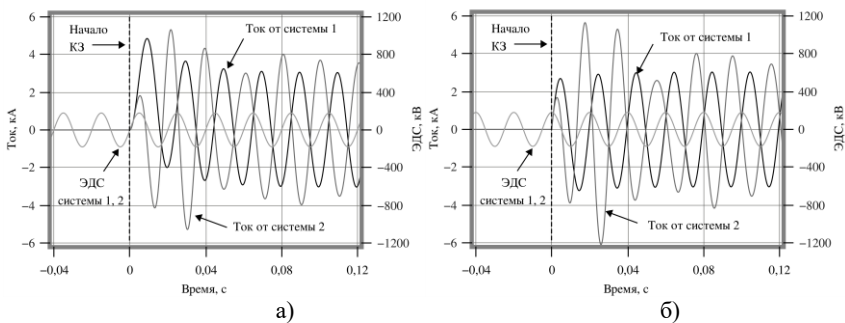


Рисунок 5 – Временные диаграммы токов КЗ при углах напряжения: а – 0° ; б – 90°

В четвёртой главе предложен новый алгоритм функционирования ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП, основанный на проведении расчётов активной составляющей токов по концам защищаемой ЛЭП (рисунок 6).

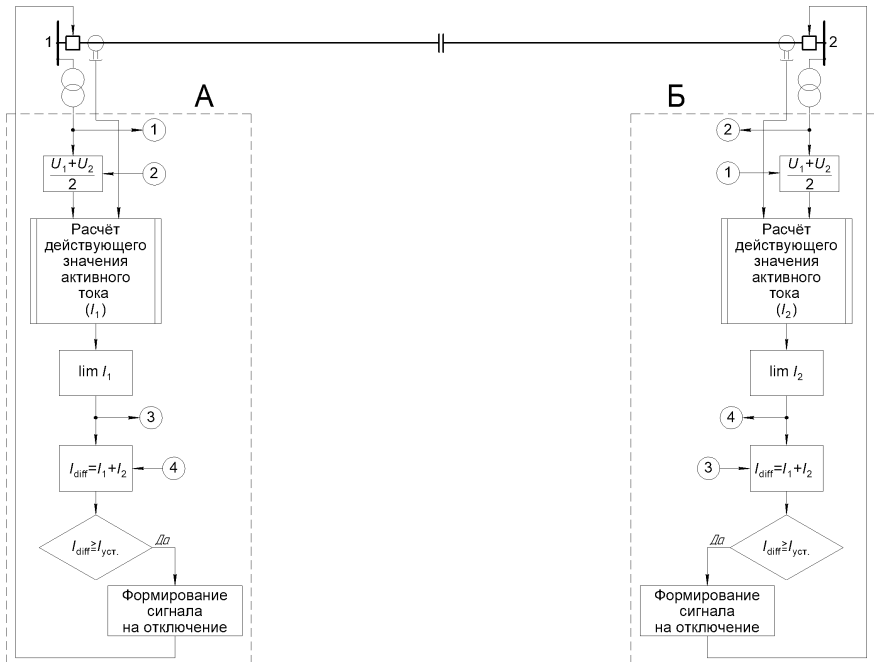


Рисунок 6 – Алгоритм функционирования ДЗЛ, основанный на проведении расчётов активной составляющей токов по концам защищаемой ЛЭП

Алгоритм предполагает использование двух полуккомплектов релейной защиты: полуккомплект А и полуккомплект Б. Каждый из полуккомплектов в режиме реального времени от оптических трансформаторов тока и напряжения получает по каждой фазе информацию о мгновенных значениях тока и напряжения. Параллельно полуккомплекты обмениваются между собой значениями напряжения. Получив значения напряжения с противоположного конца, полуккомплекты вычисляют мгновенное среднеарифметическое значение напряжения. Посредством вычисленного среднеарифметического значения напряжения и мгновенного значения полного тока (геометрическая сумма активной и реактивной составляющей) производится расчёт действующего значения активного тока на соответствующем конце ЛЭП. Так как ток короткого замыкания, в частности активная составляющая, в ряде случаев характеризуется малыми значениями, для обеспечения погрешности по дифференциальному значению активных токов в пределах 20% во всём диапазоне возможных

режимов ЛЭП, в каждом из полукомплектов производится ограничение рассчитанных значений активного тока. Далее полукомплекты обмениваются между собой действующими значениями активного тока. На основании полученных данных в каждом из полукомплектов рассчитывается дифференциальное значение активных токов, которое сравнивается с уставкой. Если полученное дифференциальное значение больше или равно уставке, то происходит формирование сигнала на отключение выключателя и ЛЭП отключается с обеих сторон.

