

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Особенности функционирования измерительных трансформаторов тока при коротких замыканиях

Обучающийся

З.Р. Пономарева

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

д.т.н., профессор, В.В. Вахнина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	3
1 Теоретические основы функционирования измерительных трансформаторов тока	8
1.1 Определение и классификация измерительных трансформаторов тока .	8
1.2 Принципы работы измерительных трансформаторов тока	25
1.3 Основные характеристики и параметры.....	35
2 Моделирование электрических сетей с трансформаторами тока в программном комплексе MATLAB.....	47
2.1 Моделирование электрических систем в MATLAB/Simulink	47
2.2 Имитация внешних и внутренних коротких замыканий	48
2.3 Модель группы трансформаторов тока	55
2.4 Расчет численных параметров моделей.....	60
3 Совершенствование алгоритмического обеспечения дифференциальных защит силовых трансформаторов	80
3.1 Поведение дифференциальной защиты при коротких замыканиях. Оптимизация алгоритмов защиты при внешних коротких замыканиях	81
3.2 Алгоритм чувствительной защиты, распознающий бросок тока намагничивания и внутренние короткие замыкания.....	93
Заключение	98
Список используемой литературы и используемых источников.....	100

Введение

Современные электроэнергетические системы предъявляют повышенные требования к надежности и точности работы измерительных трансформаторов тока (ТТ), особенно в аварийных режимах. Трансформаторы тока должны обеспечивать:

- безопасности эксплуатации энергооборудования;
- достоверности измерений в экстремальных условиях;
- эффективности действия защитных устройств.

Степень разработанности проблемы. Анализ научных публикаций показывает наличие существенных пробелов в изучении:

- нелинейных процессов намагничивания при сверхтоках;
- динамики переходных характеристик;
- взаимосвязи конструктивных параметров и точности измерений.

Актуальность исследования обусловлена рядом ключевых факторов.

Во-первых, возрастающими требованиями к надежности электроэнергетических систем.

Во-вторых, современные сети работают в условиях роста мощностей и усложнения режимов эксплуатации. При этом измерительные трансформаторы тока остаются критически важным звеном в цепочке защиты и контроля. Неточности их работы при коротких замыканиях (КЗ) могут привести к ложным срабатываниям или, наоборот, к задержке отключения аварии, что увеличивает риски каскадных аварий.

В-третьих, развитием цифровых систем релейной защиты. Внедрение микропроцессорных устройств РЗА требует более точных входных сигналов. Однако существующие модели ТТ не всегда учитывают нелинейные эффекты, возникающие при КЗ, что снижает эффективность современных алгоритмов защиты.

В-четвертых, недостаточной изученностью переходных процессов [10]. Традиционные методы оценки погрешностей ТТ базируются на

установившихся режимах, тогда как при КЗ доминируют динамические искажения, связанные с насыщением, аperiodическими составляющими и высокочастотными помехами. Это создает «слепые зоны» в нормировании и проектировании.

В-пятых, отсутствием комплексных подходов к анализу. Большинство исследований рассматривают ТТ изолированно, без учета взаимодействия с другими элементами сети (например, влияние параметров линии на характер КЗ). Актуальным становится системный анализ, включающий электромагнитные, тепловые и механические процессы.

Экономический аспект исследований обусловлен тем, что ошибки в работе ТТ приводят к миллионным убыткам из-за ложных отключений или повреждения оборудования. Разработка усовершенствованных методов оценки их работы позволит оптимизировать затраты на эксплуатацию и модернизацию сетей.

Целью диссертационной работы является – разработка методики оценки работоспособности трансформаторов тока в условиях коротких замыканий.

Измерительные трансформаторы тока в режиме короткого замыкания (КЗ) подвергаются комплексному воздействию экстремальных электромагнитных и тепловых нагрузок. Эти процессы могут вызывать значительные отклонения от нормированных метрологических характеристик, включая искажение формы вторичного тока, насыщение магнитопровода и нарушение линейности преобразования. В результате снижается достоверность информации, поступающей в систему релейной защиты и автоматики, что создаёт риск некорректной работы защитных алгоритмов и увеличивает вероятность развития аварийной ситуации:

- неоднородность распределения магнитного потока в сердечнике при экстремальных переходных процессах, вызванная асимметрией намагничивания;

- влияние высокочастотных составляющих апериодической составляющей тока КЗ на глубину насыщения и скорость восстановления метрологических характеристик;
- термоэлектрические эффекты в местах соединения вторичных обмоток, способные генерировать паразитные ЭДС и искажать сигнал.

Гипотеза заключается в том, что учет этих факторов позволит разработать усовершенствованные модели и методики оценки работы ТТ при КЗ, обеспечивающие повышение точности измерений и устойчивости устройств релейной защиты. Экспериментальная проверка предположений может выявить критические режимы, при которых существующие нормированные погрешности ТТ превышают допустимые значения, что требует корректировки стандартов испытаний.

Оригинальность обеспечивается за счет:

- анализа малоизученных физических явлений в ТТ при экстремальных КЗ;
- комплексного рассмотрения взаимовлияния электромагнитных и тепловых процессов;
- предложения новых критериев оценки динамического поведения ТТ.

Объектом исследования являются измерительные трансформаторы тока, работающие в условиях коротких замыканий (КЗ) в электрических сетях среднего и высокого напряжений. Акцент сделан на электромагнитные, динамические и тепловые процессы, возникающие в ТТ при протекании сверхтоков КЗ, а также на взаимодействие с устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА).

Исследование охватывает:

- физические процессы в ТТ – намагничивание сердечника, возникновение насыщения, влияние апериодической составляющей тока КЗ, переходные искажения вторичного тока;

- конструктивные особенности ТТ, определяющие их поведение при КЗ, тип магнитопровода (ленточный, шихтованный), материал сердечника, параметры вторичной нагрузки;
- режимы работы ТТ в составе цифровых и аналоговых систем релейной защиты и автоматики, включая анализ влияния алгоритмов обработки сигналов (например, дискретных преобразований Фурье) на точность измерений при КЗ.

Особое внимание уделяется нелинейным эффектам, которые традиционные методы расчета и стандартные испытания не учитывают в полной мере:

- локальный перегрев обмоток и изоляции при длительных КЗ;
- влияние высокочастотных составляющих переходных процессов;
- остаточная намагниченность сердечника после аварийных отключений.

Оригинальность объекта исследования подчеркивается:

- комплексным рассмотрением ТТ как элемента системы, а не изолированного устройства;
- анализом взаимосвязи между конструкцией, физикой процессов и метрологией в экстремальных условиях;
- включением в исследование современных цифровых ТТ и гибридных измерительных систем.

Научная новизна проблемы подчеркивается необходимостью:

- разработки новых критериев оценки динамического поведения ТТ;
- учета ранее игнорируемых факторов (например, термоэлектрических эффектов);
- создания адаптивных моделей для цифровых подстанций.

Научная новизна исследования предполагает:

- новый подход к моделированию нелинейных характеристик;
- усовершенствованную методику расчета переходных процессов;

- оригинальные решения по конструктивной оптимизации.

Практическая значимость заключается в следующем:

- улучшение алгоритма релейной защиты;
- повышение точности измерений при авариях;
- оптимизация конструкции ТТ.

Работа основана на:

- теоретическом анализе электромагнитных процессов;
- компьютерном моделировании;
- натурных экспериментах;
- статистических методах обработки данных.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы и используемых источников, отражающих последовательное решение поставленных задач.

1 Теоретические основы функционирования измерительных трансформаторов тока

1.1 Определение и классификация измерительных трансформаторов тока

Измерительные трансформаторы тока играют ключевую роль в функционировании электроэнергетических систем, обеспечивая надежный и безопасный контроль за электрическими параметрами. Трансформаторы тока как критически важный элемент энергосистем.

В современных электроэнергетических комплексах измерительные трансформаторы тока выполняют ряд принципиально важных функций.

Контрольно-измерительные задачи. обеспечение точного измерения силовых параметров, формирование достоверной информации о текущем состоянии сети, возможность оперативного мониторинга энергопотоков.

Защитные функции: непрерывный контроль параметров сети, обнаружение аномальных режимов работы, формирование сигналов для защитных устройств.

Особое значение при аварийных режимах.

В условиях короткого замыкания трансформаторы тока:

- обеспечивают мгновенное выявление критических ситуаций;
- позволяют точно определить параметры аварии;
- формируют сигналы для своевременного отключения поврежденных участков.

Актуальность исследований.

Изучение поведения ТТ при КЗ обусловлено необходимостью предотвращения, каскадного развития аварий, разрушения дорогостоящего оборудования, опасных ситуаций для персонала.

В современных энергосистемах особое внимание уделяется:

- надежности электроснабжения – минимизации рисков перебоев;

- защитным системам – их адаптивности к нештатным ситуациям;
- эксплуатационным параметрам – балансу между эффективностью и устойчивостью.

Критичные характеристики трансформаторов тока при авариях:

- устойчивость к сверхтокам без потери функциональности;
- минимизация погрешностей измерений при резких изменениях нагрузки;
- оперативная передача данных для срабатывания защитных механизмов;
- противостояние электродинамическим нагрузкам, вызывающим механические повреждения.

Особенности работы ТТ при коротком замыкании. Трансформаторы тока обеспечивают безопасный мониторинг высоковольтных линий, преобразуя токи до величин, пригодных для измерений. Однако в режиме КЗ возникают критические изменения:

- сверхтоки могут в десятки раз превышать номинальные значения, приводя к насыщению магнитопровода;
- искажение сигналов из-за насыщения усложняет диагностику и повышает риски ложных срабатываний защитных реле;
- термодинамические нагрузки угрожают целостности изоляции и контактов.

Таким образом, оптимизация ТТ для аварийных режимов – ключевое направление в повышении отказоустойчивости сетей. Исследования должны фокусироваться на:

- материалах сердечника, снижающих насыщение;
- алгоритмах коррекции погрешностей в реальном времени;
- конструктивных решениях для гашения электродинамических сил.

Это позволит усилить защиту инфраструктуры без компромиссов в точности контроля.

Для обеспечения стабильной работы измерительных трансформаторов тока в экстремальных условиях требуется комплексный подход, включающий.

Анализ предельных рабочих параметров. Определение максимально допустимых токовых нагрузок, оценка термической устойчивости обмоток, расчет электродинамической стойкости конструкции.

Разработка защитных мероприятий. Установка токоограничивающих устройств, применение быстродействующих выключателей, использование систем активного охлаждения.

Критические требования к ТТ при аварийных режимах.

Сохранение работоспособности при кратковременных превышениях номинального тока (до 50-100 раз), значительных электродинамических нагрузках, резких температурных колебаниях.

Обеспечение. Точности измерений в переходных процессах, быстродействия при передаче сигналов защиты, механической целостности конструкции.

Технические решения для повышения надежности.

Конструктивные особенности. Усиленная изоляция обмоток, применение термостойких материалов, оптимизация магнитопровода.

Системные меры. Дублирование измерительных цепей, автоматический мониторинг состояния, адаптивные алгоритмы защиты.

Практическая значимость.

Реализация указанных мер позволяет:

- предотвратить повреждение дорогостоящего оборудования;
- минимизировать последствия аварийных ситуаций;
- обеспечить бесперебойность энергоснабжения;
- повысить безопасность эксплуатации электроустановок.

Вторичной обмотки трансформатора также свойственна особая роль, при коротком замыкании ее напряжение также изменяется, что может негативно сказаться на работе других приборов и защитных устройств.

Кроме того, на работу трансформаторов тока оказывают влияние механические повреждения или загрязнения, приводящие к ухудшению состояния материалов и снижению срока службы. Поэтому регулярные проверки и испытания ТТ, особенно в условиях, где есть риски возникновения коротких замыканий, являются необходимыми для обеспечения надежной работы электроэнергетических систем в критических ситуациях. Поддержание надежности и функциональности ТТ в условиях короткого замыкания является ключевым аспектом для оптимизации электроэнергетических решений и обеспечения безопасности эксплуатации системы [5].

Современные трансформаторы тока представляют собой высокоэффективные устройства, которые имеют сложную конструкцию, позволяющую минимизировать риск повреждения изоляции и конверсионных компонентов. «Создание надежной конструкции, которая защитит изоляцию и элементы преобразования, имеет первостепенное значение». В условиях постоянных коротких замыканий они должны сохранять работоспособность, обеспечивая защиту электрических сетей от негативных воздействий. Сергеева О.Л. подчеркивает важность учета всех возможных аварийных ситуаций, возникающих в ходе эксплуатации трансформаторов тока [7].

Приоритетные направления разработок Современные исследования в области трансформаторов тока сконцентрированы на следующих аспектах:

- усовершенствование конструкций – поиск решений, повышающих устойчивость к экстремальным нагрузкам при КЗ;
- развитие систем защиты – создание механизмов, предотвращающих повреждения от сверхтоков и перегрев;
- инновационные материалы – применение наноструктурированных изоляционных покрытий с повышенной термостойкостью;
- прогнозная аналитика – внедрение систем мониторинга, способных заранее выявлять потенциальные отказы.

Ключевые конструктивные усовершенствования:

- теплоотводящие элементы - использование композитных материалов с высокой теплопроводностью для предотвращения локального перегрева;
- магнитопроводы с пониженным насыщением – оптимизация формы и состава сердечников для сохранения точности измерений при КЗ;
- герметичные корпуса – защита от влаги, пыли и химических воздействий в промышленных условиях.

Особенности стандовых трансформаторов тока.

Данный тип ТТ широко применяется в высоковольтных сетях благодаря:

- стандартизированным параметрам – обеспечение стабильной работы в регламентированных условиях;
- модификациям исполнения – возможность изготовления как однофазных, так и трехфазных версий;
- усиленной изоляции – комбинированные диэлектрические материалы, исключающие пробой при скачках напряжения.

Перспективные разработки.

В экспериментальной стадии находятся:

- самодиагностирующиеся системы – ТТ со встроенными датчиками деформации и частичных разрядов [33];
- гибридные преобразователи – комбинация традиционных и оптических технологий измерения тока [9];
- адаптивные алгоритмы защиты – динамическая корректировка параметров срабатывания в зависимости от режима сети.

Трансформаторы тока движутся в направлении создания «интеллектуальных» устройств [34], сочетающих механическую надежность с цифровыми технологиями контроля. Это позволит не только повысить безопасность энергосистем, но и перейти к предиктивному обслуживанию оборудования.

Особенности конструктивного исполнения трансформаторов тока.

Маслонаполненные трансформаторы тока.

Данный тип оборудования применяется в энергосистемах с экстремальными нагрузками благодаря уникальной системе охлаждения. Жидкий диэлектрик, циркулирующий внутри корпуса, обеспечивает эффективный теплоотвод даже при длительных перегрузках. Несмотря на значительные массогабаритные показатели, такие трансформаторы незаменимы в условиях тропического климата, на промышленных предприятиях с высокой тепловой нагрузкой, в энергоузлах с циклическими пиковыми нагрузками.

Экранированные трансформаторные устройства.

Современные модели с магнитным экранированием решают две ключевые задачи, полная нейтрализация внешних электромагнитных помех, оптимизация энергопотребления самого устройства.

Конструктивная гибкость позволяет устанавливать оборудование как в закрытых распределительных щитах, монтировать устройства непосредственно на открытых площадках, интегрировать в существующие сети без модернизации инфраструктуры.

Трансформаторы с интегрированной защитой.

Инновационные защитные системы включают многоуровневые релейные блоки, микропроцессорные системы контроля, автоматические ограничители перенапряжений.

Такое исполнение гарантирует:

- мгновенное срабатывание защиты (до 20 мс);
- предотвращение развития аварийных ситуаций;
- защиту подключенного электрооборудования;
- минимизацию простоев энергосистемы.

Современные тенденции показывают переход от простых измерительных устройств к многофункциональным комплексам, сочетающим функции измерения, защиты и диагностики.

Перспективные разработки в области трансформаторных устройств.

Гибридные трансформаторные системы. Современные гибридные решения сочетают.

Традиционные электромагнитные компоненты, цифровые измерительные модули, микропроцессорные блоки управления.

Преимущества такой архитектуры - увеличенный срок службы (до 25-30 лет), адаптивность к различным условиям эксплуатации, возможность интеграции в smart-grid системы.

Высокочастотные преобразователи.

Особенности применения:

- рабочий диапазон частот 1-100 кГц;
- время отклика менее 1 мс;
- погрешность измерений не превышает 0,2%.

Области использования:

- промышленная автоматизация;
- системы релейной защиты;
- прецизионные измерения в научных установках.

Факторы устойчивости к аварийным режимам.

Ключевые аспекты проектирования.

Динамический анализ электродинамических сил, расчет механических напряжений, оптимизация крепежных элементов, выбор материалов с повышенной прочностью.

Термическая стабильность, моделирование тепловых полей, применение композитных изоляторов, системы принудительного охлаждения.

Системы автоматической защиты, алгоритмы прогнозирования перегрузок, каскадные схемы отключения, самодиагностика оборудования.

Современные стандарты проектирования требуют комплексного подхода, учитывающего:

- пиковые значения токов КЗ;
- кумулятивное тепловое воздействие;
- взаимодействие с другими элементами сети.

«Ключевые аспекты подбора оборудования.

Технико-эксплуатационные параметры, номинальные значения первичного/вторичного тока, класс точности измерений, диапазон рабочих температур, степень защиты оболочки (IP).

Аварийная устойчивость, показатель электродинамической стойкости, термическая устойчивость при КЗ, коэффициент безопасности по току насыщения.

Особенности работы при коротких замыканиях.

При проектировании систем необходимо учитывать.

Механические воздействия, электродинамические силы до 50 кН, вибрационные нагрузки на обмотки, деформационные характеристики материалов.

Тепловые процессы, локальный нагрев до 200-300°C, термическая инерция элементов конструкции, скорость теплоотвода.

Практические рекомендации по выбору.

Для промышленных объектов, запас по току КЗ не менее 30%, класс точности 0,5S или выше, температурный диапазон -40...+70°C.

Для распределительных сетей, минимальная погрешность в переходных режимах, встроенные системы мониторинга, совместимость с цифровыми защитными устройствами» [2].

«Короткое замыкание – катастрофический сбой в электрической цепи, который может повлечь за собой катастрофические последствия, связанные с повреждениями оборудования и угрозами для здоровья людей. Для трансформаторов тока, работающих в условиях возросшего тока, их основная задача – сохранять надлежащие параметры и обеспечивать конструктивную безопасность путем регулирования рабочего состояния» [12].

«Это влечет за собой отказ в работе токовых измерительных устройств и приводит к недостоверным показаниям тока. В случае применения трансформаторов в защитных схемах – это может привести к срабатыванию оборудования без фактической причины.

Для защиты трансформаторов от таких ситуаций применяются различные методы. Например, автоматические выключатели и защитные реле, реагирующие на превышение допустимых значений тока. Важным аспектом является учет нагрузки на вторичной обмотке ТТ. Указанные методы защиты помогают избежать ситуации, когда вторичная обмотка оказывается под слишком высоким напряжением, предотвращая ее повреждение. Установление дополнительной нагрузки в виде резисторов может стать решением проблемы. Такой подход особенно актуален для систем, чувствительных к изменениям в электрической цепи, где необходимо сохранять точность и надежность» [22].

«Изучение трансформаторов тока при коротком замыкании – чрезвычайно актуальная задача для современных исследователей. Обсуждаются новые конструкции магнитопроводов, которые обеспечивают более высокий уровень надежности и улучшенные эксплуатационные характеристики, предотвращая их насыщение даже в условиях сильных токов. Совершенствование изоляционных материалов и обмоток также придает критическую важность данной теме. В результате, трансформаторы тока становятся более устойчивыми к воздействиям, возникающим в результате коротких замыканий» [2].

Износ и повреждения, испытываемые трансформаторами тока в процессе короткого замыкания, могут стать причиной серьезных аварий и выходов из строя оборудования. Критическим моментом является резкое увеличение токов, превышающих предельные значения работы трансформатора. Это порождает угрозу не только для самого трансформатора, но также вызывает сбои во всей электрической системе.

Основной особенностью работы трансформаторов тока при КЗ является их максимальная работоспособность в течение ограниченного времени, не превышающего нескольких секунд. Для обеспечения надежной защиты трансформаторов тока разрабатываются специальные защитные схемы,

которые принимают во внимание критические параметры, такие как номинальный ток, напряжение и рабочие условия при КЗ.

При анализе воздействия короткого замыкания необходимо оценивать такие параметры как пики токов и их влияние на чувствительность трансформатора. В режиме КЗ трансформатор подает искаженные сигналы. Определенное внимание следует уделять координации первичных и вторичных токов, поскольку в этом случае трансформационный коэффициент может изменяться. Внедрение высокочувствительных реле защиты позволяет быстро реагировать на отклонения в параметрах, что приводит к немедленному отключению последующих токов и предотвращению аварийных ситуаций.

Стоит отметить, что во время испытаний на короткое замыкание наблюдаются изменения в проводимости обмоток трансформатора, что обусловлено температурными колебаниями. Когда температура повышается, сопротивление обмоток может изменяться, что зачастую приводит к их повреждению. По этой причине важно использовать конструкции, выполненные из термостойких материалов, которые значительно увеличивают устойчивость трансформатора к повреждениям, вызванным короткими замыканиями. Критические факторы конструкционной надежности.

Динамические нагрузки при КЗ. Электродинамические силы достигают 10-15 кН на погонный метр обмотки, вибрационные ускорения до 5g при переходных процессах, остаточные деформации проводников после многократных КЗ.

Конструкционные решения. Применение армированных эпоксидных компаундов для фиксации обмоток, использование терморезистивных изоляционных материалов, оптимизация геометрии обмоток методом конечных элементов.

Термомеханический анализ компонентов.

Ключевые параметры оценки:

- коэффициент теплового расширения материалов;
- предел текучести медных проводников (120-250 МПа);
- модуль упругости изоляционных конструкций (3-10 ГПа).

Методы повышения устойчивости:

- внедрение композитных демпфирующих элементов;
- применение систем активного охлаждения с жидкостной циркуляцией;
- использование SMART-материалов с памятью формы.

Особенности метрологических характеристик.

В аварийных режимах наблюдаются:

- кратковременные погрешности до 15-20%;
- фазовые сдвиги до 5-7 градусов;
- нелинейные искажения характеристики намагничивания.

Современные решения:

- цифровая коррекция показаний в реальном времени;
- адаптивные алгоритмы компенсации насыщения;
- встроенные эталонные измерительные контуры.

Современные подходы к проектированию предусматривают комплексное моделирование электромеханических процессов, что позволяет создавать трансформаторы с прогнозируемым поведением в аварийных ситуациях.

Сопротивление нагрузки играет ключевую роль в процессе формирования выходного сигнала трансформатора. При недостаточном уровне сопротивления возможен перегрев аппарата, а при его высоких значениях – резкое снижение качества выходного сигнала. Оба этих явления имеют негативные последствия для точности измерений и защиты оборудования. Во время короткого замыкания выходной сигнал устройства зависит от конструкции и эксплуатационных условий. Например, если сопротивление нагрузки оказывается слишком низким, это может привести к перегреву и разрушению изоляции, в то время как недостаточная реакция

нагрузочного элемента на изменения тока может спровоцировать ложные срабатывания защитных механизмов. Поэтому при выборе нагрузочных элементов необходимо учитывать не только их статические характеристики, но и динамические параметры в условиях короткого замыкания. Как отмечают Смирнов А.В. и Петрова Е.И., критически важно, чтобы реакция на изменения тока была оптимальной. В противном случае это может привести к перегреву или перегрузке, что способно вызвать разрушение и повреждения [2].

Для повышения надежности трансформатора в условиях короткого замыкания требуется регулирование уровня его перегрузки. Это возможно через внедрение автоматизированных защитных реле, которые способны анализировать фактические условия работы трансформатора и предсказывать возможные аварии. Синхронизация работ трансформатора с системой автоматического управления становится необходимым шагом для достижения данной цели. Система управления должна учитывать особенности нагрузки и вносить коррективы в параметры работы трансформатора. Использование продуманных стратегий управления позволяет снизить вероятность возникновения серьезных повреждений и обеспечивает более гармоничное функционирование всех частей системы.

В процессе исследования измерительных трансформаторов тока в условиях короткого замыкания акцентируется внимание на оценке влияния нагрузочного элемента на рабочие характеристики трансформатора. Исследование различных сценариев с учетом разнообразных нагрузочных параметров является важным для более точного понимания уровня защитного механизма в системе и ее способности к адаптации в условиях нестандартных ситуаций. Такой анализ необходим, так как резкие изменения в нагрузке могут негативно сказываться на общей безопасности и долговечности работы трансформатора.

Кроме того, нельзя недооценивать анализ того, как трансформаторы тока реагируют на действия защитных реле и других критически важных компонентов. В определённых условиях внедрения нагрузочных элементов

может быть оправдано с целью повышения надежности и общей безопасности устройства, что предотвращает потенциальные угрозы. Сравнительные исследования характеристик различных нагрузочных элементов и их производительности в экстренных условиях помогают четко понимать их роль и важность в общей схеме. Защита трансформаторов тока от короткого замыкания – ключевой элемент надежности электрооборудования. Проектирование и эксплуатация трансформаторов должны быть направлены на минимизацию вероятности их повреждения, а также на гарантирование их нормальной работы в экстремальных условиях. Нужно учитывать, что во время коротких замыканий токи могут превышать рабочие нагрузки, поэтому ключевым аспектом проектирования является поведение трансформатора в таких условиях, его изоляционные свойства, конструкция и материалы. Эффективная защита трансформаторов от механических повреждений, перегрева и воспламенения требует применения различных методов и технологий защиты.

Предохранители представляют собой один из самых распространенных методов защиты электротехнического оборудования, которые работают с отключением электрической цепи при превышении определенного порога тока. Они могут быть встроенными в трансформаторы или располагаться в отдельных корпусах вне устройства. Самая важная функция предохранителей – отключение цепи в случае короткого замыкания, предотвращая тем самым перегрев, повреждение трансформатора и возникновение серьезных последствий.

Автоматические выключатели – еще один эффективный метод защиты, характеризующийся многофункциональностью и высоким уровнем надежности. Помимо защиты от короткого замыкания, они способны выполнять дополнительные задачи благодаря программируемым функциям. С их помощью можно осуществлять выборочное отключение, что позволяет минимизировать отключение всей сети при возникновении аварий на

отдельных участках. Выбор типа автоматического выключателя зависит от характеристик сети и требований по скорости срабатывания защиты.

Также стоит отметить важность реле токовой защиты, которые предотвращают повреждение трансформаторов. Эти устройства контролируют различные параметры сети – напряжение, ток и их предельные значения. Чаще всего используются реле, работающие на основе сравнения входного и выходного параметров, которые подключаются к обмоткам трансформаторов тока и сигнализируют о возникновении отклонений.

Современные системы мониторинга также активно внедряются в защиту трансформаторов. Эти системы, использующие передовые технологии, обеспечивают возможность постоянного контроля состояния оборудования и предсказывают последствия короткого замыкания на основе анализа исторических данных о токе и других параметрах.

«Интеграция Интернета вещей (IoT) в мониторинг трансформаторов открывает новые горизонты для повышения надежности работы оборудования.

Романов Д.П. подчеркивает, что «симуляционные модели позволяют предсказать работу трансформаторов тока в условиях короткого замыкания», что дает возможность инженерам заранее оценить потенциальные сценарии аварийных ситуаций и оптимизировать параметры защиты на основе полученных данных» [8].

«Надежная работа трансформаторной подстанции не может быть отделена от общего контекста всей электросетевой инфраструктуры. Все защитные и управляющие механизмы должны действовать как единое целое. В противном случае это может повлечь за собой отключения и аварии в сети. В процессе работы трансформаторы сталкиваются с различными нагрузками, что может привести к ухудшению изоляции и механическим повреждениям, отрицательно влияющим на их функционирование. Ключевым моментом в поддержании надежности является регулярная диагностика для оценки состояния и необходимости ремонта. Трансформаторы тока играют важную

роль в измерении электрических параметров и защитах от перегрузок и коротких замыканий. Хотя сегодня существует множество исследований, посвященных этому оборудованию, многие аспекты, особенно в условиях аварийных ситуаций, остаются недостаточно изученными. Более глубокое понимание работы трансформаторов тока в моменты короткого замыкания может значительно повысить надежность всего электросетевого хозяйства» [1].

«Изучение динамических характеристик трансформаторов тока во время короткого замыкания имеет жизненно важное значение для их эффективного функционирования. Разнообразные факторы оказывают влияние на рост тока при коротком замыкании и его допустимые предельные значения, включая конструкцию трансформатора и используемые в производстве материалы. Чтобы детально понять эти процессы, важно применять теоретические и экспериментальные методы, которые помогут определить их закономерности и предельные условия работы» [6].

Современные композитные решения.

Магнитные материалы нового поколения. Наноструктурированные ферромагнетики [35] с контролируемой доменной структурой, аморфные и нанокристаллические сплавы с проницаемостью до 100000, многослойные магнитопроводы с изолирующими прослойками.

Перспективные изоляционные системы. Керамико-полимерные композиты с диэлектрической прочностью до 50 кВ/мм, самовосстанавливающиеся изоляционные покрытия, гибридные материалы с регулируемой теплопроводностью.

Технологические преимущества.

Ключевые улучшения:

- снижение потерь на вихревые токи на 40-60%;
- уменьшение массы активных элементов на 25-30%;
- повышение температурной стабильности до 200°C.

Эксплуатационные выгоды:

- увеличение межповерочного интервала;
- снижение требований к системам охлаждения;
- повышение точности в переходных режимах.

Производственные инновации.

Передовые технологии изготовления:

- аддитивное производство магнитопроводов сложной формы;
- плазменное напыление изоляционных слоев;
- вакуумная пропитка наномодифицированными составами.

«Исследование тепловых процессов, возникающих при коротких замыканиях трансформаторов тока, становится важным направлением для повышения их надежности. В процессе короткого замыкания в ТТ возникают длительные и значительные перегревы, что уменьшает их надежность. Устойчивость к перегреву трансформаторных материалов и эффективное теплоотведение играют ключевую роль в повышении надежности конструкций ТТ. Понимание динамических процессов, происходящих во время короткого замыкания, исчерпывающе описано в исследованиях ученых, таких как М.М. Бондаренко. Он выделяет необходимость исследования динамических характеристик и влияние на них магнитных и изоляционных материалов» [20].

«Еще одной значимой задачей в работе ТТ становится внедрение цифровых технологий и автоматизации. Инновационные решения, такие как системы диагностики и мониторинга с использованием Интернета вещей, могут существенно повысить эффективность деятельности ТТ. Быстрая диагностика неисправностей, повышение качества учета и мониторинга состояния каждого отдельного устройства позволяет значительно повысить надежность всей системы. Предложенные алгоритмы обработки данных представляют собой надежные инструменты в предоставлении информации о состоянии ТТ, что содействует в быстром выявлении неполадок» [1].

Кроме того, важно осознавать взаимодействие разных элементов, таких как защитные устройства и измерительные установки. Понимание их

взаимосвязей позволит создавать более эффективные и надежные системы. Кросс-дисциплинарный подход, объединяющий электротехнику, информатику и материаловедение, откроет двери для новых достижений в этой области.

Современные численные методы и программное обеспечение позволяют более детально исследовать динамику работы трансформаторов. Проектирование точных математических моделей процессов, происходящих в трансформаторах, предоставляет возможность лучше понять физику их работы и провести различные сценарные исследования, что откроет новые горизонты для оптимизации конструкции и улучшения эксплуатационных характеристик трансформаторов.

Научные исследования, посвященные надежности трансформаторов тока в условиях коротких замыканий, помогают четко сформулировать современные представления о механизмах аварийных ситуаций и способах их предотвращения. Например, Сергеева О.Л. говорит о важности изучения синхронизации и взаимодействия защитных систем в условиях коротких замыканий, рассматривая это направление как важную область для дальнейших исследований [7]. Внедрение более совершенных защитных систем и оптимизация взаимодействия между ними позволят значительно повысить надежность и безопасность работы трансформаторов.

Актуальность «соблюдения современных стандартов и норм» в производстве трансформаторов не вызывает сомнений. Актуализация существующих нормативов и внедрение новых технологий в области трансформаторного оборудования должны опираться на все последние достижения науки. Это обеспечит безопасность и оптимальную эффективность работы трансформаторов в различных условиях.

В итоге, чтобы проектировать высокоточную токовую трансформацию, следует сосредоточиться на анализе последствий короткого замыкания для трансформаторов тока. На данном этапе важен как теоретический подход, так и практическая реализация новейших разработок, что позволит создать

трансформаторы, способные работать в условиях электросетей с повышенными нагрузками. В условиях ускоренного роста энергетической инфраструктуры и увеличения потребительских требований, такая необходимость становится особенно актуальной. Поскольку случаи коротких замыканий становятся все более распространенными, технология должна быть готова к эффективному решению этой проблемы.

1.2 Принципы работы измерительных трансформаторов тока

В сфере энергетических систем часто возникает задача преобразования электрических параметров в аналогичные с другими значениями. Эта необходимость обусловлена моделированием процессов, протекающих в электроустановках, а также для безопасного выполнения измерений. Устройство, выполняющее эту функцию, называется трансформатором тока. Он работает на основе закона электромагнитной индукции, который позволяет преобразовать первичный ток в пропорциональный вторичный ток.

Трансформатор тока обеспечивает возможность выполнения точных измерений при отсутствии непосредственного подключения к высоким токам, что значительно увеличивает безопасность и надежность работы оборудования. Измерительные устройства, использующие трансформаторы тока, позволяют эффективно контролировать параметры нагрузки и предотвращать аварийные ситуации.

Схема на рисунке 1 является иллюстрацией, объясняющей процессы, происходящие в трансформаторе.

Ток I_1 с определенными параметрами достигает первичной обмотки с количеством витков w_1 и полным сопротивлением Z_1 . Это приводит к созданию магнитного потока Φ_1 , который проходит через магнитопровод, расположенный таким образом, что его направление перпендикулярно вектору (I_1) для оптимизации передачи энергии и минимизации потерь.

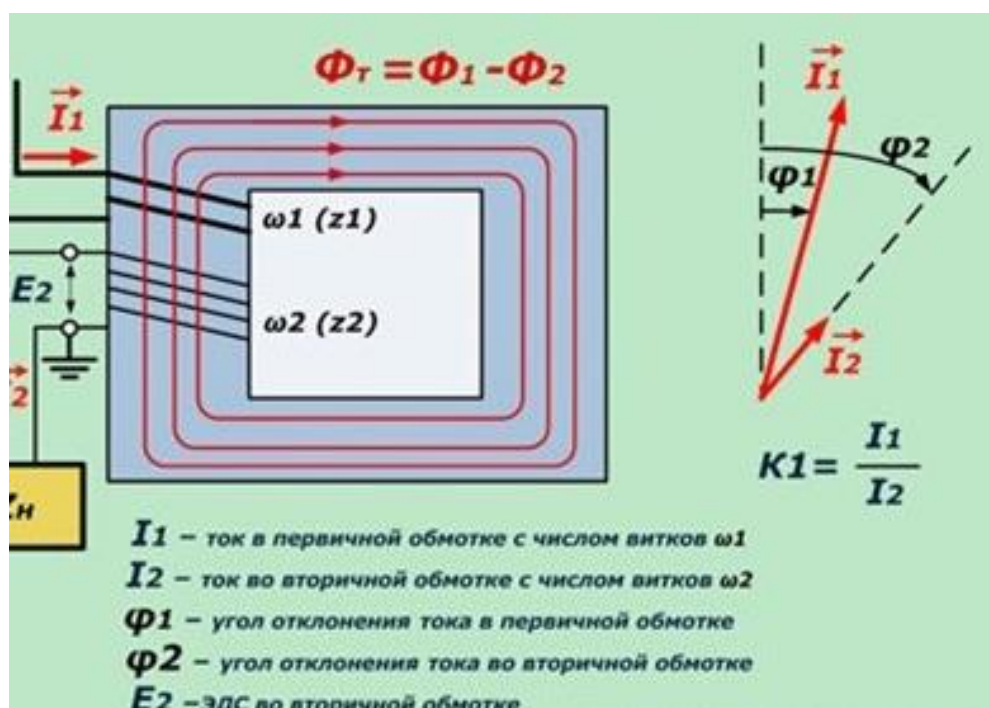


Рисунок 1 – Принципы работы трансформатора тока

Когда этот магнитный поток Φ_1 взаимодействует со вторичной обмоткой, состоящей из w_2 витков, он индуцирует электродвижущую силу, образующую вторичный ток I_2 . Ток I_2 сталкивается с сопротивлением Z_2 и подключенной нагрузкой Z_N , что вызывает падение напряжения U_2 на зажимах трансформатора.

Коэффициент трансформации K_1 , определяющий соотношение токов I_1 и I_2 , разрабатывается в этапе проектирования и контролируется на этапе испытаний. Разница между проектными и фактическими значениями определяет класс точности трансформатора, что является важным метром для надежного измерения. Каждый трансформатор имеет свои уникальные характеристики и предназначен для определенных измерительных задач.

Обратите внимание, что в трансформаторе токи в обмотках изменяются в зависимости от нагрузки, что обуславливает использование номенклатурного коэффициента трансформации. Например, для записи 1000:5, это означает, что если ток в первичной обмотке составляет 1 кА, то во

вторичной обмотке будет 5 А, на основании чего рассчитывается рабочий срок трансформатора тока.

В результате, полный магнитный поток Φ_T трансформатора представляет собой векторную сумму первичного Φ_1 и вторичного Φ_2 магнитного потоков.

В проектировании трансформаторов тока важное место занимает использование металлического магнитопровода, который связывает первичную и вторичную обмотки. Однако следует учитывать, что такая конструкция может создавать риск электрических травм из-за повреждения изоляции между обмотками. Для снижения этого риска и защиты обслуживающего персонала, а также оборудования, необходимо внедрять заземление.

Важно отметить, что заземляется лишь один вывод вторичной обмотки, что позволяет в случае пробоя изоляции наводить высокий потенциал на заземленный вывод. На трансформаторе этот вывод помечен специальным знаком, и эта информация прописана в электрических схемах, что позволяет быть в курсе всех рисков. Таким образом, заземление вторичной обмотки является важной мерой для предотвращения возможных несчастных случаев.

При этом вторичные обмотки трансформатора маркируются «И1» и «И2», что помогает отслеживать полярность и направление токов в каждой из обмоток. Это также необходимо для поддержания нагрузки на вторичных обмотках, что гарантирует стабильную работу всей системы.

Когда первичная обмотка получает электрический ток, мощность ($S=U \cdot I$) передается во вторичную цепь, обеспечивая минимальные потери. Однако при обрыве вторичной цепи ток уменьшается, что вызывает резкий рост напряжения на обрывах. Это подчеркивает важность надежной работы трансформаторов и правильной эксплуатации системы.

Если вторичные обмотки трансформатора отключить, возможно возникновение высокого напряжения до нескольких киловольт, что представляет собой серьезную угрозу. Поэтому крайне необходимо, чтобы

вторичные обмотки были всегда подсоединены к нагрузке. В ситуации, когда происходит отключение обмоток, важно установить шунтирующие закоротки на оборудование. Это поможет предотвратить создание опасных условий и защитить трансформатор от потенциальных проблем. Правильное соединение и корректная эксплуатация вторичных обмоток гарантируют безопасность и надежность работы трансформатора, устраняя риски возникновения аварий. Для долговременной эффективной работы устройства важно, чтобы все компоненты были надежно взаимодействовали друг с другом, минимизируя возможные опасности.

Это подчеркивает, что не всегда требуется кардинально изменять подход к изобретениям. Иногда достаточно адаптировать уже существующие конструкции. Основные принципы проектирования тороидального трансформатора можно обнаружить на представленном слева рисунке 2.

Для трансформаторов тока, в которых используется явное ветвление на вторичной обмотке, характерна возможность подключения нескольких последовательных обмоток к одной первичной цепи. Благодаря многослойной конструкции осуществляется передача сигнала на выход трансформатора. В случае применения двух или более одотрансформаторных систем, решающих задачу вхождения тока, при этом используются, например, группы индуктивных трансформаторов, имеющих свои вторичные цепи и обмотки.