На основании предложенного алгоритма разработана функциональная схема ДЗЛ, представленная на рисунке 7.

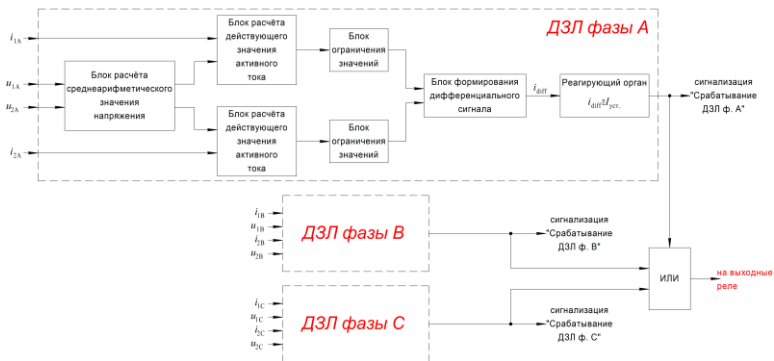


Рисунок 7 – Функциональная схема усовершенствованной ДЗЛ с контролем дифференциального значения активного тока

Усовершенствованная функциональная схема ДЗЛ базируется на существующих решениях и включает в себя дополнительные блоки такие как: блок расчёта среднеарифметического значения напряжения, блоки расчёта действующего значения активного тока, блоки ограничения значений.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма использовалась компьютерная модель электротехнической системы с топологией сети, обеспечивающей сочетание факторов, максимально снижающих чувствительность ДЗЛ. С этой точки зрения такими свойствами обладает ЛЭП, у которой УПК располагаются несимметрично относительно центра линии: одно УПК располагается посередине ЛЭП, другое – на передающем конце.

Результаты оценки чувствительности ДЗЛ, функционирующей на основе существующего и предлагаемого алгоритмов сведены в таблицу 2 (на примере ЛЭП сечением 500 мм² с транспортным углом 7,87°, соответствующим номинальному току линии).

Таблица 2 – Значения коэффициента чувствительности ДЗЛ (на примере ЛЭП сечением 500 мм² с транспортным углом 7,87°, соответствующим номинальному току линии)

Тип КЗ	Коэффициент чувствительности ДЗЛ		
	алгоритма, основанного на сравнении полных токов	разработанного алгоритма	требование ПУЭ
3-х фазное	0,84	2,79	=>2
2-х фазное	0,724	2,12	
2-х фазное на землю	2,03	2,13	
1-фазное	1,7	4,87	

Как видно из таблицы 2, коэффициент чувствительности ДЗЛ для разработанного алгоритма, основанного на проведении расчётов активной составляющей токов по концам защищаемой ЛЭП, во всех режимах оказывается больше, чем у существующего алгоритма, основанного на сравнении полных значений токов, что позволяет обеспечить соответствие требованиям, предъявляемым Правилами устройства электроустановок к таким защитам при их установке на ЛЭП с продольной компенсацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты, полученные в диссертации:

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта применения защит на ЛЭП с УПК показал несовершенство алгоритмов функционирования существующей ДЗЛ, связанное с недостаточной чувствительностью данной защиты при КЗ на ЛЭП в режиме повышенной компенсации.

2. Разработана компьютерная модель электротехнического комплекса ЛЭП с продольной компенсацией, позволяющая количественно оценить влияние УПК на значения токов КЗ по разным концам линии и рассчитать значение коэффициента чувствительности ДЗЛ. Произведена оценка длины участка мёртвой зоны дифференциальной защиты продольно-компенсированной

ЛЭП в зависимости от степени продольной компенсации ЛЭП от 0 до 100 %.

3. Выполнена оценка влияния величины падения напряжения в точке КЗ на снижение дифференциального тока ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП. Установлено, что на ЛЭП с УПК величина минимального пикового значения дифференциального тока оказывается значительно ниже по сравнению с показателями на линии без компенсации. Доказано, что УПК влияют на снижение коэффициента чувствительности ДЗЛ только в установившихся режимах КЗ.