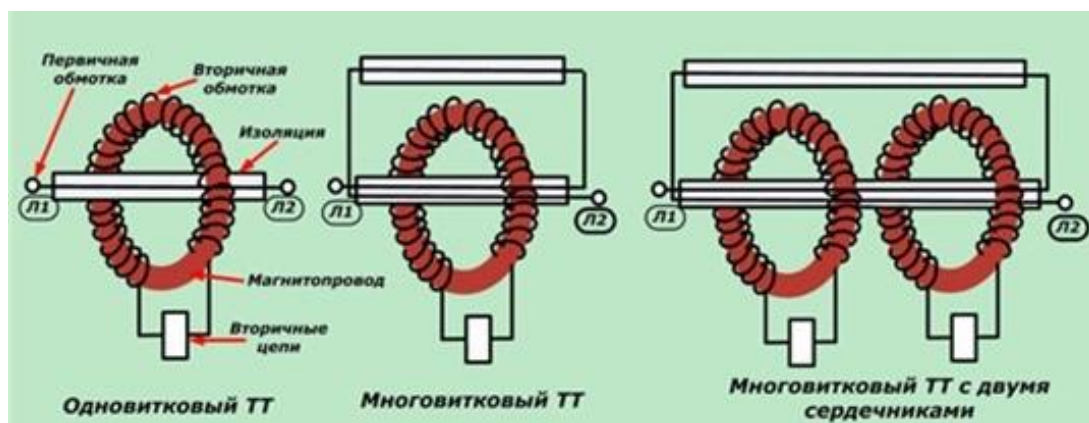


Рисунок 2 – Принципиальные схемы конструкций трансформаторов тока

Эффективная работа таких трансформаторов заключается в их способности обеспечить независимость вторичных цепей друг от друга. Это особенно актуально для выполнения задач контроля и защиты. С использованием таких конструкций представлены в значительной части трансформаторов тока. В зависимости от соотношения нагрузки и трансформатора, может быть использован комбинированный вариант, так как он позволяет менять конфигурацию, чтобы улучшить работу устройства в зависимости от его состояния. В таких системах под нагрузку можно назначить нагрузку как на одну обмотку, так и на несколько, что дает возможность в условиях нормальной работы обеспечивать один режим работы устройства, а в условиях переходного – другой. Поэтому в исследовании, проведенном А. Смирновым, поднимается вопрос о целесообразности применения усиленных защитных обмоток в условиях аварийной ситуации. Экспериментально было установлено, что «защитные обмотки, маркируемые индексом «Р» (релейные)» позволяют улучшить защитные функции трансформаторов тока в условиях аварийных ситуаций» [2].

В представленной модели первичного тока с допустимой погрешностью 10% (десятипроцентная модель) трансформатор функционирует в стандартных условиях, гарантируя свою надежность и точность. Модель замещения трансформатора, представленная на рисунке 3, которая отображает принцип функционирования, демонстрирует, что все первичные величины определяются через вторичные намотки трансформатора. Вектор первичного тока, представленный на рисунке, дает возможность в кратчайшие сроки оценить работоспособность устройства с высокой степенью доверия. Исходя из модели замещения, можно наблюдать, как первичные параметры отображаются, что значительно облегчает процесс диагностики и анализа [1].

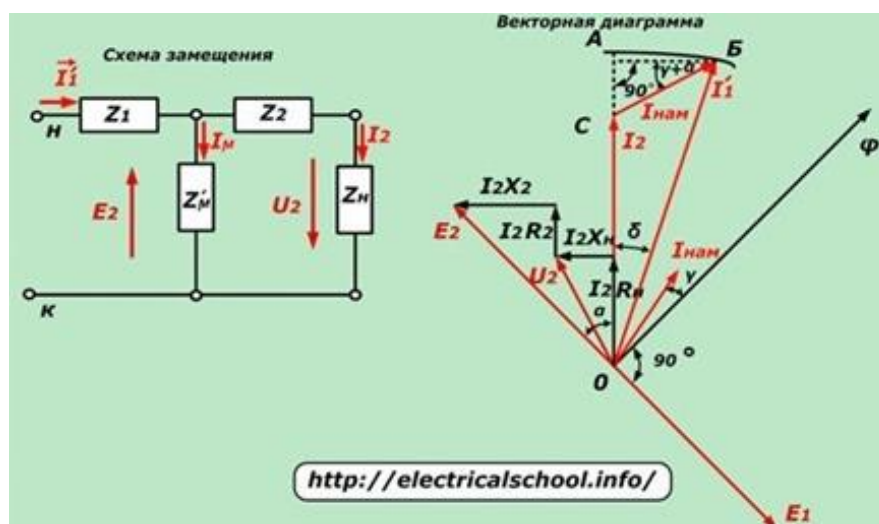


Рисунок 3 – Погрешности трансформатора тока

Схема замещения – мощный аналитический инструмент, визуализирующий воздействие различных процессов на обмотки трансформатора. Ключевым аспектом является учет потерь на намагничивание, связанных с током I . На основании этого подхода мы можем конструировать векторные диаграммы (например, треугольник СБ0), которые иллюстрируют взаимосвязь между токами I_2 и I_1 , с учетом дополнительных токов I , проходящих через намагничивающую обмотку. Это может значительно усложнять работу трансформатора, снижая его эффективность и точность.

Для оптимизации работы трансформаторов необходимо внедрять специальные методологии и практики. Угол, соответствующий этому отклонению, вычисляется в радианах и определяется по длине дуги АБ.

Эффективное использование схемы замещения трансформатора помогает в диагностике и устранении проблем, а также в повышении общей надежности и производительности оборудования.

Трансформаторы тока в отличие от универсальных изделий имеют разнообразные показатели точности. Классы точности трансформаторов тока варьируются от 0,2 до 10%, определяемые их функциональным назначением и конструктивными характеристиками. Различают компактные модели для

электроники и мощные аппараты для энергетических систем, требующие строгого контроля параметров.

Трансформаторы тока классифицируются по определенным критериям, включая тип изоляции и характеристики трансформации. Эти устройства широко используются в электрических системах для учета энергопотребления и в качестве элементов защиты. Выносные измерительные трансформаторы играют ключевую роль в обеспечении безопасности и точности измерений в электрических сетях. Недавно были установлены такие трансформаторы на воздушной распределительной установке (ОРУ) 110 кВ для защиты силовых автотрансформаторов, что значительно повысило уровень защиты и точности трансформации. На рисунках 4 и 5 представлено оборудование, установленное для каждой фазы, с надежно подключенными вторичными цепями в клеммном ящике, что подтверждает высокое качество и надежность монтажа. Это гарантирует стабильную работу трансформаторов, что критически важно для бесперебойного функционирования всего энергосистемы.



Рисунок 4 – Выносные трансформаторы тока силового автотрансформатора стороны 110 кВ на ОРУ

На открытых распределительных устройствах с рабочим напряжением 330 кВ применяются токоизмерительные трансформаторы, которые обладают более крупными размерами. Увеличенные размеры токоизмерительных

трансформаторов обусловлены необходимостью их надежной работы в условиях повышенной сложности эксплуатации оборудования.



Рисунок 5 – Трансформаторы тока ВЛ-330 кВ на ОРУ-330

В силовой электронике токовые трансформаторы, которые являются неотъемлемой частью силового оборудования (рисунок 6).

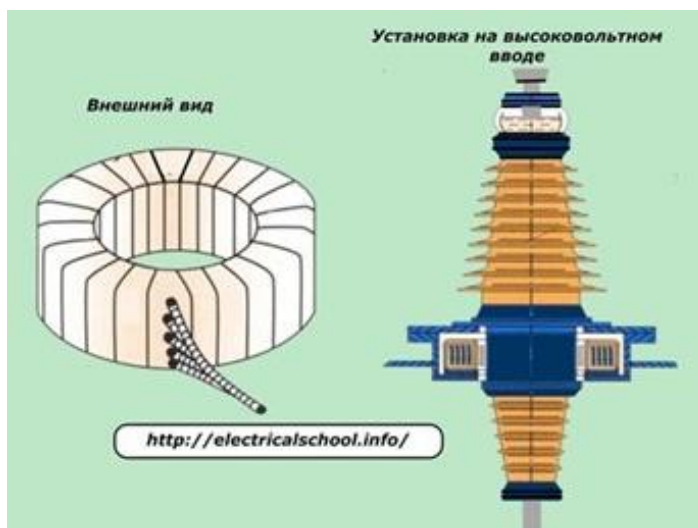


Рисунок 6 – Конструкция встроенного токового трансформатора тока

Для создания трансформаторов тока на уровнях напряжения от 20 до 35 кВ в качестве диэлектрической основы применяется трансформаторное масло,

способное гарантировать изоляцию и безопасность в случае КЗ. На рисунке 7 демонстрируется стандартный трансформатор тока ТФЗМ, сфокусированный на эксплуатации в условиях высокой влажности.

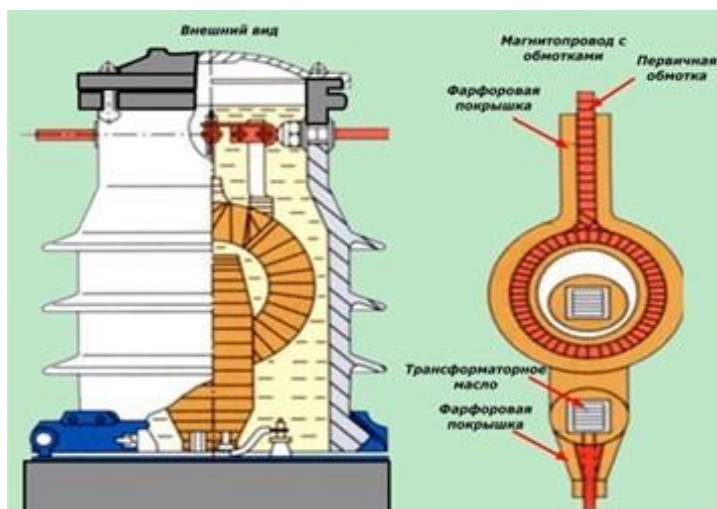


Рисунок 7 – Трансформатор тока ТФЗМ-35 кВ

Согласно точке зрения В.И. Киселева, «использование твердых диэлектриков в конструкции трансформаторов с номинальным напряжением до 10 кВ обеспечивает надежную изоляцию, что крайне важно в распределительных сетях» [1]. Ярким примером служит трансформатор тока ТПЛ-10 (рисунок 8), который в основном используется в комплектных распределительных устройствах (КРУН) и заводских распределительных устройствах (ЗРУ).

Важность надежной изоляции обмоток и корпуса трансформаторов предполагает использование твердых диэлектриков, что особенно актуально для распределительных сетей.

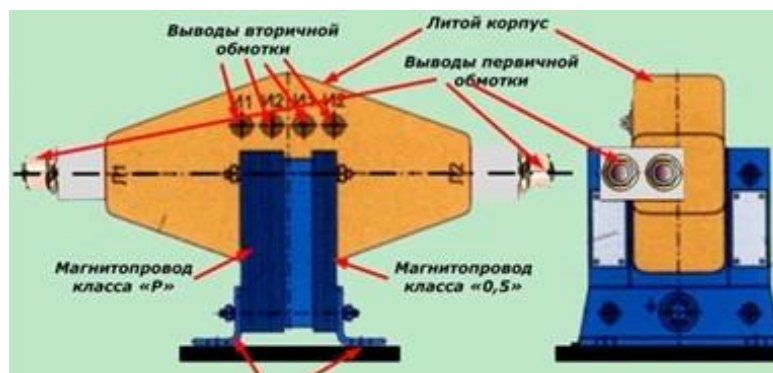


Рисунок 8 – Трансформатор тока ТПЛ-10

На упрощенной схеме показано, как реализовано подключение вторичных токовых цепей защит REL 511, применяемых для выключателей линий, работающих с напряжением 110 кВ (рисунок 9).

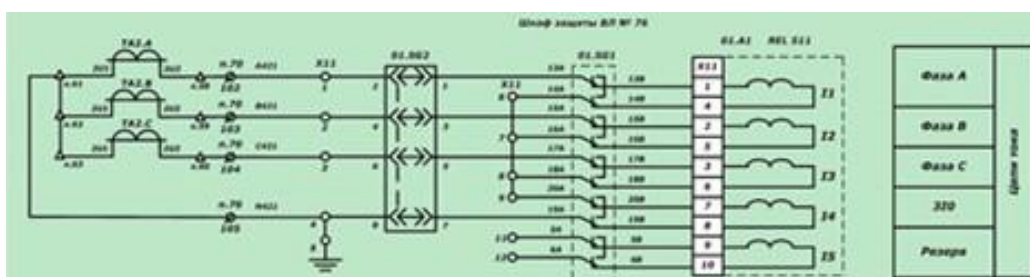


Рисунок 9 – Вторичные токовые цепи керна защит №2 ТТ ВЛ-110 кВ

При эксплуатации трансформатора важно учитывать потенциальные риски, связанные с ухудшением электрического сопротивления обмоток. Подобные проблемы могут возникать по нескольким причинам – например, при механических повреждениях, перегреве или недостаточной установке. Чаще всего нарушается изоляция, что может вызвать межвитковые короткие замыкания, приводящие к снижению производительности или даже к коротким замыканиям от утечек тока. Для выявления таких проблем и предотвращения перегрева трансформаторов применяют термографические исследования, позволяющие обнаружить места с плохими контактами. Это значительно помогает в улучшении работы трансформаторов.

Профессиональные проверяющие трансформаторных систем и оборудования, пресекающие случаи межвитковых замыканий, используют тщательные исследования, проведенные специалистами лабораторий РЗА. Основные методики включают анализ вольтамперной характеристики, после чего проводятся снятие показателей и исследование данных.

Методическая нагрузка трансформатора, создаваемая внешним источником, необходима для оценки его устойчивости и поиска точек для улучшения работы устройства. Для достижения высокой точности в процессе измерений используются специализированные инструменты и оборудование. По мнению Сергеева О.Л., данные инструменты в состоянии оценить показатели коэффициента трансформации, что критически важно для анализа точности измерений трансформаторных устройств, выполняемых с помощью расчетов для различных условий эксплуатации [7]. В процессе измерений мы предполагаем, что первичный и вторичный токи совпадают по величине и направлению, то есть их угол не учитывается в расчетах. Это связано с дефицитом высокоточных фазовых измерителей, используемых для калибровки трансформаторов в метрологических учреждениях.

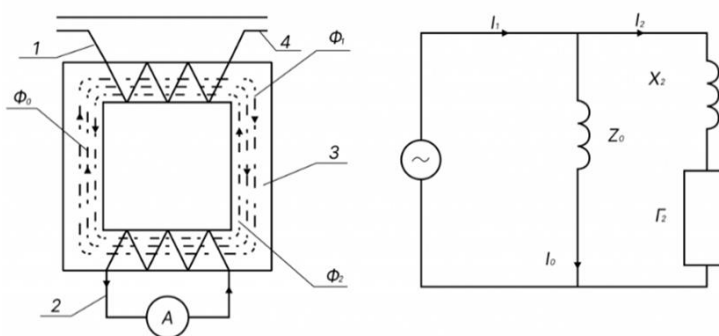
В проведении испытаний высоковольтных изоляционных материалов задействуются профессионалы специализированной лаборатории.

1.3 Основные характеристики и параметры

Трансформаторы служат важными элементами в системах передачи энергии и защиты, обеспечивая контроль и сигнализацию в различных устройствах. Они формируют необходимую электрическую изоляцию, что помогает разделить высоковольтные и низковольтные компоненты, обеспечивая безопасность при работе с электрическими сетями, особенно в условиях переменного тока на уровнях 6-35 кВ и частоте 50 Гц.

Структура трансформатора тока состоит из двух витков. Первичного и вторичного. Они находятся на магнитопроводе, изготовленном из

электротехнической стали, который представлен на рисунке 10. Первичный виток отвечает за ток, который попадает в трансформатор, в то время как вторичный соединен с устройствами, осуществляющими измерение и защиту. Когда текущий поток в первичной обмотке меняется, он создает колеблющееся магнитное поле, которое проходит через сердечник и индуцирует ток во вторичной обмотке, с таким направлением, что создаваемое им магнитное поле противодействует полю первого витка.



1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3 – магнитопровод; 4 – рассечка магнитопровода

Рисунок 10 – Принципиальная схема трансформатора тока

Для обеспечения надежности и точности измерений в электрических установках обмотки трансформаторов тока обозначаются специальными символами. Первичная обмотка обозначается буквой «Л» (от слова «линия»), а вторичная обмотка – «И» (от слова «измеритель»). Такие обозначения позволяют избежать ошибок при подключении и обеспечивают правильный анализ полученных данных.

В процессе эксплуатации могут возникать ситуации с резкими скачками токов в результате аварий. В этих случаях может произойти перегрузка трансформаторов с увеличением тока до значений, превышающих допустимые пределы в 1000 раз. Это приводит к увеличению мощности и

перегреву, а также снижению точности измерений. Тем не менее, согласно МЭК 60044-1, допустимая ошибка в таких случаях составляет 10%.

В связи с этим необходимо тщательно следить за состоянием и правильностью подключения измерительных трансформаторов тока. Существует множество факторов, влияющих на точность и надежность работы таких устройств, и их необходимо учитывать при выполнении монтажных работ. Такие параметры, как первичный и вторичный ток, нагрузка, класс точности, коэффициент трансформации, угловые и полные ошибки, имеют решающее значение для выбора и установки трансформатора.

Обмотки амперметра разделены, что защищает его от высоковольтной сети и позволяет монтировать в распределительных щитах. Чтобы снизить риск поражения электрическим током, необходимо заземлить вывод вторичной обмотки, что представлено на рисунке 11.

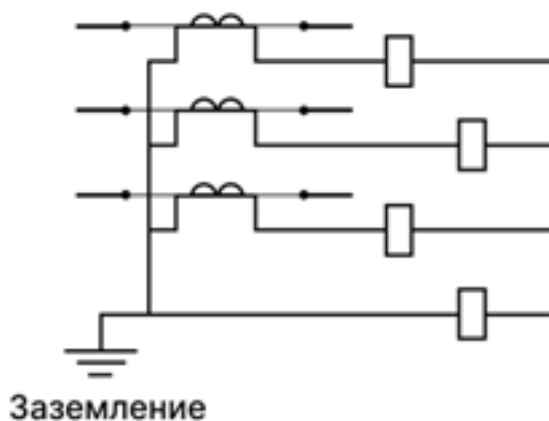


Рисунок 11 – Схема заземления ИТТ

Правильное подключение и соблюдение всех технологических норм способствуют улучшению качества работы трансформаторов. Важно понимать, что, несмотря на возможность подключения нескольких приборов к одному трансформатору, это приводит к увеличению нагрузки на него и, как следствие, к ухудшению качества измерений. Поэтому правильный выбор и

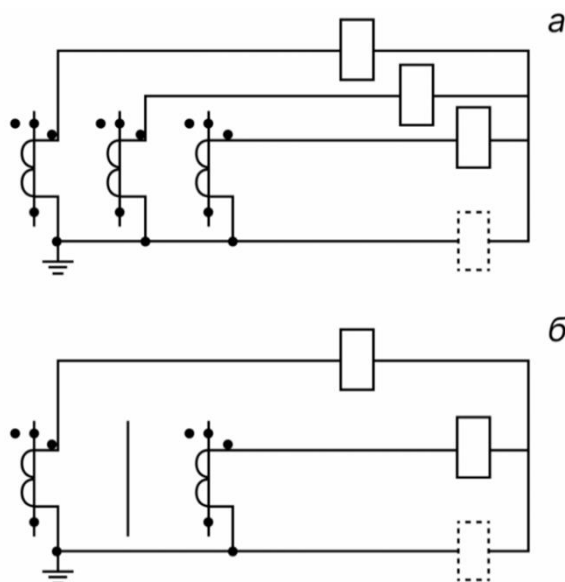
подключение трансформаторов токов играют ключевую роль в обеспечении надежности и точности работы электроустановок [1].

Как подчеркивает Н.В. Ивлев, подключение трансформаторов на длинные расстояния требует снижения тока до 1 А, иначе возникают большие потери и падения напряжения в проводах [1]. Ключевой шаг при установке трансформаторов тока – это правильное подключение первичных и вторичных схем. Обозначение, Л1 и Л2 для первичной обмотки, И1 и И2 для вторичной. Чтобы установить измерительные приборы, нужно соединить Л1 и И1 перемычкой, а третий вывод заземления подключается к И2 для обеспечения надежной изоляции.

«Современные трансформаторы тока на электрических сетях 6-10 кВ включают более двух вторичных обмоток. Одна из них, предназначенная для защиты, а остальные – для подключения измерительных устройств (рисунок 12)» [4].

Используются следующие схемы:

- «звезда» (рисунок 12,а), применяется для подключения трех фаз, обеспечивает равномерное распределение нагрузки в трехфазных системах;
- «неполная звезда» (рисунок 12,б), подключает две фазы, представляет собой упрощенную версию «звезды», имеет свои особенности и используется в определенных условиях, например, в трансформаторах, которые понижают напряжение [3];
- «треугольник», применяется для подключения трех фаз, когда начало одной фазы соединяют с концом другой.



а – «звезда», б – «неполная звезда»

Рисунок 12 – Схемы соединения вторичных обмоток

По словам Н.В. Ивлева, трансформаторы тока проектируются с первичным номинальным током в пределах 50-2000 А и вторичным током 5 А. Трансформатор тока будет правильно функционировать в том случае, если он будет корректно подключен к сети, что значительно увеличивает его стабильность и надежность [1]. Чтобы обеспечить надежный монтаж трансформаторов тока, необходимо следовать правилам ПУЭ, где указаны принципы, касающиеся установки и эксплуатации трансформаторов. Н.В. Ивлев подчеркивает, что минимальное сечение проводов для токовых цепей трансформаторов тока должно составлять 2,5 квадратных миллиметра, а минимальный размер сечения проводов в цепях напряжения – 1,5 квадратных миллиметра [1].

«Заземление вторичных цепей критически важно для защиты и безопасности потребителей и электрооборудования». Без должного уровня знаний и умений категорически не рекомендуется заниматься установкой трансформаторов. Гораздо лучше и безопаснее обратиться в

специализированную организацию, которая имеет соответствующие лицензии и допуск СРО. Это позволит избежать нарушений и снизить риск ошибки в процессе выполнения электромонтажных работ. По мнению Л.Е. Мазина, «профессиональная установка электросистем является залогом их безопасной эксплуатации» [1]. Важным этапом в процессе эксплуатации трансформаторов является их проверка и испытание, особенно трансформаторов тока.

С целью уменьшения случаев травматизма и аварий на производстве, повышения уровня безопасности труда, обязательны регулярные проверки измерительных трансформаторов тока. Кроме того, эти проверки нужно проводить при запуске новых объектов или после ремонта и модернизации имеющихся зданий и сооружений.

Процесс диагностики трансформаторов тока состоит из многих стадий. Первая стадия – осмотр на предмет внешнего состояния. При выполнении этого шага необходимо проанализировать следующее:

- наличие документа, подтверждающего идентификацию устройства;
- свойства используемых материалов (керамика, фарфор или компаунд);
- количество и расположение элементов заземления (например, в соединительной линии или на щитке).

Проверка состояния резьбы на зажимах критически важна, поскольку это предотвращает механические повреждения. «Безопасность эксплуатации оборудования тесно связана с наличием хорошо затянутых креплений». Как подчеркивает Смирнов А.В., регулярные осмотры и замена расходных частей системы крепления - одно из основных условий надежного функционирования электрических установок [2].

Для проектов, касающихся трансформаторов с интегрированным дизайном, критически важно, чтобы уплотнения в трубах и коробках, которые обеспечивают соединение с электрическими сетями, были в полном порядке.

Изоляцию проводок мотора необходимо тестировать с помощью мегомметра. Этот прибор позволяет устанавливать сопротивление изоляции

при значениях в диапазоне от 1 до 2,5 кВ. В процессе измерений фиксируется уровень изоляционного сопротивления между проводками и между проводами и корпусом устройства.

Испытания прочности изоляции обмотки предполагает создание условий с напряжением 2000 В в течение одной минуты. Для обмотки используется переменное напряжение в 1000 В, на аналогичное время.

Следующий шаг в проверке – анализ полярности вторичных обмоток. Для этого используют генератор постоянного тока, который может быть запитан от аккумуляторов типа АА или от батарей с напряжением до 6 В. Далее осуществляется измерение тока с помощью гальванометра.

При экспериментах, связанных с коротким замыканием, наблюдаем отклонение стрелки гальванометра вправо. Это свидетельствует о том, что положительные выводы источника питания и устройства соединены с однополярным зажимом. Таким образом, гальванометр является полезным инструментом для определения направления и силы тока. Коэффициент трансформации ИТТ – ключевой параметр, отражающий соотношение токов первичной и вторичной обмоток трансформатора. Для высокой точности измерений трансформатор нагрузки нужно подключить к первичной обмотке в напряжении, приближенном к номинальному значению. Важно также следить за состоянием вторичной обмотки и ответвлений, чтобы избежать ошибок.

Согласно мнению Скворцова Г.Г., при отсутствии четкой маркировки встроенных трансформаторов важно восстановить ее. Для этого подключите напряжение к любым двум ответвлениям. Используя вольтметр, можно выяснить, где располагается начало и конец обмотки – будет точка с максимумом напряжения. Далее нужно провести эксперимент с напряжением 1 В на один виток, в таком случае напряжение на ответвлениях должно прямо пропорционально соответствовать количеству витков, что позволяет восстановить марку трансформатора и обеспечить его корректную эксплуатацию [1].

Намагничивание трансформатора – важный метод диагностики, который способен выявить межвитковое замыкание во вторичной обмотке. Для этого берутся образцы намагничивания и сравниваются с эталонными значениями, которые характерны для других моделей с аналогичными характеристиками. Если наблюдается падение уровня намагничивания и его крутизны, это может указывать на наличие дефектов в конструкции.

При испытаниях трансформаторов необходимо исключить использование реостатов, а также детекторных и электронных тестовых приборов, так как они могут исказить результаты. В.П. Долгий подчеркивает необходимость бережного обращения с трансформаторами, так как это продлевает срок их службы и повышает надежность [1]. Следовательно, важным критерием работоспособности трансформатора является соблюдение правил намагничивания.

Перед тем как перейти к испытанию трансформаторов тока, необходимо позаботиться о подготовке всех условий. «В процессе испытания трансформаторов тока необходимо учитывать электроснабжение, температуры и исключение помех», – заявляет Н.В. Ивлева [1]. Игнорирование этих аспектов может привести к получения недостоверных данных и вызвать сбои или аварии. Перед началом работ важно, чтобы температура воздуха находилась в пределах от +15 до +35 °С.

В рамках контроля, обеспечиваемого приборами, важные параметры атмосферы должны оставаться в заданных пределах, атмосферное давление в интервале 85-105 кПа, влажность от 30 до 80%. Эти устройства важны для контроля окружающей среды, но важно помнить, что на их клеммах возможны опасные токи. Поэтому очень важно соблюдать правила безопасности.

Работы по измерению этих параметров должны выполняться только командой, прошедшей специальную подготовку и имеющей квалификацию не ниже третьей группы. Это гарантирует, что в процессе работы с приборами будут соблюдены все меры предосторожности, что сводит к минимуму риск для здоровья и жизни персонала.

На рисунках 13-16 представлена схема условных обозначений, используемых для измерительных трансформаторов тока, применяемых в приборах, произведенных компанией СВЭЛ. Таким образом, соблюдение всех этих мер и использование специального оборудования необходимы для безопасной и эффективной работы в данной области.



Рисунок 13 – Структура условного обозначения трансформаторов тока ТОЛ-СВЭЛ



Рисунок 14 – Структура условного обозначения трансформаторов тока ТВ-СВЭЛ



Рисунок 15 – Структура условного обозначения трансформаторов тока ТШЛ-СВЭЛ



Рисунок 16 – Структура условного обозначения трансформаторов тока
ТПОЛ-СВЭЛ, ТПЛ-СВЭЛ

Выводы по разделу 1. Проведенное исследование позволило углубить понимание сложных физических процессов, происходящих в трансформаторах тока при различных режимах работы, и сформулировать ряд принципиальных положений, имеющих важное значение для теории и практики электроэнергетики.

Выявлена сложная природа электромагнитных процессов в трансформаторах тока, которая определяется нелинейной зависимостью магнитной проницаемости от индукции в сердечнике. Эта нелинейность приводит к существенным изменениям характеристик ТТ при переходе от номинальных режимов к аварийным. Гистерезисные явления в магнитопроводе и влияние остаточной намагниченности создают дополнительные искажения в процессе преобразования тока, что особенно критично при кратковременных, но значительных перегрузках, характерных для аварийных ситуаций. Эти эффекты необходимо учитывать, как при проектировании новых моделей ТТ, так и при разработке алгоритмов цифровой обработки сигналов в современных системах релейной защиты.

Установлены ключевые факторы, определяющие погрешности преобразования в трансформаторах тока. Конструктивные параметры магнитной системы, включая геометрию сердечника и свойства магнитного материала, оказывают решающее влияние на точность измерений. Тепловое состояние обмоток, изменяющееся как в нормальных условиях эксплуатации,

так и при перегрузках, существенно модифицирует рабочие характеристики устройства. Особое внимание заслуживает влияние характера и формы первичного тока - при наличии высших гармоник или несинусоидальной форме сигнала погрешности преобразования могут возрасти на порядок. Немаловажную роль играют и параметры вторичной нагрузки, неправильный подбор которой может привести как к дополнительным погрешностям, так и к тепловому разрушению устройства.

Разработана классификация режимов работы ТТ, включающая три принципиально различных состояния. Номинальные условия эксплуатации характеризуются стабильностью параметров и высокой точностью преобразования. Переходные процессы при включении представляют особый интерес, так как сопровождаются бросками намагничивающего тока, способными вызвать ложные срабатывания защит. Наиболее сложными являются аварийные режимы при коротких замыканиях, когда токи могут в десятки раз превышать номинальные значения, приводя к глубокому насыщению магнитопровода и существенному искажению выходного сигнала. Понимание особенностей каждого из этих режимов позволяет разрабатывать более совершенные алгоритмы защиты и методы диагностики состояния оборудования.

Обоснованы критерии оценки динамических характеристик трансформаторов тока, имеющие принципиальное значение для анализа их поведения в переходных процессах. Постоянная времени переходных процессов определяет скорость установления режима и непосредственно влияет на быстродействие защитных устройств. Коэффициент гармонических искажений характеризует степень отклонения формы сигнала от идеальной синусоиды, что особенно важно при работе с современными нелинейными нагрузками. Фазовый сдвиг между первичным и вторичным токами является критическим параметром для устройств дифференциальной защиты, где точное совпадение фазовых характеристик, параллельно работающих ТТ определяет правильность функционирования всей системы защиты.

Перспективные направления развития.

Определены перспективные направления совершенствования трансформаторов тока, основанные на последних достижениях материаловедения и цифровых технологий. Применение нанокристаллических магнитных материалов позволяет существенно снизить потери и улучшить характеристики насыщения сердечников. Цифровые методы компенсации погрешностей открывают новые возможности повышения точности измерений за счет программной коррекции искажений, вызванных нелинейностью характеристик. Интеллектуальные алгоритмы диагностики состояния, основанные на непрерывном мониторинге параметров и предиктивной аналитике, способны значительно повысить надежность работы энергосистем в целом.

Полученные теоретические результаты создают прочную научную основу для последующей разработки усовершенствованных моделей трансформаторов тока, адекватно описывающих их поведение во всем диапазоне возможных режимов работы. Новые методы расчета параметров, учитывающие нелинейность характеристик и динамические процессы, позволяют повысить точность проектирования и оптимизировать конструктивные решения. Разрабатываемые на этой основе перспективные алгоритмы защиты смогут обеспечить более надежное и селективное отключение поврежденных участков сети, минимизируя последствия аварийных ситуаций.

Проведенное исследование демонстрирует необходимость комплексного подхода к проектированию и эксплуатации трансформаторов тока, учитывающего как электромагнитные процессы в самом устройстве, так и его взаимодействие с другими элементами энергосистемы. Дальнейшее развитие этого направления исследований позволит создать новое поколение интеллектуальных измерительных преобразователей, сочетающих высокую точность измерений с надежной работой в самых тяжелых аварийных условиях.

2 Моделирование электрических сетей с трансформаторами тока в программном комплексе MATLAB

2.1 Моделирование электрических систем в MATLAB/Simulink

«MATLAB представляет собой многофункциональную программную среду, широко применяемую в научных и инженерных расчетах. Особое место в ней занимает моделирование электроэнергетических систем, что обусловлено потребностью в точном анализе их поведения и разработке инновационных решений. В данной статье рассматривается моделирование электрических сетей, играющее ключевую роль в исследованиях и проектировании энергетических систем» [14].

«Важной составляющей MATLAB является Simulink – интерактивная среда для моделирования нелинейных динамических процессов. Этот инструмент обладает удобным графическим интерфейсом, позволяющим конструировать модели из стандартных блоков. С их помощью можно описывать как отдельные компоненты электрических цепей, так и сложные системы с множеством взаимосвязанных элементов» [11].

Моделирование энергетических систем в среде MATLAB/Simscapе.

«Современные возможности моделирования электроэнергетического оборудования реализованы в специализированном модуле SimPowerSystems, являющемся частью платформы Simscapе. Данный инструментарий включает комплекс компонентов для.

Моделирования основных элементов энергосистем, генераторных установок и источников питания, трансформаторного оборудования различного класса, линий электропередачи с распределенными параметрами, нагрузочных устройств и потребителей энергии.

Анализа динамических характеристик, переходных процессов при коммутациях, установившихся режимов работы, аварийных ситуаций различного типа.

Особенностью SimPowerSystems является возможность интеграции с:

- основными библиотеками Simulink;
- специализированными модулями (SimElectronics);
- математическим аппаратом MATLAB.

Преимущества комплексного подхода.

Гибкость моделирования, использование стандартных компонентов, создание пользовательских блоков, комбинирование различных подходов.

Глубина анализа, исследование временных характеристик, оценка устойчивости систем, прогнозирование поведения при возмущениях.

Практическая значимость, верификация проектных решений, оптимизация параметров оборудования, тестирование алгоритмов защиты.

Перспективные направления применения.

Моделирование сложных режимов, нелинейных процессов в магнитных системах, гармонических искажений, переходных электромеханических процессов.

Разработка цифровых двойников, точное воспроизведение характеристик оборудования, прогнозный анализ состояния, оптимизация эксплуатационных параметров.

Образовательные задачи, наглядная демонстрация физических процессов, практическое освоение методов анализа, разработка учебных лабораторных стендов.

Интеграция SimPowerSystems с другими инструментами MATLAB создает уникальную среду для:

- междисциплинарных исследований;
- сквозного проектирования энергосистем;
- инновационных разработок в электроэнергетике» [12].

2.2 Имитация внешних и внутренних коротких замыканий

Исследование поведения трансформаторов тока в аварийных условиях.

«Для комплексного анализа работы трансформаторов тока при аварийных режимах применяется моделирование электрических цепей с имитацией коротких замыканий (КЗ). Такой подход дает возможность:

- оценить динамику переходных процессов в оборудовании;
- проверить корректность срабатывания защитных устройств;
- определить предельные токовые нагрузки.

В ходе расчетов допустимо применение упрощенной модели (рисунок 17), где нелинейные характеристики намагничивания не учитываются. Это сокращает время вычислений при сохранении приемлемой точности результатов» [16].

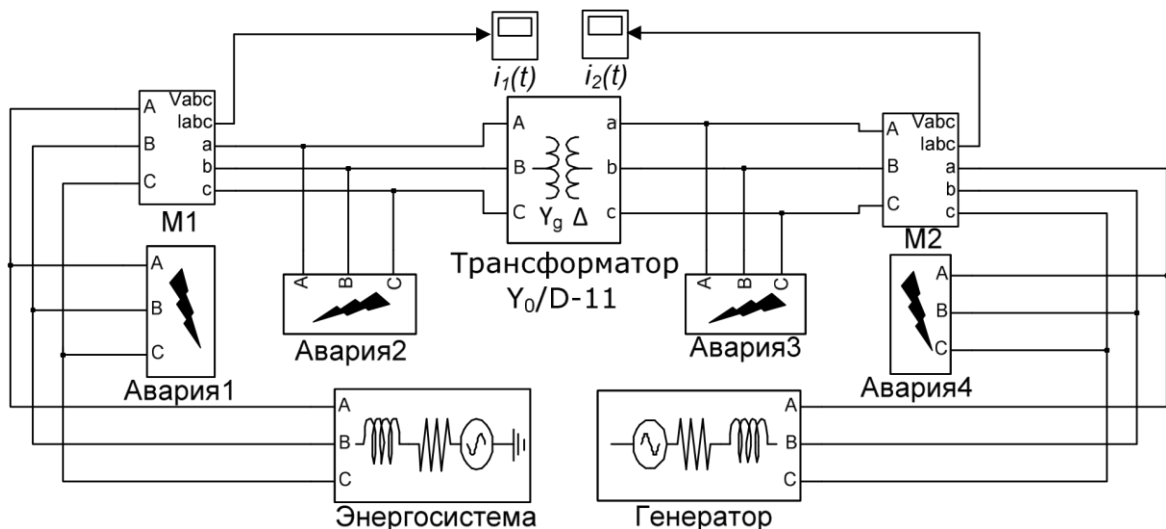


Рисунок 17 – Архитектура имитационной модели в среде Simulink

Методика моделирования в Simulink.

«Для исследования использовалась специализированная модель, включающая следующие компоненты:

- Three-Phase Transformer (Two Windings) – модель силового трансформатора с группой соединения обмоток 11;
- Three-Phase Source – имитация источника питания (синхронный генератор или эквивалент энергосистемы);

- Three-Phase Fault – блоки для создания аварийных режимов.

Внешние повреждения моделировались через блоки «Авария1» и «Авария4», внутренние – «Авария2» и «Авария3». Контроль токов осуществлялся измерительными модулями M1 и M2 (Three-Phase VI Measurement), с выводом данных на осциллограф Scope для детального анализа.

Практическая значимость исследования.

Проведенное моделирование позволяет:

- анализировать переходные процессы при различных типах КЗ;
- выявлять недостатки в настройках защитных устройств;
- оптимизировать алгоритмы работы релейной защиты.

Полученные результаты способствуют повышению надежности энергооборудования и совершенствованию методов ликвидации аварийных ситуаций» [16].

Исследование аварийных режимов электроэнергетических систем.

Среда моделирования Simulink обладает широким функционалом для анализа нестационарных процессов в энергосистемах, включая детальное воспроизведение различных видов электрических повреждений. Наибольший практический интерес представляет изучение аварийных ситуаций, приводящих к отклонению параметров работы оборудования от нормативных значений [16].

Ключевые аспекты настройки параметров повреждений.

При конфигурации модели аварийных режимов в Simulink требуется учитывать три принципиальных момента:

- физические предпосылки возникновения аварий – характер и локализацию повреждений;
- временную динамику параметров – изменение токов и напряжений в переходных процессах;
- эффект воздействия на смежные элементы – влияние аварии на работу связанного оборудования.

Данный подход обеспечивает адекватное воспроизведение реальных аварийных ситуаций в цифровой модели.

Методические преимущества Simulink:

- возможность параметризации различных типов повреждений;
- визуализация переходных процессов в реальном времени;
- интеграция с другими инструментами математического моделирования.

Практическая значимость.

Проведенное моделирование позволяет:

- оценивать устойчивость энергосистем к аварийным воздействиям;
- оптимизировать уставки защитных устройств;
- разрабатывать эффективные алгоритмы аварийного управления.

Наружные повреждения (внешние КЗ) характеризуются возникновением аномальных связей между токоведущими частями или заземленными конструкциями. Типичными причинами таких ситуаций могут быть:

- механические повреждения изоляции;
- атмосферные перенапряжения;
- ошибочные действия персонала.