4. Предложен новый алгоритм функционирования ДЗЛ продольно-компенсированной ЛЭП, основанный на проведении расчётов активной составляющей токов по концам защищаемой ЛЭП. Контроль дифференциального значения активного тока позволяет обнаруживать КЗ на ЛЭП даже в режимах инверсии полного тока на одном из концов защищаемого участка, обеспечивая отсутствие мёртвых зон дифференциальной защиты во всех режимах работы линии. Разработана функциональная схема защиты, реализуемая на дифференциальном принципе с контролем дифференциального значения активного тока. Предлагаемая ДЗЛ, обеспечивая необходимое время реакции (≤ 25 мс), обладает более высокими значениями коэффициента чувствительности (≥ 2) в сравнении с ранее известными видами ДЗЛ, что позволяет обеспечить соответствие требованиям, предъявляемым Правилами устройства электроустановок к таким защитам при их установке на ЛЭП с продольной компенсацией.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее исследование предполагается вести в направлении развития общей теории электротехнических комплексов и систем, разработки научных основ для создания адаптивной дифференциальной защиты, т. е. защиты, алгоритмы функционирования которой автоматически подстраиваются под режимы работы электротехнического комплекса ЛЭП с продольной компенсацией.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня ВАК:

1. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Современное состояние проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-адаптивной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 102-123. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123.

2. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В. Оценка селективности дифференциальной защиты линии электропередачи напряжением 220 кВ с устройством продольной компенсации // Изв. вузов. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 68-75. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-2-68-75>

3. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Защита с повышенной чувствительностью при коротких замыканиях на линиях электропередачи 220 кВ с произвольной степенью продольной компенсации // Релейная защита и автоматизация. 2024. № 01 (54). С. 16-23.

4. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Моделирование участка электрической сети с устройством продольной компенсации для исследования параметров, влияющих на чувствительность дифференциальной защиты // Вестник ИГЭУ. – 2025. – №. 4. – С. 57-65. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.057-065.

Статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:

5. I. Yu. Ivanov, V. R. Ivanova and V. V. Novokreshenov, "Investigation of System Properties and Connections of Electrical Engineering Systems for Assessment of Selectivity of Power Line Differential Protection with a Series Compensation Device," 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 423-429, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906681.

Публикации в других изданиях:

6. Иванова В.Р., Новокрещенов В.В. «Исследование функциональных возможностей систем релейной защиты и автоматики для применения их в интеллектуальных энергосистемах с активно-адаптивной сетью» // Материалы IV Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», Казань 6-7 декабря 2018 г. - с. 138-140.

7. Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. «Обзор современных устройств релейной защиты и автоматики и измерительных преобразователей, используемых при модернизации электротехнических комплексов и систем». // Материалы XIV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», Казань 23-26 апреля 2019

г. том I, – с. 81-85.

8. Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. «Обзор устройств релейной защиты и автоматики и измерительных преобразователей электрического тока, применяемых при проектировании интеллектуальных и активно-адаптивных сетей». // Сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019)», Тольятти 12 – 13 ноября 2019 г. – с. 313-317.

9. Иванова В.Р., Новокрещенов В.В., Семенова О.Д. «Анализ основных элементов интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью». // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», Казань, 20-21 марта 2019 г. – с. 12-16.

10. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В. «Защита линии электропередачи с любой степенью продольной компенсации». // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», Казань 18–19 марта 2020 г. - с. 54-59.

11. Новокрещенов В. В. «Алгоритм защиты линии электропередачи с продольной компенсацией» // В сборнике материалов Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения - 2020 "Энергетика и цифровая трансформация"», Казань, 28-29 апреля 2020 г. – с. 416-419.

12. Новокрещенов В.В., Иванов И. Ю. «Моделирование линий электропередачи с устройством продольной компенсации» // Сборник докладов 51-й Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодёжи «Фёдоровские чтения - 2021», Москва, 17-19 ноября 2021 г. –с. 218-224.

13. Новокрещенов В. В. «Компьютерное моделирование аварийных режимов на линиях электропередачи с устройством продольной компенсации» // В сборнике материалов Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения - 2022 "Энергетика и цифровая трансформация"», Казань, 27-29 апреля 2022 г. –с. 428-430.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

14. Свидетельство № 2022612490 Рос. Федерация. Программа для реализации алгоритма защиты ЛЭП с произвольной степенью продольной компенсации. Иванов Игорь Юрьевич (RU), Новокрещенов Виталий Викторович (RU), Иванова Виля Равильевна. – № 2022612490; заявл. 26.01.2022; зарегистр. 28.02.2022; опубли. 11.03.2022. – 1 с.

Подписано в печать 04.06.2026. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 1006/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: +7(843)292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