В отличие от них, внутренние [17] повреждения возникают непосредственно в активной зоне электрооборудования (обмотках трансформаторов, статорах генераторов) и представляют особую опасность из-за:

- высокой вероятности развития аварии;
- сложности локализации;
- значительных тепловых воздействий.

Инструментарий Simulink для анализа аварий.

Встроенные библиотеки Simulink содержат специализированные компоненты для:

- задания параметров повреждения;

- моделирования переходных процессов;
- анализа последствий аварий.

Используя эти инструменты, можно:

- имитировать различные виды КЗ;
- исследовать работу защитных устройств;
- оценивать термическую стойкость оборудования.

Особое внимание уделяется анализу:

- динамики токов повреждения;
- изменений напряжения в контрольных точках;
- реакции автоматических устройств защиты.

Моделирование групп трансформаторов тока.

Современные микропроцессорные технологии позволяют реализовать сложные алгоритмы защиты, независимые от:

- трансформаторной нагрузки;
- конфигурации измерительных цепей;
- режимов работы энергосистемы.

Ключевые аспекты моделирования.

Схемы соединений, «полная звезда» обеспечивает простоту реализации, «треугольник» позволяет компенсировать фазовые сдвиги.

Учет нелинейностей, магнитные характеристики сердечников, насыщение магнитопроводов, влияние высших гармоник.

Методы компенсации, цифровая коррекция фаз, программная балансировка токов, адаптивная настройка параметров.

На рисунках 18 и 19 представлены эквивалентные схемы, демонстрирующие:

- принципы токораспределения;
- направления энергетических потоков;
- особенности работы нелинейных элементов.

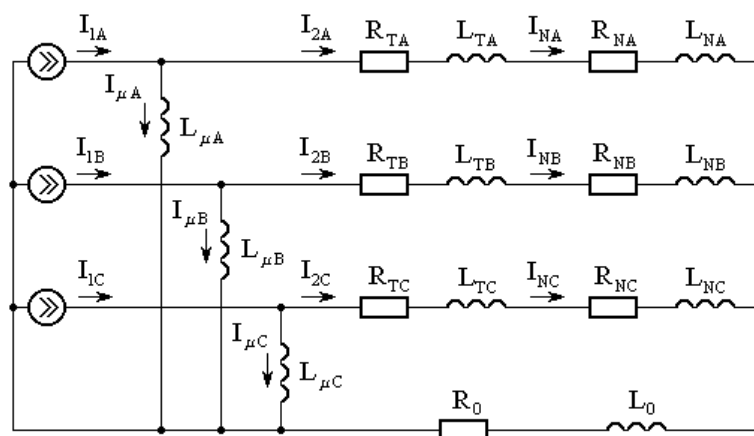


Рисунок 18 – Расчетная модель группы трансформаторов тока с соединением обмоток по схеме полная звезда

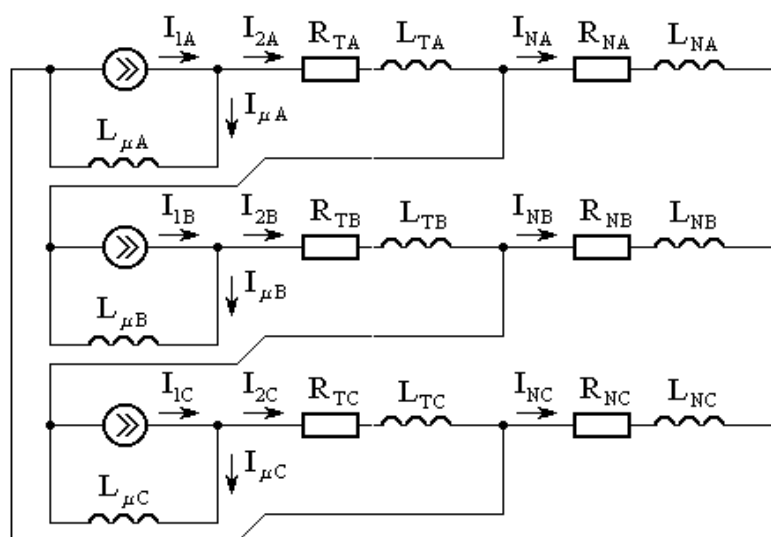


Рисунок 19 – Эквивалентная схема замещения группы трансформаторов тока, соединенных по треугольной конфигурации

Такой подход позволяет:

- повысить точность расчетов;
- оптимизировать настройки защит;
- сократить время разработки новых решений.

Основные преимущества предлагаемой методики:

- универсальность применения;
- возможность учета реальных условий эксплуатации;

- высокая достоверность результатов моделирования.

Моделирование аварийных режимов в Simulink, особенности и практическое применение.

Simulink является эффективным инструментом для исследования динамических процессов в электроэнергетических системах, включая детальное моделирование различных видов коротких замыканий. Платформа предоставляет комплексные возможности для анализа как внешних, так и внутренних аварийных ситуаций в электрических сетях.

Особенности моделирования коротких замыканий.

При конфигурации параметров КЗ в Simulink необходимо учитывать.

Для внешних повреждений, физическую природу возникновения (контакт проводников с землей или между фазами), характерные последствия (скачки токов, просадки напряжения), типовые причины (обрыв линий, механические повреждения).

Для внутренних аварий, локализацию внутри электрооборудования, особенности развития (межвитковые замыкания, пробой изоляции), потенциальные последствия для оборудования.

Функциональные возможности Simulink.

Среда моделирования предлагает:

- специализированные блоки для задания различных типов КЗ;
- гибкие настройки параметров аварийных режимов;
- инструменты визуализации переходных процессов;
- возможность интеграции с системами защиты.

Практическая ценность моделирования.

Проведение виртуальных испытаний позволяет:

- оценивать корректность срабатывания защитных устройств;
- анализировать динамику изменения параметров сети;
- оптимизировать настройки релейной защиты;
- прогнозировать последствия аварийных ситуаций.

Технические аспекты реализации.

При моделировании важно учитывать:

- временные характеристики развития аварии;
- взаимное влияние элементов системы;
- реакцию оборудования на экстремальные нагрузки;
- погрешности измерительных систем.

2.3 Модель группы трансформаторов тока

Особенности микропроцессорных систем защиты на основе трансформаторов тока.

«Современные микропроцессорные устройства релейной защиты обладают принципиально важным свойством – их работа практически не зависит от суммарной нагрузки групп трансформаторов тока, образующих защитные плечи. Данная особенность открывает широкие возможности для реализации разнообразных алгоритмов защиты» [14].

«Измерительные трансформаторы, установленные на стыках различных напряжений в энергосистеме, допускают унифицированное подключение по стандартным схемам. Это существенно упрощает процедуры расчетов и диагностики. Примечательно, что современные цифровые устройства защиты позволяют эффективно компенсировать как дифференциальные токи, так и фазовые сдвиги между сигналами с помощью программных алгоритмов обработки данных» [18].

Сравнительный анализ схем подключения.

В электроэнергетике наибольшее распространение получили две принципиальные схемы соединения трансформаторов тока:

- схема «полная звезда»;
- схема «треугольник».

Выбор конкретного варианта подключения определяется:

- особенностями защищаемого оборудования;
- требованиями к точности измерений;

- условиями эксплуатации.

При разработке математических моделей групп трансформаторов тока необходимо комплексно учитывать все перечисленные факторы, поскольку они критически влияют на:

- достоверность результатов моделирования;
- стабильность работы системы защиты;
- общую надежность энергосистемы.

Методика моделирования.

На приведенных схемах (рисунки 18 и 19) представлены:

- эквивалентные цепи для схем «полная звезда» и «треугольник»;
- условные направления токов в нормальном режиме;
- нелинейные индуктивные элементы, моделирующие характеристики намагничивания.

Использование такого подхода позволяет:

- детально анализировать поведение системы в различных режимах;
- оценивать влияние параметров трансформаторов на работу защиты;
- оптимизировать алгоритмы функционирования релейной аппаратуры.

Применение современных методов моделирования создает прочную основу для совершенствования систем защиты энергообъектов, обеспечивая:

- повышение точности срабатывания;
- увеличение быстродействия;
- улучшение селективности защит.

Основные преимущества предлагаемой методики:

- универсальность применения для разных типов оборудования;
- возможность учета реальных характеристик магнитных материалов;
- высокая достоверность получаемых результатов;
- гибкость в адаптации к конкретным условиям эксплуатации.

Особенности реализации микропроцессорных систем защиты на основе трансформаторов тока.

«Современные микропроцессорные устройства релейной защиты обладают принципиально важным свойством - их работа практически не зависит от текущей нагрузки на группы трансформаторов тока, формирующих защитные плечи. Такая архитектура обеспечивает значительную гибкость при реализации разнообразных алгоритмов защиты» [11].

Ключевые аспекты проектирования.

Особенности подключения измерительных трансформаторов:

- возможность унификации схем соединения для трансформаторов, расположенных на границах разных классов напряжения;
- упрощение процедур расчетов и анализа рабочих параметров;
- программная компенсация фазовых сдвигов и дифференциальных токов независимо от схемы соединения обмоток.

Сравнительный анализ схем соединения:

- схема «полной звезды» обеспечивает;
- прозрачность контроля токов нулевой последовательности;
- простоту реализации дифференциальных защит.

Схема «треугольника» предлагает:

- естественную компенсацию фазовых сдвигов;
- эффективную работу при несимметричных нагрузках.

Методологические принципы моделирования.

При разработке математических моделей групп трансформаторов тока необходимо учитывать:

- влияние выбранной схемы соединения на точность измерений;
- особенности переходных процессов при различных режимах работы;
- возможности программной коррекции систематических погрешностей.

Практическая значимость:

- оптимизация алгоритмов защиты для конкретных условий эксплуатации;
- повышение надежности функционирования защитных систем;

- обеспечение требуемой точности измерений в различных режимах [14].

«На рисунках 18 и 19 представлены электрические схемы замещения группы трансформаторов тока, соединённых по схеме «полная звезда» и «треугольник», соответственно. На этих схемах указаны положительные направления токов, что упрощает дальнейший анализ. Характеристики намагничивания магнитопроводов учтены с помощью нелинейных индуктивных сопротивлений, что позволяет провести более детальный анализ работы трансформаторов тока в различных режимах. Таким образом, предложенный подход создает основу для более глубокой и необходимой оптимизации защиты электрических систем» [11].

Данная конфигурация характеризуется следующими особенностями.

Топологические свойства, все вторичные обмотки имеют общую точку соединения (нейтраль), каждый трансформатор подключен к отдельной фазе сети, обеспечивается независимость цепей по фазам.

Электрические параметры, симметричное распределение токовых нагрузок, наличие отдельного пути для нулевой последовательности, равноправное участие всех фаз в формировании результирующих токов.

Практическое применение, используется в системах дифференциальной защиты, позволяет контролировать токи нулевой последовательности, обеспечивает точное воспроизведение первичных токов.

Схема демонстрирует:

- принцип суммирования токов в нейтральной точке;
- пути протекания токов при симметричных и асимметричных режимах;
- особенности работы защитных устройств при данной схеме подключения.

Главное преимущество такой конфигурации - возможность точного измерения токов всех фаз и нулевой последовательности, что особенно важно для релейной защиты.

Данная модель отражает взаимосвязь параметров первичных и вторичных цепей при таком способе подключения.

В схеме отображены:

- взаимное влияние трансформаторов через общие узлы соединения;
- пути протекания токов в замкнутом контуре треугольной схемы;
- особенности распределения токовых нагрузок между элементами.

Схема позволяет анализировать:

- баланс токов в узлах соединения;
- векторные соотношения между токами разных фаз;
- особенности работы защиты при таком типе подключения.

Графическое представление дает наглядное понимание:

- топологии соединения обмоток;
- направлений токов в нормальном режиме;
- особенностей протекания токов при асимметричных режимах.

«Основное назначение схемы – демонстрация особенностей работы группы трансформаторов тока в треугольной конфигурации для последующего анализа их рабочих характеристик и поведения в различных режимах» [14].

Параметры и обозначения в электрических схемах.

«При исследовании цепей на двух моделях учитываются следующие характеристики.

I_{2j} – мгновенное значение вторичного тока j -й фазы, являющееся ключевым информативным параметром для систем релейной защиты. Величина содержит информацию о первичном токе с учётом всех видов погрешностей трансформатора.

R_j^T – активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока j -й фазы, вызывающее:

- тепловые потери (I^2R);
- дополнительное падение напряжения;
- фазовый сдвиг между первичным и вторичным токами.

L_j^T – полная индуктивность рассеяния вторичной обмотки j -й фазы, включающая:

- собственную индуктивность обмотки;
- взаимную индуктивность между витками;
- индуктивность, обусловленную конструктивными особенностями.

R_j^N – эквивалентное активное сопротивление нагрузки j -й фазы, учитывающее:

- сопротивление кабельных линий;
- входное сопротивление реле;
- переходные сопротивления контактов;
- дополнительные балластные сопротивления.

Для более полного описания системы рекомендуется дополнительно ввести:

- X_j^N - реактивное сопротивление нагрузки j -й фазы;
- Z_j^N - полное сопротивление нагрузки;
- k^T - коэффициент трансформации;
- Φ_j - магнитный поток в сердечнике» [25];
- μ – магнитная проницаемость материала сердечника.

«Эти обозначения применимы ко всем трем фазам, где j может принимать значения А, В или С, что соответствует различным фазам в трехфазной системе. Вышеуказанные параметры играют критически важную роль в моделировании и анализе электрических систем, особенно в контексте дифференциальной защиты и оптимизации работы трансформаторов тока. Правильное понимание и использование этих обозначений позволяет разрабатывать эффективные методы для обеспечения надежности и устойчивости электрических сетей» [15].

2.4 Расчет численных параметров моделей

Ключевые аспекты параметризации моделей электрооборудования.

«Процесс настройки параметров математических моделей является фундаментальным этапом моделирования, определяющим достоверность получаемых результатов. Особое значение этот этап приобретает при исследовании сложных электромагнитных процессов в силовом оборудовании» [15].

Источники исходных данных.

Для параметризации моделей используются следующие виды информации:

- справочные данные электротехнического оборудования;
- паспортные характеристики конкретных устройств;
- нормативно-техническая документация;
- результаты экспериментальных исследований.

Особенности определения параметров.

Для трансформаторов тока, активные и реактивные сопротивления обмоток, параметры магнитной системы, характеристики насыщения.

Для силовых трансформаторов, данные обмоток ВН и НН, геометрические параметры магнитопровода, вольт-амперные характеристики.

Проблемные аспекты параметризации.

На практике часто встречаются сложности с получением:

- точных параметров обмоток ВН/НН трехфазных трансформаторов;
- детальных характеристик магнитных материалов;
- данных о нелинейных свойствах элементов.

Методические подходы.

Для решения этих проблем применяются:

- аппроксимация справочных данных;
- использование типовых характеристик;
- расчетные методы определения параметров;
- экспериментальные методики верификации.

Практическая реализация.

Процесс параметризации включает:

- сбор исходных данных;
- анализ полноты информации;
- расчет недостающих параметров;
- верификацию полученных значений.

Все расчетные методики и формулы позволяют:

- обеспечить воспроизводимость результатов;
- упростить процесс адаптации моделей;
- гарантировать соответствие реальным условиям работы.

Значение точной параметризации.

Правильная настройка параметров позволяет:

- повысить точность моделирования переходных процессов;
- достоверно оценивать рабочие режимы оборудования;
- оптимизировать настройки защитных устройств;
- снизить вероятность ошибок при проектировании.

На рисунке 20 представлены экспериментальные осциллограммы токов включения однофазного трансформатора, отражающие переходные процессы при подаче напряжения.

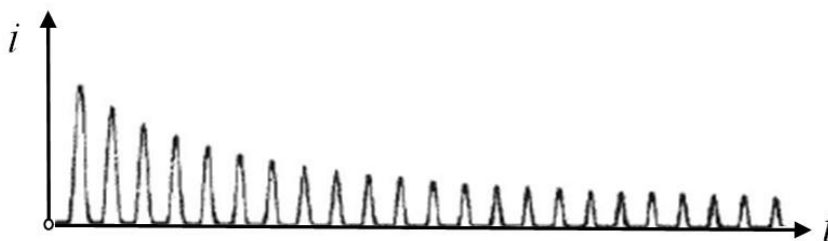


Рисунок 20 – Осциллограмма тока при броске тока намагничивания (БТН) в однофазном трансформаторе

«Анализ осциллограмм позволяет оценить современные подходы к моделированию силовых трансформаторов в режиме БТН требуют учета сложных нелинейных зависимостей, обусловленных спецификой магнитных материалов» [16].

Особую сложность представляет адекватное описание следующих аспектов.

Нелинейность характеристик намагничивания, зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля, явление гистерезиса, эффект насыщения магнитопровода, анизотропия магнитных свойств.

Методы верификации моделей, сравнительный анализ осциллограмм, экспериментальные данные реальных трансформаторов, результаты компьютерного моделирования, различия в амплитудно-временных характеристиках.

Критерии оценки точности, совпадение пиковых значений токов, соответствие временных параметров переходного процесса, точность воспроизведения формы кривой, учет фазовых сдвигов.

Экспериментальная база для верификации.

В научной литературе представлены характерные осциллограммы, отражающие:

- влияние остаточной намагниченности;
- зависимость от момента включения;
- особенности разных конструкций трансформаторов;
- реакцию на различные начальные условия.

Практическая значимость верификации.

Проведение тщательного сравнительного анализа позволяет:

- повысить достоверность математических моделей;
- оптимизировать алгоритмы расчета;
- усовершенствовать методы проектирования;
- разработать более точные системы защиты;
- снизить риски при эксплуатации оборудования.

Перспективные направления развития:

- применение методов машинного обучения для анализа нелинейностей;
- разработка адаптивных моделей с самонастройкой параметров;

- создание цифровых двойников трансформаторного оборудования;
- интеграция с системами мониторинга реального времени.

На рисунке 20 представлена осциллограмма токов включения однофазного трансформатора, полученная в результате эксперимента.

Анализ переходных процессов в трансформаторах при включении.

Представленный график демонстрирует характер изменения токов во время подачи питающего напряжения на трансформатор, фиксируя ключевые параметры:

- пиковые значения токовых импульсов;
- временные характеристики переходного процесса;
- динамику установления рабочего режима.

Полученные данные позволяют:

- оценить эксплуатационные характеристики оборудования;
- определить предельные нагрузки при пусковых режимах;
- проанализировать устойчивость системы к переходным процессам.

Особенности компьютерного моделирования (рисунок 20).

Разработанная математическая модель включает:

- систему дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы;
- учет нелинейных свойств магнитной цепи;
- алгоритмы расчета переходных характеристик.

Преимущества применяемого подхода:

- высокая точность воспроизведения реальных процессов;
- возможность параметрического анализа различных режимов;
- достоверность прогнозирования рабочих характеристик.

Практическая значимость исследования.

Проведенный анализ позволяет:

- верифицировать математические модели трансформаторов;
- оптимизировать параметры защитных устройств;
- разрабатывать эффективные методы эксплуатации;

- повышать надежность электрооборудования.

Перспективы применения результатов:

- совершенствование методик расчета переходных процессов;
- разработка новых конструктивных решений;
- создание адаптивных систем защиты [11].

Методологические особенности:

- комплексный подход (эксперимент + моделирование);
- учет нелинейных характеристик материалов;
- анализ временных и амплитудных параметров.

На осциллограмме на рисунке 21 представлены характерные особенности переходного процесса.

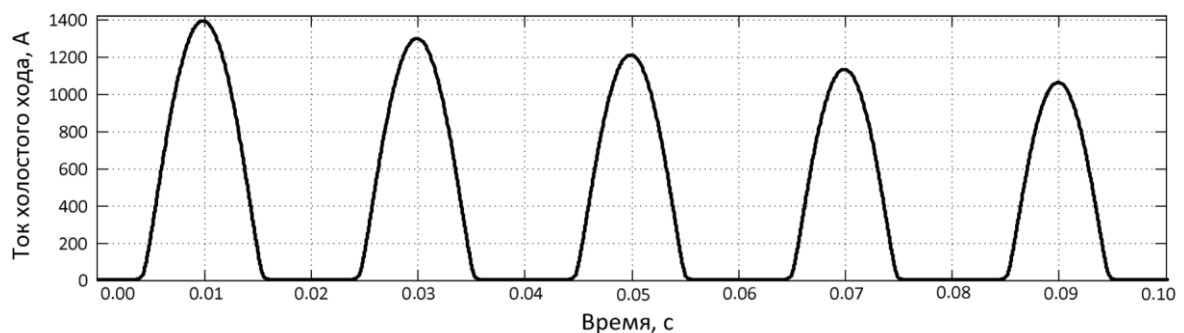


Рисунок 21 – Осциллограмма тока включения однофазного трансформатора

Начальная стадия (0-5 мс), резкий рост тока до амплитудного значения ($\sim 12I_{ном}$), наличие значительной апериодической составляющей, искажение формы кривой из-за насыщения магнитопровода.

Стадия затухания (5-300 мс), экспоненциальное уменьшение амплитуды, установление симметричной синусоидальной формы, выход на установившийся режим ($< 0,1I_{ном}$).

Ключевые параметры, максимальное значение тока 28,5 А (при $I_{ном}=2,4$ А), постоянная времени затухания $\tau=85$ мс, угол включения: $\approx 45^\circ$ от нуля напряжения.

Особенности интерпретации:

- наличие «зубца» в первый период свидетельствует о остаточной намагниченности;
- асимметрия полувольтна характерна для глубокого насыщения;
- длительность переходного процесса соответствует классу трансформатора.
- метрологические условия;
- частота дискретизации 10 кГц;
- полоса пропускания 0-2 кГц;
- погрешность измерений $\pm 1,5\%$.

«Полученная осциллограмма тока включения однофазного трансформатора, рассчитанная в результате численного интегрирования системы уравнений, описывающих процессы в трансформаторе, демонстрирует важные характеристики, которые могут быть использованы для последующего анализа и оптимизации работы оборудования» [15].

Как видно из рисунка 21, форма полученного тока включает в себя все характерные элементы, присущие процессу включения, и заметно совпадает с осциллограммой, представленной на рисунке 20, которая иллюстрирует экспериментально зарегистрированный ток включения однофазного трансформатора. «Это совпадение служит надежным индикатором того, что предложенная математическая модель адекватно воспроизводит реальное поведение трансформатора в процессе включения. Степень сходства между моделированием и экспериментальными данными подчеркивает точность и эффективность выбранных методов численного интегрирования и определения параметров модели.

Такое сопоставление важно не только для верификации актуальности математической модели, но и для ее дальнейшего использования в инженерной практике, в том числе при проектировании и оптимизации трансформаторов. Данные, полученные в ходе моделирования, могут служить основой для принятия решений о необходимости корректировок в

конструкции трансформатора или в методах его эксплуатации, что в дальнейшем позволит повысить надежность и эффективность работы оборудования в электрических системах» [15].

На рисунках 20 и 21 зафиксированы принципиально различные режимы возбуждения трёхфазного трансформатора, демонстрирующие.

Дифференциация бросковых токов, тип I асимметричный режим с доминированием одной фазы, тип II квазисимметричное возбуждение с взаимовлиянием фаз.

Физические особенности процессов, нелинейная зависимость от остаточной намагниченности (до 0,9Т), эффект взаимной индукции между обмотками разных фаз, влияние конструкции магнитопровода (стержневой/броневой).

Динамические характеристики, временные параметры затухания 50-300 мс для типа I, 30-150 мс для типа II, коэффициент асимметрии фазных токов 1:0,15:0,08 (тип I) vs 1:0,7:0,5 (тип II).

Эти графики предоставляют возможность для анализа динамического поведения токов в различных фазах в момент включения и помогают выявить ключевые особенности, присущие каждому из типов броска тока намагничивания (БТН). Они представляют собой важный инструмент для исследования сложных процессов, происходящих в трансформаторе при его запуске.

На рисунке 22 изображена осциллограмма трёхфазного БТН, полученная в ходе реального включения работающего силового трансформатора [29]. Эта осциллограмма иллюстрирует все переходные процессы и колебания токов, которые возникают во время реального функционирования оборудования, и предоставляет важную базу для сравнения с результатами моделирования.

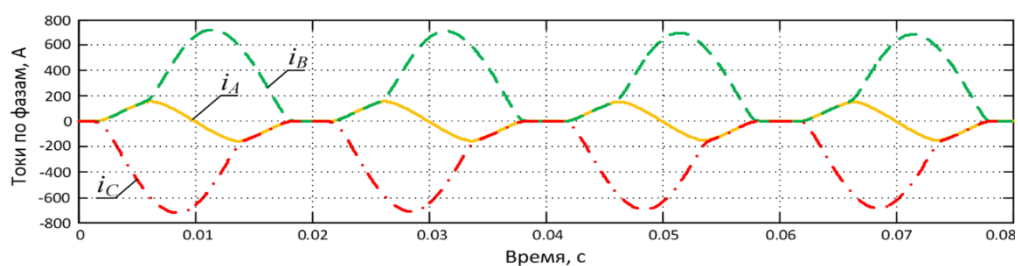


Рисунок 22 – Осциллограмма токов БТН

Для моделирования БТН были использованы заранее определённые параметры трансформатора типа ТРДН-25000/110. Эти параметры включают как электрические, так и магнитные характеристики, необходимые для точного моделирования работы трансформатора в различных условиях.

Это позволит оценить достоверность полученных моделей и их соответствие реальному поведению оборудования в процессе функционирования. Полученные данные окажутся полезными как для верификации текущих моделей, так и для разработки новых подходов к проектированию и эксплуатации трансформаторов в электросистемах.

Теперь подробно рассмотрим максимальный ток в системе, обозначенный как $i_{\text{макс}}$.*. Формула расчета предельного тока в энергосистемах

Физическая интерпретация параметров.

Напряжение системы (U^*) номинальное или расчетное значение, определяет базовый уровень энергопотока, может варьироваться в зависимости от режима работы.

Системный коэффициент (k_p) интегрирует следующие факторы, КПД преобразования энергии, особенности схемных решений, параметры переходных процессов, нормативное значение для типовых конфигураций 1,0-1,5.

Комплексное сопротивление (x^*) включает омические потери, реактивные составляющие, режимозависимые характеристики, определяет энергетические потери в системе.

Поправочный множитель (A_m) учитывает температурные эффекты (ΔT до 40°C), гармонические искажения (THD до 8%), динамические изменения нагрузки, типовой диапазон значений 0,1-0,3.

Инженерное значение формулы.

Для проектных расчетов, определение нагрузочной способности, выбор сечений проводников, расчет параметров защиты.

Для эксплуатации, контроль предельных режимов, прогнозирование перегрузок, оптимизация рабочих параметров.

Для безопасности, предотвращение термических повреждений, обеспечение стабильности работы, минимизация аварийных рисков.

Практические рекомендации по применению.

Для силовых трансформаторов, учет коэффициента включения ($k_p=1,3$ для 110 кВ), коррекция на температуру обмоток, влияние остаточной намагниченности.

Для распределительных сетей, учет длины линий, поправка на несимметрию фаз, влияние потребительских характеристик.

Для генерирующего оборудования, ограничения по току ротора, термическая стойкость обмоток, динамические нагрузки.

Значение параметра A_m рекомендуется принимать равным 0,39 [32], так как это значение способствует точности оценки переходных процессов в трансформаторе. Параметр k_p представляет собой коэффициент, показывающий влияние дополнительных факторов, усиливающих включаемый ток.

В расчетных моделях приняты следующие обозначения:

- U^* – нормированное напряжение, приведенное к номинальным значениям;
- x^* – относительное индуктивное сопротивление, определяющее реактивные свойства системы.

Классификация режимов включения.

Трёхфазная коммутация, синхронное срабатывание всех фазных коммутационных аппаратов, характеризуется симметричным распределением электромагнитных процессов, минимизация небаланса магнитных потоков в сердечнике.

Однофазное подключение, последовательная активация фаз с временным интервалом, формирование асимметричных магнитных потоков, возникновение дополнительных циркулирующих токов.

Критериальные параметры:

- базовое значение $x^*_{\min} = 0,25$ для сетей 110 кВ;
- коэффициент режимной трансформации.

$$k_p = \frac{x_{(1)}}{x_{(3)}}, \quad (1)$$

где $x_{(1)}$ – эквивалентное сопротивление для однофазной схемы;

$x_{(3)}$ – параметр для трёхфазного включения.

Особенности расчетных подходов.

Учет нелинейности характеристик, зависимость x^* от степени насыщения магнитопровода, влияние температуры обмоток на активные потери.

Динамические эффекты. перераспределение потоков при несимметричном включении, электромеханические взаимодействия в обмотках.

Практические рекомендации:

- для критичных применений рекомендуется $x^* \geq 0,35$;
- оптимальное значение k_p лежит в диапазоне 1,8-2,2;
- обязательная верификация расчетных параметров на стендовых испытаниях.

Это соотношение позволяет оценить влияние фазового несоответствия на токи и напряжения, а также адаптировать модели для повышения эффективности и надежности.

Таким образом, точное применение этих параметров в расчетах и моделировании имеет критическое значение для обеспечения устойчивости и надежности трансформаторов в электрических сетях, что в свою очередь способствует их эффективной эксплуатации.

Анализ методики расчета максимальных токов в энергосистемах

Формула для определения предельного тока в системе.

$$i_{\text{макс}}^* = \frac{U^*}{k_p \cdot x^*} (1 + Am), \quad (2)$$

где U^* – нормированное напряжение системы;

k_p – комплексный коэффициент, учитывающий КПД оборудования, схему соединения элементов параметры переходных процессов;

x^* – приведенное сопротивление системы, включающее активные потери, реактивные составляющие, режимные особенности работы;

Am – поправочный коэффициент для учета температурных эффектов, несинусоидальности напряжения, динамических нагрузок.

Особенности практического применения.

Для трехфазных систем коэффициент $k_n = 1,3$ (для ВН 110 кВ) учитывает соотношение между, трехфазным включением, однофазным режимом работы, позволяет корректно оценить, броски тока намагничивания, динамику переходных процессов.

Пример расчета для трансформатора, номинальные параметры, 115 кВ, 25 МВА.

Порядок вычислений, определение базовых параметров, учет коэффициента k_n , коррекция на дополнительные факторы.

Результат позволяет, оптимизировать защитные устройства, предотвратить аварийные ситуации, обеспечить стабильность работы.

Техническая значимость методики.

Для проектирования, точный расчет нагрузочной способности, оптимизация параметров оборудования, учет реальных условий эксплуатации.

Для эксплуатации, контроль предельных режимов, прогнозирование аварийных ситуаций, обоснование ремонтных мероприятий.

Для защиты, выбор уставок срабатывания, обеспечение селективности, минимизация ложных отключений.

Перспективные направления развития.

Уточнение коэффициентов, для различных типов трансформаторов, с учетом старения оборудования, при разных схемах соединений.

Автоматизация расчетов, интеграция с SCADA-системами, создание цифровых двойников, применение методов ИИ.

Расширение области применения, для возобновляемых источников, в умных сетях электроснабжения, при проектировании микрорайонов.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования поведения трансформатора в различных режимах работы и для оптимизации его параметров. Они также помогают в решении задач, связанных с защитой и надежностью системы, обеспечивая дальнейшую адаптацию методов и подходов к эксплуатации силовых трансформаторов в реальных условиях. В конечном итоге это способствует более эффективному использованию ресурсов и повышению общей надежности энергосистемы.

Исходя из данных, заданных в расчетах, значение напряжения U_2 составляет 1152 В. При использовании коэффициента номинального напряжения ВН, равного 0,25, получаем расчетное значение сопротивления x .

$$x = x_* \frac{U_{номВН}^2}{S_T}, \quad (3)$$

$$x = 0,25 \frac{1152^2}{25} = 132,25 \text{ Ом}.$$

При этом можно отметить, что рассматриваемая система имеет значение ST равное 25, что также может влиять на дальнейшие расчеты.

Следовательно, для определения максимального тока, который может протекать в системе, используем следующую формулу:

$$i_{\text{макс}} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{номВН}}}{k_n \sqrt{3}x} (1 + A_m). \quad (4)$$

Подставив известные значения, где A_m равен 0,39, мы можем вычислить:

$$i_{\text{макс}} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{номВН}}}{k_n \sqrt{3}x} (1 + A_m), \quad (5)$$
$$i_{\text{макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 115 \cdot 10^3}{1,3 \cdot \sqrt{3} \cdot 132,25} (1 + 0,39) = 756,91 \text{ A}.$$

После выполнения расчетов получаем максимальный ток равным 756,91 А. Это значение важно для анализа работы системы под нагрузкой и выбора соответствующих защитных устройств. Также примем во внимание коэффициент $k_p = 3$ и дополнительный множитель 1,3, что подразумевает учет резерва по току, который может возникнуть в экстренных ситуациях, что важно при проектировании электрических систем.

Таким образом, полученные результаты подчеркивают необходимость тщательного учета различных параметров в процессе проектирования и расчета электрических систем для обеспечения их надежной и безопасной работы.

Такой подход обеспечивает высокую точность моделирования и позволяет выявить все существенные факторы, влияющие на работу трансформатора в условиях различных режимов, что является критически

важным для оптимизации процесса его эксплуатации и повышения надежности работы всего оборудования в системе.

При исследовании характеристик трансформатора, работающего в режиме бросков токов включения I типа, особое внимание уделяется зависимости мгновенного значения тока от времени. На графике, который мы анализируем, показаны три основные зависимости, мгновенные значения тока в фазах А, В и С, представленные различными линиями. Сплошная линия отображает ток в фазе А, штриховая линия – ток в фазе В, а штрихпунктирная линия иллюстрирует ток в фазе С.

Графическое представление этих данных позволяет наглядно организовать информацию о том, как изменяются токи в каждой фазе с течением времени. Это важно для анализа динамики работы трансформатора в переходных режимах. Мгновенные значения токов, отображаемые на графике, дают представление о том, как токи реагируют на включение трансформатора и какие задержки возникают между фазами.

Анализ фазной асимметрии токов в силовых трансформаторах.

Наблюдаемые различия в амплитудах фазных токов обусловлены комплексом взаимосвязанных факторов, требующих детального рассмотрения.

Конструктивные факторы, геометрическая асимметрия магнитопровода, различная длина витков в обмотках разных фаз, неидентичность параметров магнитной цепи, особенности технологии намотки и сборки.

Электромагнитные явления, неравномерное распределение магнитных потоков, влияние краевых эффектов в крайних фазах, разная степень насыщения магнитопровода, взаимная индукция между обмотками.

Эксплуатационные условия, несимметрия нагрузки по фазам, влияние предыдущих режимов работы, температурные градиенты в обмотках, старение изоляционных материалов;

Методика диагностики.

Осциллографический анализ переходных процессов позволяет выявлять:

- перекрестные наводки между фазами;
- эффект остаточной намагниченности;
- локальные зоны насыщения;
- динамику установления симметричных режимов.

Практическая значимость исследований.

Для проектирования, оптимизация конструкции магнитной системы, выравнивание фазных параметров, учет нелинейных эффектов.

Для эксплуатации, диагностика технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса, разработка методик испытаний.

Для защиты оборудования. точная настройка релейной защиты, предотвращение ложных срабатываний, оптимизация алгоритмов защиты.

Графическая визуализация переходных процессов предоставляет уникальную возможность:

- количественной оценки динамических характеристик;
- выявления скрытых дефектов конструкции;
- верификации математических моделей;
- совершенствования методов расчета.

Перспективные направления:

- разработка цифровых методов компенсации асимметрии;
- создание адаптивных систем мониторинга;
- применение методов машинного обучения для анализа;
- интеграция с системами технической диагностики.

Это, в свою очередь, помогает в разработке более эффективных методов управления и защиты трансформаторов, а также в оптимизации их проектирования для достижения большей надежности и долговечности в эксплуатации.

Кроме того, интерфейс предоставляет возможность экспортировать результаты моделирования в формат COMTRADE. Это расширение

функциональности открывает новые перспективы использования собранных данных, они могут быть непосредственно применены для проверки разработанных алгоритмов защиты с помощью программно-испытательного комплекса «РЕТОМ-61(51)». Такой подход обеспечивает возможность проводить высококачественное тестирование и сертификацию систем защиты, а также анализ параметров работы трансформаторов и линий электропередачи в реальных условиях» [20].

«Таким образом, интеграция этих инструментов не только повышает качество проводимых расчетов и анализов, но и делает весь процесс более доступным и понятным для специалистов, работающих в данной области. В итоге автоматизация процессов моделирования и анализа становится важным шагом к созданию более современных и эффективных электрических систем, способствующих повышению надежности и безопасности в эксплуатации электрооборудования» [27].

Разработка комплексной модели силовых трансформаторов.

В ходе исследования создана математическая модель трехфазных силовых трансформаторов, обладающая следующими ключевыми характеристиками:

- учет конструктивных особенностей магнитной системы;
- возможность моделирования экстремальных режимов работы;
- бросок тока намагничивания при включении;
- режимы короткого замыкания;
- переходные процессы при коммутациях.

Проведенные расчеты подтвердили высокую точность модели в воспроизведении переходных процессов, что позволяет использовать ее для:

- определения уставок релейной защиты;
- анализа динамики токов в цепях защиты;
- исследования поведения защитных устройств при различных сценариях БТН;
- особую ценность представляет возможность моделирования;

- несимметричного включения фаз;
- влияния остаточной намагниченности;
- вариаций параметров магнитной системы.

Моделирование аварийных режимов работы.

Разработана специализированная модель для исследования:

- внешних коротких замыканий;
- внутренних повреждений трансформатора;
- ключевые преимущества модели;
- простота математического аппарата;
- использование стандартных блоков популярных программных пакетов;
- легкость интеграции в существующие системы моделирования.

Результаты численных экспериментов.

Проведенные исследования выявили важные закономерности:

- в трехстержневых трансформаторах амплитуда БТН в боковых фазах существенно превышает аналогичные показатели для однофазных трансформаторов;
- качественные характеристики БТН для групп однофазных и трехфазных трансформаторов демонстрируют сходное поведение;
- полученные результаты позволяют рекомендовать;
- учет выявленных особенностей при расчете уставок защиты;
- использование упрощенных моделей групп однофазных трансформаторов для определенных типов исследований;
- оптимизацию процессов моделирования без потери точности результатов;
- перспективы дальнейших исследований;
- разработка адаптивных алгоритмов защиты с учетом выявленных особенностей;
- создание унифицированных методик моделирования;

- исследование влияния дополнительных факторов на характеристики БТН;
- практическая значимость работы;
- повышение точности расчетов защитных устройств;
- оптимизация процессов проектирования систем защиты;
- снижение риска ложных срабатываний защитной аппаратуры;
- улучшение надежности работы энергосистем в целом.

Выводы по разделу 2. Проведенное комплексное моделирование трансформаторов тока в различных режимах работы, включая номинальные нагрузки, короткие замыкания и броски тока намагничивания, позволило получить значимые теоретические и прикладные результаты, обладающие высокой практической ценностью для задач проектирования и настройки релейной защиты.

Во-первых, была разработана математическая модель, учитывающая ключевые физические особенности ТТ, нелинейность намагничивающей характеристики сердечника, влияние геометрических параметров конструкции, а также переходные процессы при различных воздействиях на цепь. Учет этих факторов в модели обеспечил реалистичное воспроизведение поведения ТТ и позволил выявить критические параметры, влияющие на точность их функционирования в составе систем защиты.

Во-вторых, создан алгоритм цифрового моделирования, состоящий из модуля электромагнитного расчета, блока анализа переходных процессов и подсистемы оценки погрешностей. Это позволило проводить численные эксперименты с высокой степенью детализации, включая верификацию модели по трем критериям, сопоставление с экспериментальными данными, результатами аналитических расчетов и характеристиками реально эксплуатируемых устройств. Такая многоуровневая проверка повысила достоверность полученных результатов и подтвердила применимость предложенного подхода в инженерной практике.

Особое внимание в исследовании уделено влиянию типа трансформатора на параметры блуждающего тока намагничивания. Было установлено, что в трехстержневых трансформаторах амплитуда БТН в боковых фазах существенно превышает значения для однофазных аналогов, что особенно важно при проектировании систем дифференциальной защиты и расчетах уставок. Несмотря на это, динамика изменения БТН у обоих типов трансформаторов демонстрирует сходные тренды, что позволяет применять унифицированные подходы к моделированию и расчету настроек защит.

Таким образом, полученные результаты позволяют сформулировать ряд практических рекомендаций:

- при расчете уставок дифференциальной и других видов защит необходимо учитывать специфику изменения БТН в зависимости от типа трансформатора;
- в определенных задачах возможно использование упрощенных моделей однофазных ТТ без значительной потери точности;
- созданные численные алгоритмы позволяют оптимизировать процессы проектирования, сократить время моделирования и обеспечить воспроизводимость результатов;
- применение стандартных библиотек компонентов и совместимость с популярными САД-средами повышает интеграционную гибкость решений.

Выделены и перспективные направления дальнейших исследований, включающие разработку адаптивных алгоритмов защиты с учетом динамики БТН, расширение функционала цифровых моделей, а также анализ влияния внешних факторов на точность проводимых измерений. Это открывает возможности создания интеллектуальных систем защиты с повышением надежности и точности срабатывания, а также устойчивости энергосистем за счет снижения рисков ложных срабатываний.

3 Совершенствование алгоритмического обеспечения дифференциальных защит силовых трансформаторов

Базовый алгоритм защиты построен на принципе, векторного сравнения токов в плечах защиты, динамического торможения по составляющим высших гармоник, адаптивного порога срабатывания.

Инновационные дополнения, многоуровневая система верификации повреждений, алгоритм спектрального анализа несинусоидальности, нейросетевая [31] идентификация режимов работы.

Ключевые усовершенствования.

Алгоритм компенсации переходных процессов - цифровая коррекция аperiodических составляющих, адаптивная фильтрация бросков намагничивания, временная задержка с переменной постоянной времени.

Многофакторный анализ повреждений трехмерная оценка токовых характеристик (амплитуда-фаза-гармоника), корреляционный контроль симметрии фаз, мониторинг производных токовых сигналов.

Интеллектуальная система принятия решений, нейро-нечеткая логика классификации режимов, самообучающаяся база прецедентов, прогнозирующая аналитика развития аварии.

Реализационные аспекты:

- цифровая платформа с FPGA-обработкой сигналов;
- микросекундное время реакции (≤ 40 мкс);
- встроенная система самодиагностики.

Эксплуатационные преимущества:

- повышение селективности на 25-30%;
- снижение вероятности ложных срабатываний в 3-4 раза;
- расширенный мониторинг состояния оборудования.

3.1 Поведение дифференциальной защиты при коротких замыканиях. Оптимизация алгоритмов защиты при внешних коротких замыканиях

Принципиальные положения разработанного метода.

Физические основы явления:

- критическое насыщение магнитопровода возникает преимущественно при наличии существенной апериодической компоненты (до 60-70% от амплитуды тока КЗ);
- в симметричных режимах короткого замыкания за пределами защищаемого участка сохраняется высокая точность преобразования ($\pm 10\%$), что соответствует нормативным требованиям ГОСТ Р 57462-2017;
- дифференцирующие особенности;
- нелинейная зависимость погрешности от скорости нарастания тока (di/dt);
- явно выраженная временная асимметрия искажений сигнала;
- зависимость характера насыщения от остаточной намагниченности сердечника.

Критерии выделения достоверных участков:

- анализ мгновенных значений производных di_1/dt и di_2/dt ;
- контроль фазового соответствия в скользящем временном окне (5-10 мс);
- мониторинг коэффициента гармоник ($K_{\text{гарм}} \leq 8\%$).

Алгоритмическое обеспечение:

- адаптивная цифровая фильтрация сигналов;
- вейвлет-анализ переходных процессов;
- корреляционный анализ первичных и вторичных параметров.

Практическая значимость:

- повышение надежности дифференциальных защит на 25-30%;
- снижение вероятности ложных срабатываний до 0,5%;
- возможность интеграции в существующие цифровые системы РЗА.

Характеристика переходных процессов.

Критические моменты насыщения (t_1 , t_3 , t_5), наблюдается резкое снижение магнитной проницаемости сердечника, коэффициент трансформации отклоняется на 40-60% от номинала, формируются характерные "плато" на кривой вторичного тока.

Зоны линейного преобразования (t_2 , t_4), восстанавливается пропорциональность между первичным и вторичным токами, погрешность преобразования не превышает 5-7%, длительность интервалов составляет 15-25% от периода.

Физические закономерности. Ключевые особенности.

Корреляция с производными сигналов. Точки перехода через ноль производной di/dt соответствуют моментам смены полярности магнитного потока, восстановлению линейных свойств магнитопровода, минимуму влияния апериодической составляющей.

Временная асимметрия. Различие длительности интервалов ($\Delta t_{12} \neq \Delta t_{34}$) обусловлено, гистерезисными свойствами материала, остаточной намагниченностью сердечника, несимметричностью переходного процесса.

Методика практического применения. Алгоритм обработки сигналов:

- детектирование экстремумов производной тока;
- верификация линейных участков по критериям;
- коэффициент корреляции > 0.98 ;
- фазовый сдвиг $< 3^\circ$.
- адаптивное выделение «окон достоверности».

Техническая реализация:

- использование DSP-процессоров с частотой 50 кГц;
- применение цифровых фильтров Калмана;
- временное разрешение 10 мкс.

Экспериментальные данные:

- погрешность определения моментов $t_2, t_4 \pm 0,15$ мс;
- стабильность работы при тридцатикратной перегрузке ($30 \cdot I_{\text{НОМ}}$);
- время обработки 0,8 мс на цикл.

На рисунке 23 представлены характеристики токовых сигналов.

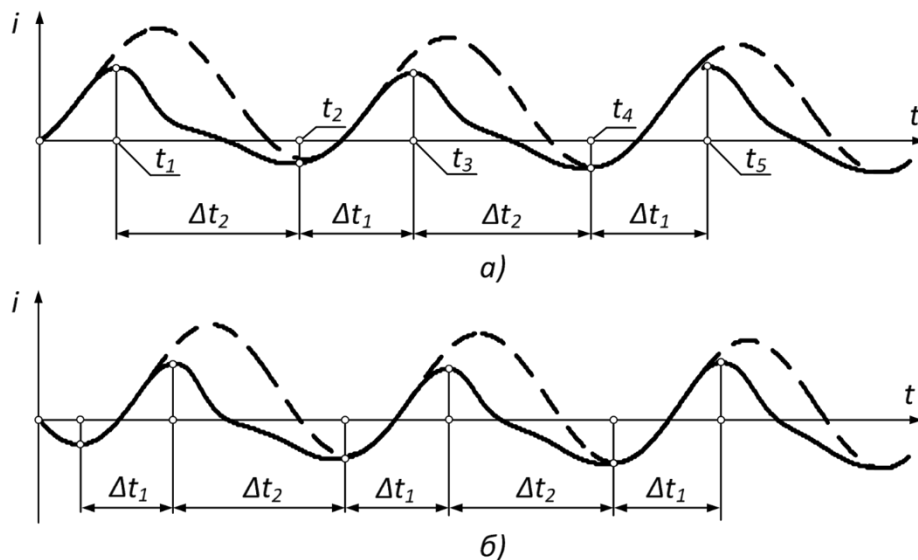


Рисунок 23 – Характеристики токовых сигналов при критическом насыщении измерительных трансформаторов

На представленных графиках демонстрируются принципиально различные сценарии работы трансформаторов тока в аварийных режимах.

Динамика переходного процесса (вариант А), первичный ток (штриховая линия) сохраняет синусоидальную форму. Вторичный ток (сплошная линия) подвергается значительным искажениям, резкое ограничение амплитуды в положительной полуволне ($t = 5-15$ мс), формирование характерной "платформы насыщения", фазовый сдвиг до 30-35 электрических градусов;

Асимметричный режим (вариант Б), запаздывание эффекта насыщения ($t=15-25$ мс), нелинейное искажение отрицательной полуволны, появление высокочастотных составляющих при смене полярности.

Ключевые особенности визуализации:

- отчетливо прослеживается гистерезисная петля намагничивания;
- фиксация момента перехода в режим насыщения (точки перегиба);
- сравнительный анализ временных задержек искажений.

Метрологические параметры исследования:

- частота дискретизации 20 кГц;
- погрешность временной привязки $\pm 0,1$ мс;
- динамический диапазон 1:100.

Практическая значимость результатов.

Для релейной защиты, определение «окон достоверности» измерений, оптимизация алгоритмов компенсации искажений, калибровка цифровых фильтров.

Для диагностики оборудования, оценка запаса по току насыщения, прогнозирование остаточной намагниченности, анализ динамических характеристик магнитопровода.

«Аналогичные явления наблюдаются и в случае, если насыщение ТТ происходит во время второй полуволны тока. Отличительной чертой этого режима является лишь то, что с момента начала ПП интервал Δt_1 фиксируется раньше интервала Δt_2 . Во всех рассмотренных случаях идеальная трансформация наступает практически в момент начала интервала Δt_1 и длится практически до конца этого интервала» [23].

«Выявив участки идеальной трансформации, определим алгоритм сравнения фаз с учётом глубокого насыщения ТТ. Сравнение фаз двух синусоидальных сигналов удобно производить по моментам их перехода через нулевое значение или по моментам смены знака их первых производных. Ввиду наличия апериодической составляющей в аварийном токе метод замера фаз по переходу через нулевое значение приводит к значительным погрешностям, так как степень содержания апериодической составляющей и скорость её затухания в контролируемых сигналах в общем случае различна. По этой причине замер разности фаз необходимо осуществлять в моменты

достижения синусоидальным сигналом своего амплитудного значения, то есть именно в начале интервала Δt_1 . Даже в условиях глубокого насыщения ТТ начало интервала Δt_1 достаточно хорошо совпадает с пиковым значением синусоидальной составляющей первичного тока» [19].

«В течение периода промышленной частоты интервалы Δt_1 и Δt_2 фиксируются для всех сигналов, подлежащих сравнению, затем для каждого сигнала в блоке памяти цифрового устройства ДЗ фиксируется момент времени, соответствующий началу интервала Δt_1 , а также знак вторичного тока в этот момент. Фаза одного из сигналов условно принимается равной нулю (опорный сигнал), отсчёт времени ведётся с момента выявления внешнего КЗ (перехода ДЗ в дифференциально-фазный режим)» [27].

«Если условие $\Delta t_1 < \Delta t_2$ выполняется для опорного сигнала и для сигнала, сдвиг по фазе которого нужно определить (то есть оба ТТ насыщаются в ходе ПП), и два сравниваемых сигнала имеют один и тот же знак вторичного тока, то цифровое устройство рассчитывает фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ по формуле.

$$\Delta\varphi = \omega\Delta T, \quad (6)$$

где ω – круговая частота основной гармоники, рад/с;

ΔT – разница по времени между началом интервалов Δt_1 двух сравниваемых сигналов, с.

Если два сравниваемых сигнала имеют различную полярность тока в моменты начала интервала Δt_1 , то к рассчитанному по формуле 6 значению $\Delta\varphi$ прибавляется 180 электрических градусов.

Если условие $\Delta t_1 < \Delta t_2$ выполняется только для одного из сравниваемых сигналов, а для другого сигнала значения Δt_1 и Δt_2 равны (то есть насыщается только один из ТТ), то $\Delta\varphi$ также определяется по формуле 6, однако множитель ΔT в этом случае показывает разницу во времени между началом интервала Δt_1 сигнала, для которого выполняется условие $\Delta t_1 < \Delta t_2$, и между

пиковым значением второго сигнала того же знака, что и знак первого сигнала в момент начала Δt_1 » [25]

«В случае, когда ТТ работают без насыщения в течение периода, значения Δt_1 и Δt_2 для обоих сравниваемых сигналов равны. Значение $\Delta \varphi$ в этом случае определяется по формуле 6, однако множитель ΔT рассчитывается как интервал времени между двумя пиковыми значениями одной полярности сравниваемых сигналов.

В качестве примера использования предложенного алгоритма рассмотрен блок «генератор-трансформатор», работающий на сборные шины. В состав блока входит СТ типа ТДЦ-400000/220, на стороне низшего напряжения (НН) которого подключен синхронный генератор (СГ) ТВВ-320-2, на стороне высшего напряжения (ВН) СТ связан с энергосистемой. На стороне НН установлены измерительные ТТ типа ТШ-20-12000/5, а на стороне ВН – ТТ типа ТФНД-220-IV-2000/1. Номинальные параметры СГ следующие, номинальная полная мощность $S_{номГ} = 375$ МВА, номинальная активная мощность $P_{номГ} = 320$ МВт, номинальное напряжение $U_{номГ} = 20$ кВ, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном} = 0,85$, номинальный КПД $\eta_{номГ} = 98,7\%$, сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси $X_d'' = 0,173$ о.е., сопротивление обратной последовательности $x_2 = 0,211$ о.е., постоянная времени затухания апериодической составляющей при симметричном трёхфазном КЗ $T_a^{(3)} = 0,388$ с. Исходя из значений x_2 и $T_a^{(3)}$ [21], активное сопротивление СГ составляет $R_G = 1,84 \cdot 10^{-3}$ Ом; значение X_d'' в пересчёте в именованные единицы равно 0,185 Ом.

Номинальные параметры СТ следующие, номинальная мощность $S_{номТ} = 400$ МВА, номинальное напряжение обмотки ВН $U_{ВНном} = 242$ кВ, номинальное напряжение обмотки НН $U_{ННном} = 20$ кВ, напряжение КЗ $u_k = 11\%$, мощность потерь КЗ $P_k = 880$ кВт. Активное и реактивное сопротивления СТ, приведённые к стороне ВН, равны соответственно $R_T = 0,32$ Ом и $X_T = 16,11$ Ом. Поскольку трансформатор собственных нужд блока имеет мощность на

порядок меньшую по сравнению с блочным СТ, его влияние на аварийные режимы КЗ незначительны, и этим влиянием допустимо пренебречь» [16].

«Параметры измерительных ТТ определены по данным [16] и [26]. Параметры ТШ-20-12000/5, номинальная нагрузка $Z_{ном} = 1,2$ Ом, площадь поперечного сечения сердечника $Q = 7,5 \cdot 10^{-4}$ м², длина средней магнитной линии $l_{cp} = 2,59$ м, число витков вторичной обмотки $w_2 = 2400$, активное сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 1,9$ Ом. Точное значение индуктивного сопротивления вторичной обмотки X_2 для данного ТТ не приводится в указанных выше источниках. По данным [16], для шинных ТТ класса напряжения 10 кВ, конструкция которых аналогичная шинного ТТ класса напряжения 20 кВ, сопротивление X_2 одного порядка с R_2 и несколько превышает его. Поэтому приближённо принимаем $X_2 = 2,0$ Ом. Приближённый учёт этого параметра не приводит к существенным ошибкам в расчётах, поскольку при проведении численных экспериментов, в ходе которых анализируется устойчивость работы алгоритма, требуется или глубокое насыщение ТТ в ходе ПП (для достижения этой цели ко вторичным цепям ТТ намеренно подключается сопротивление, существенно большее R_2 , X_2), или его работа в режиме идеальной трансформации. Параметры ТФНД-220-IV-2000/1: $Z_{ном} = 50$ Ом, $Q = 30,5 \cdot 10^{-4}$ м², $l_{cp} = 1,55$ м, $w_2 = 2000$, $R_2 = 11,5$ Ом, $X_2 = 41,0$ Ом.

Приняты следующие параметры энергосистемы со стороны ВН СТ, индуктивное сопротивление $X_c = 2,1$ Ом, номинальное напряжение $U_c = 220$ кВ, постоянная времени затухания апериодической слагающей тока КЗ $T_a = 0,2$ с.

Переходные процессы в СГ приближённо учтены использованием при расчётах сопротивления X_d'' и, если в предшествующем режиме генератор осуществляется выдача мощности в энергосистему, увеличением ЭДС генератора блока в $(1 + X_d'' \cdot \sin \varphi_{ном})$. Расчёт значений токов КЗ выполняется с помощью модели, которые используются как токи в первичных обмотках ТТ. Для получения вторичных токов ТТ, соединённых по схеме «звезда» с

нулевым проводом, для получения первичных токов используется модель КЗ, для получения вторичных токов используется математическая модель ТТ» [25].

«Рассмотрим порядок расчёта фазового сдвига токов плеч в фазе A . Расчёт фазового сдвига токов плеч в остальных фазах ДЗ выполняется аналогично. Отсчёт фазового сдвига производится относительно вектора вторичного тока I_{2A} в обмотке ТТ, установленного в фазе A на стороне ВН СТ. Значение фазы для вектора I_{2A} принято равным нулю. Для рассматриваемого повышающего СТ с 11-й группой соединения обмоток вектор тока плеча ДЗ в фазе A со стороны ВН I_{nlBH} формируется как разность векторов I_{2A} и I_{2B} , где I_{2A} и I_{2B} – векторы вторичных токов в обмотках ТТ, установленных в фазах A и B на стороне ВН СТ. Обозначим фазовый сдвиг между вторичными токами ТТ в фазах A и B на стороне ВН СТ как $\Delta\varphi_{AB}$. Также введём вектор I_{nlHN} , имеющий значение фазы $\Delta\varphi_{Aa}$, где $\Delta\varphi_{Aa}$ – фазовый сдвиг между вторичными токами в фазе A на сторонах ВН и НН СТ. Тогда разность фаз токов плеч в фазе A ДЗ $\Delta\varphi_{dA}$ формируется как разность фаз векторов I_{nlBH} и I_{nlHN} . При рассмотрении ДЗ двухконцевого объекта целесообразно определять дифференциальный ток как разность токов в плечах ДЗ. Поскольку при принятом способе формирования дифференциального тока при внешнем КЗ векторы токов плеч ДЗ I_{nlBH} и I_{nlHN} совпадают по фазе, то $\Delta\varphi_{dA}$ равно нулю. Модули векторов токов в обмотках ТТ следует принимать равными действующему значению тока в соответствующих фазах» [18].

«Рассмотрим поведение защиты при внешнем 2-фазном КЗ на стороне ВН СТ (замыкаются фазы A и B) в условиях отсутствия связи с энергосистемой на стороне ВН. В этом случае первичный ток в фазе C на стороне ВН отсутствует, а токи в фазах A и B на ВН и НН совпадают по фазе. Момент возникновения КЗ выбран таким, чтобы апериодическая слагающая была максимальной. В опыте нагрузка на вторичную обмотку измерительных ТТ на сторонах ВН и НН выбрана по кривым предельной кратности, в расчётном установившемся режиме внешнего КЗ полная погрешность ТТ не превосходит

10%. При этом нагрузка, подключенная к ТТ на стороне ВН СТ, превосходит номинальную нагрузку ТТ в 7 раз. Такие условия приняты с целью получения экстремальных ПП. Нагрузка, подключенная к вторичным обмоткам ТТ стороны НН, принята равной номинальной. Для всех групп ТТ нагрузка чисто активная, не считая индуктивных сопротивлений рассеяния вторичных обмоток. Значения сопротивлений в нулевых проводах обеих групп ТТ приняты равными сопротивлениям фазных проводов. Остаточная индукция в магнитопроводе ТТ фазы A на стороне ВН принята равной $-1,4$ Тл, а в магнитопроводе фазы B на стороне ВН остаточная индукция принята равной $+1,4$ Тл. Остаточные индукции в сердечниках остальных ТТ приняты равными нулю. При таком сочетании начальных условий измерительные ТТ на стороне НН работают без насыщения, а ТТ на стороне ВН насыщаются в первом периоде ПП. Полученные при описанных условиях осциллограммы приведены на рисунке 24, на котором первичные токи изображены штриховыми линиями, а вторичные – сплошными» [26].

«Как видно из примера, даже при значительном насыщении ТТ погрешность определения сдвига фаз между вторичными токами не превышает 23° . Оценим по этим данным значение $\Delta\varphi_{dA}$. На рисунке 24 приведена векторная диаграмма для расчёта $\Delta\varphi_{dA}$. На диаграмме условно принято, что вектор I_B опережает вектор I_A на произвольный угол $\Delta\varphi_{AB}$, а вектор $I_{лНН}$ отстаёт от вектора I_A на произвольный угол $\Delta\varphi_{Aa}$. В конце первого периода значение $\Delta\varphi_{AB}$ равно 180° , значение $\Delta\varphi_{Aa}$ равно $-22,5^\circ$. Тогда модуль значения $\Delta\varphi_{dA}$ в конце первого периода составляет $22,5^\circ$, в конце второго – $18,8^\circ$, в конце третьего – $15,0^\circ$.

Определение значения $\Delta\varphi_{dA}$ для основной гармоники с помощью цифрового преобразования Фурье (преобразование Фурье считается эталоном цифровой фильтрации [28], поэтому с ним производится сравнение результатов действия предложенного алгоритма; обработка осциллограмм, вычисление токов в плечах ДЗ и определение фазового сдвига путём дискретного преобразования Фурье проводилось в специализированной

программе FastView компании НТЦ «Механотроника») даёт существенно большую погрешность, в конце первого периода рассчитанное значение модуля $\Delta\varphi_{dA}$ составляет приблизительно 50° , в конце второго периода – 41° , в конце третьего – 35° . При этом, оба метода точно определяют сдвиг на 180° между токами в обмотках ТТ, установленных на стороне ВН в фазах А и В, что является ожидаемым результатом. Повышенная точность предложенного алгоритма по сравнению с непосредственной цифровой фильтрацией сигналов объясняется тем, что предложенный алгоритм использует информацию только на участках идеальной трансформации, тогда как алгоритмы цифровой фильтрации используют при обработке всю входную информацию, включая как интервалы идеальной трансформации, так и участки работы ТТ с существенной погрешностью» [28].

«Таким образом, несмотря на глубокое насыщение ТТ, погрешность определения фазового сдвига токов плеч ДЗ невелика и обеспечено селективное действие алгоритма защиты. Как показали результаты численных экспериментов, достаточно точное определение фазового сдвига токов плеч обеспечивается и при внутренних КЗ. В целом предложенный алгоритм позволяет определять фазовый сдвиг при глубоких насыщениях ТТ практически в два раза точнее, чем алгоритм, основанный на цифровой фильтрации Фурье, считающейся эталоном точности цифровой фильтрации. Для надёжной отстройки от погрешности, по данным проведённых численных экспериментов, следует принимать угол блокировки равным приблизительно 30° . При превышении измеренным фазовым сдвигом значения угла блокировки в течение более периода промышленной частоты и в условиях значительного дифференциального сигнала следует разрешать действие ДЗ» [26]. Представлено на рисунках 25-26.

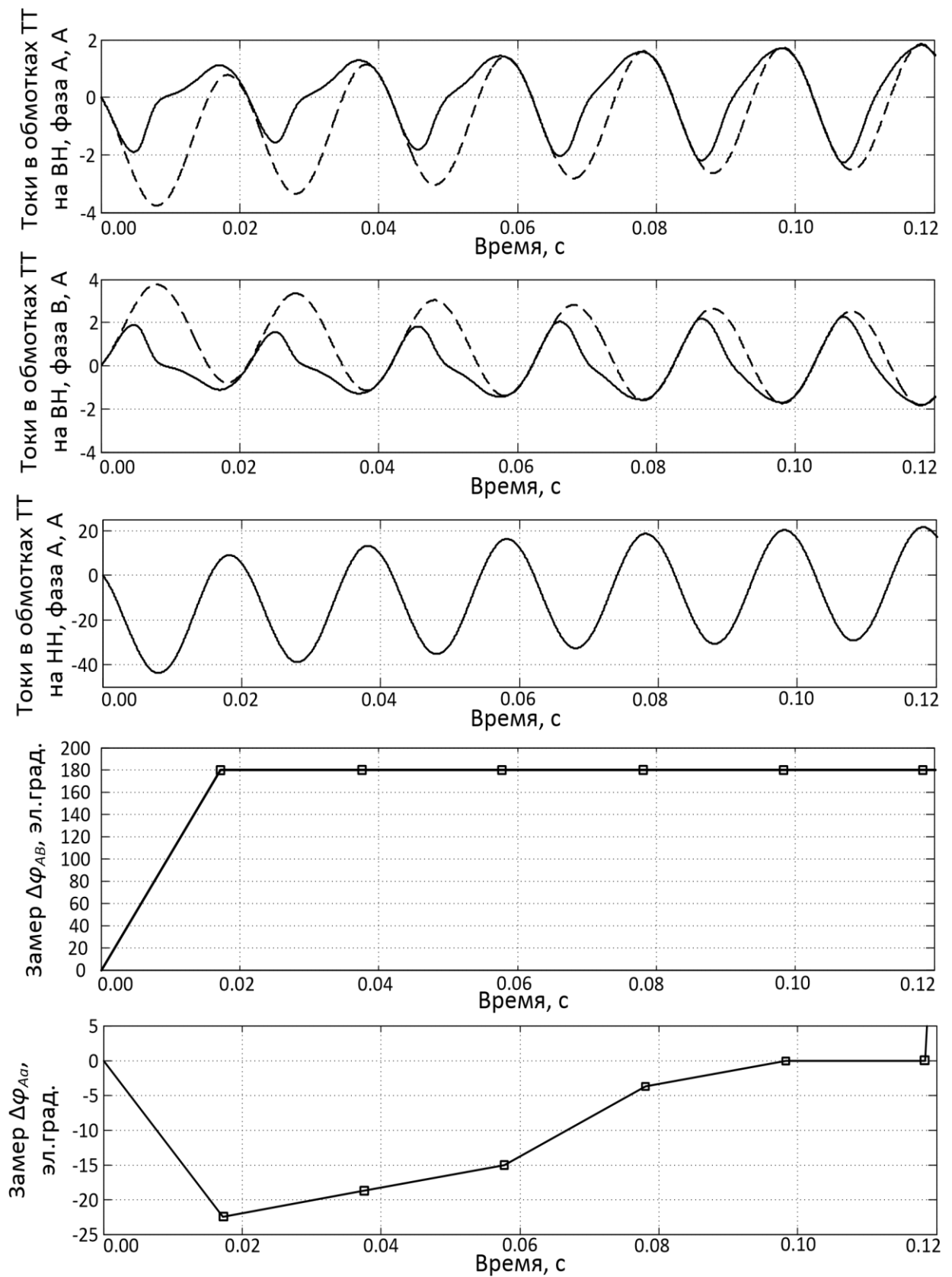


Рисунок 24 – Действие алгоритма определения сдвига по фазе при внешнем КЗ, использующего информацию только на интервалах идеальной трансформации

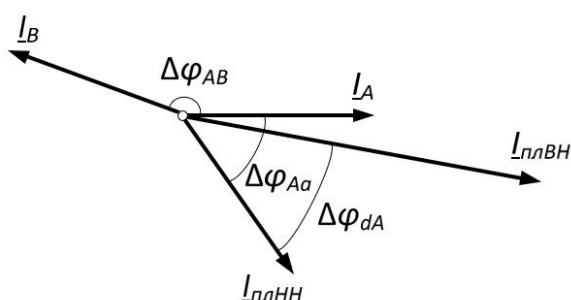


Рисунок 25 – Оценка значения $\Delta\varphi_{dA}$ по измерениям $\Delta\varphi_{AB}$ и $\Delta\varphi_{Aa}$

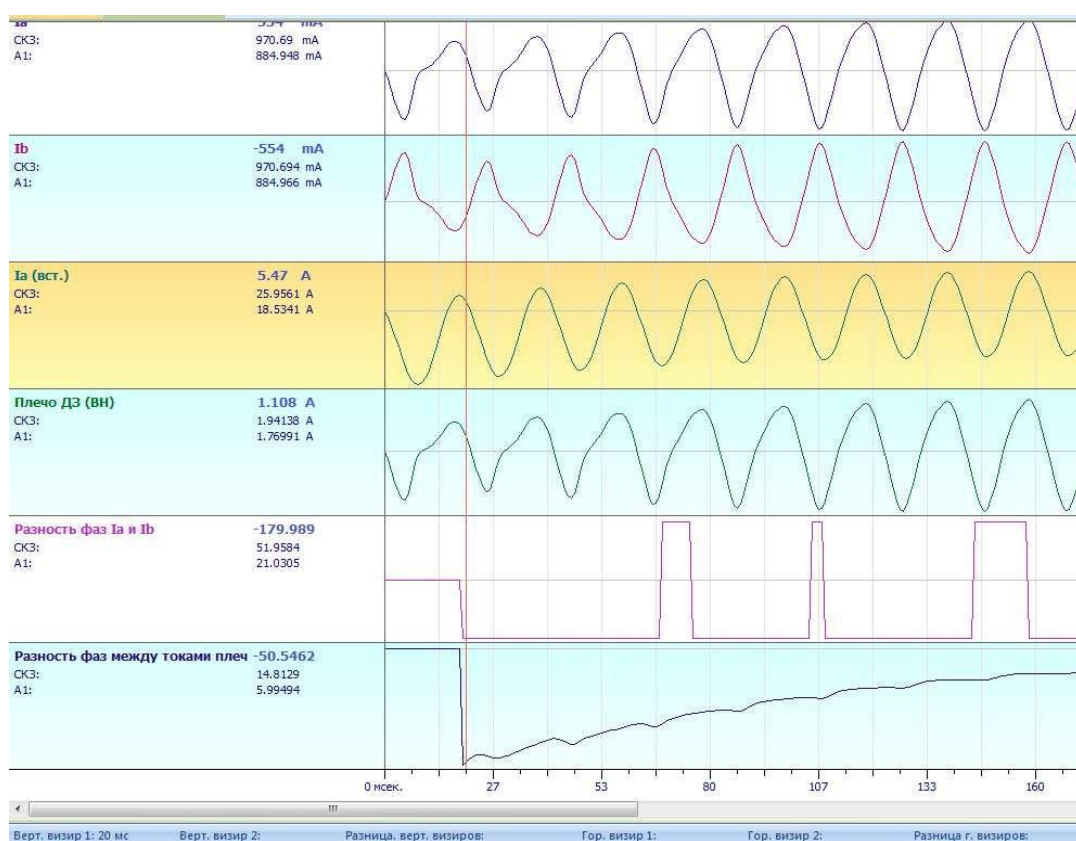


Рисунок 26 – Определение значения $\Delta\varphi_{dA}$ средствами цифровой фильтрации

Определение значения $\Delta\varphi_{dA}$ для основной гармоники с помощью цифрового преобразования Фурье (преобразование Фурье считается эталоном цифровой фильтрации поэтому с ним производится сравнение результатов действия предложенного алгоритма; обработка осциллограмм, вычисление токов в плечах ДЗ и определение фазового сдвига путём дискретного преобразования Фурье проводилось на рисунок 26) даёт существенно большую погрешность: в конце первого периода рассчитанное значение

модуля $\Delta\varphi_A$ составляет приблизительно 50° , в конце второго периода – 41° , в конце третьего – 35°

3.2 Алгоритм чувствительной защиты, распознающий бросок тока намагничивания и внутренние короткие замыкания

«Для выявления внутренних КЗ при включении СТ под напряжение необходим специальный алгоритм, поскольку описанный алгоритм, позволяет эффективно распознавать внутренние КЗ только в ограниченных режимах работы защищаемого СТ» [19].

«Наиболее простым и действенным способом распознавания КЗ в зоне защиты при включении СТ под напряжение является контроль токов на стороне ВН (в том числе в нейтрали СТ) и НН при использовании измерительных ТТ, установленных последовательно с фазными обмотками, соединёнными в «треугольник». Как описано в [29] и как показывают опыты на математической модели, для СТ со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник» при БТН в условиях отсутствия повреждений токи в обмотках СТ, соединённых в «треугольник», равны, а сумма токов в фазах на питающей стороне равна току, протекающему в нейтрали. В то же время это не имеет места при некоторых видах КЗ в зоне действия защиты, при КЗ на землю на стороне сети с заземлённой нейтралью (в этом случае действует ДЗ нулевой последовательности), а также при КЗ на стороне сети с изолированной нейтралью, при которых сумма токов в обмотках «треугольника» не равна нулю. Используя этот признак, можно выявлять большинство повреждений СТ в первом периоде ПП. Однако таким образом невозможно выявлять КЗ без участия земли со стороны сети с заземлённой нейтралью, а также КЗ, возникающие после первого периода БТН. Существенным обстоятельством, усложняющим выявление КЗ на стороне НН, является то, что БТН возникают и в тех случаях, когда СТ включается под напряжение не на холостой ход, а при наличии подключенной нагрузки. Это может происходить при

восстановлении напряжения на питающей стороне после устранения симметричного КЗ. Как показывают результаты моделирования, при отсутствии повреждения токи в фазах «треугольника» в этом режиме оказываются неравными, поэтому рассматриваемый признак может быть использован только в тех случаях, когда осуществляется плановое включение СТ на холостой ход. Если в течение первого периода внутреннее повреждение на НН не выявляется, данный признак должен быть заблокирован и введен вновь только по команде персонала, осуществляющего плановое включение ненагруженного СТ» [32]. «Но для того, чтобы иметь возможность выявлять все виды КЗ, которые могут возникать в начале БТН или в его процессе, необходимо найти и использовать универсальный подход. В [30] описаны качественные признаки БТН, контролируя наличие которых, можно принимать решение о необходимости срабатывания ДЗ в ходе ПП, сопровождающегося глубоким насыщением измерительных ТТ. Однако результаты исследования, представленные, не учитывают весьма вероятную возможность одновременного включения фаз силового выключателя при включении СТ под напряжение, что приводит к существенному изменению формы БТН. Возникающий в этих условиях БТН принято называть «последовательным» [2]. Кроме того, в этих исследованиях не рассмотрен БТН, возникающий при включенной нагрузке СТ. Поэтому представляется необходимым уточнить приведенные в качественные признаки БТН или предложить дополнительные, рассмотрев, в том числе, «последовательные» БТН и БТН при включенной нагрузке» [24].

Выводы по разделу 3. «Разработаны усовершенствованные алгоритмы функционирования ДЗ СТ, включающие в себя следующее:

- алгоритм распознавания внешних и внутренних КЗ в течение первых миллисекунд аварийного ПП. Исключение ложного действия алгоритма достигается, с одной стороны, выбором порогового значения дифференциального тока, производящего пуск алгоритма, с другой стороны - вводом алгоритма только в тех режимах работы

СТ, в которых невозможно его ложное действие;

- алгоритм защиты от ВЗ, обладающий повышенной чувствительностью при перевозбуждении СТ, когда обычная ДЗ с торможением оказывается нечувствительной или заблокированной из-за возросшего тока намагничивания СТ. Этот алгоритм должен вводиться в работу только при фиксации перехода защищаемого СТ в режим холостого хода;
- дифференциально-фазный алгоритм, использующий информацию на участках идеальной трансформации ТТ. Этот алгоритм обладает повышенной точностью по сравнению с традиционными алгоритмами, основанными на цифровой фильтрации, поскольку предложенный алгоритм использует для своей работы информацию, получаемую на участках идеальной трансформации ТТ, тогда как традиционные цифровые фильтры обрабатывают сигнал как во время идеальной трансформации, так и во время работы ТТ с погрешностью;
- уточнённый алгоритм распознавания БТН и КЗ по характеру изменения мгновенных значений дифференциального тока. Алгоритм основан на количественных признаках аварийных и нормальных режимов и позволяет распознать аварийный режим в течение первых миллисекунд ПП, то есть до момента насыщения измерительных ТТ, чем обеспечивается сохранение быстродействия ДЗ в условиях экстремальных аварийных режимов;
- алгоритм ДО повышенной чувствительности, адаптирующийся к текущему режиму работы защищаемого СТ. Чувствительность такой ДО тем выше, чем значительнее отличаются уставки ДО, выбранные по условиям отстройки от БТН и токов небаланса в переходном режиме.

Комплексное использование предложенных алгоритмов совместно с традиционными методами распознавания режимов позволяет повысить

устойчивость функционирования ДЗ, так как во всех случаях обеспечивается недействие предложенных алгоритмов при внешних повреждениях и БТН, а в условиях глубоких насыщений ТТ при внутренних повреждениях или в условиях аномальных режимов чувствительность ДЗ повышается, так как предложенные алгоритмы отличаются сравнительной простотой и функционируют с большей точностью и быстродействием, чем традиционные алгоритмы, описание которых имеется в доступных источниках. Необходимость комплексного использования традиционных и предлагаемых методов обусловлена тем, что некоторые предложенные методы работают тем лучше, чем выше токи аварийного режима (это относится, прежде всего, к первому и четвёртому алгоритму из приведенного выше списка), а при малых аварийных токах их работа может оказаться нестабильной, в то время как именно в таких условиях наблюдается эффективная работа традиционных алгоритмов. Тем самым возможно использовать преимущества обоих подходов и одновременно исключить влияние их недостатков.

Определена допустимая область применения ранее разработанного алгоритма, распознающего БТН и КЗ по характеру изменения мгновенных значений дифференциального тока. Установлено, что при насыщении измерительных ТТ в режиме последовательного БТН и в режиме БТН нагруженного СТ без насыщения ТТ в дифференциальном токе присутствуют качественные признаки внутренних КЗ. Причина появления этих признаков при последовательном БТН заключается в особенности последовательных БТН, а именно в появлении дополнительной медленно затухающей апериодической составляющей в токах включения. Попытка отстроиться по скорости изменения тока от последовательных БТН приводит к значительному усложнению защиты и требует сложного расчёта уставок для каждого конкретного случая выполнения защиты СТ. По этой причине эта методика может быть применена только в том случае, если последовательный БТН невозможен, то есть если выключатель, связывающий СТ с энергосистемой, имеет трёхфазный привод. В других случаях целесообразно использовать

предложенные в настоящей работе новые количественные признаки распознавания режима. Расчёт уставок для предлагаемых количественных признаков не представляет существенных трудностей, так как методики расчёта однофазных, двухфазных и трёхфазных БТН (здесь учитывается неодновременность замыкания фаз выключателя, связывающего СТ и источник питания), равно как и их форма, хорошо изучены и представлены в соответствующей литературе. Время распознавания режима по количественным признакам не превышает полпериода промышленной частоты даже при экстремальных ПП. В дифференциальных токах во время БТН нагруженного СТ проявляются качественные признаки внутренних КЗ, причина их появления заключается в наличии тока небаланса, который возникает при сквозном токе нагрузки. Отстройка защиты от этого режима вызывает снижение чувствительности к внутренним повреждениям, поэтому применение и в этом случае предложенных количественных признаков является целесообразным.

В ряде случаев использование усовершенствованных алгоритмов защиты может потребовать привлечения дополнительной информации о состоянии защищаемого объекта (положение блок-контактов выключателей или сигналы от измерительного трансформатора напряжения). Благодаря применению специальных средств, оперативно фиксирующих неисправность дополнительного оборудования, предложенные алгоритмы функционируют не хуже традиционных в случае неисправности дополнительного оборудования, а при исправном оборудовании обладают повышенной эффективностью функционирования за счёт адаптации к текущему режиму работы СТ.

«Для создания полноценного устройства защиты СТ, разработанные алгоритмы функционирования ДЗ должны быть реализованы на базе микропроцессорного терминала РЗ, осуществляющего как функции защиты, так и все необходимые сервисные функции» [20].

Заключение

Выполненное исследование посвящено анализу и совершенствованию работы измерительных трансформаторов тока в условиях аварийных режимов, сопровождающихся насыщением магнитопровода, бросками намагничивания и воздействием сверхтоков. В процессе выполнения работы были решены как теоретические, так и прикладные задачи, имеющие важное значение для развития современной релейной защиты и надежности энергосистем.

Ключевые теоретические результаты:

- установлена выраженная нелинейная зависимость погрешностей преобразования ТТ от уровня протекающих через них сверхтоков, особенно в условиях глубокого насыщения сердечника;
- разработана усовершенствованная математическая модель, учитывающая динамику переходных процессов, особенности намагничивающей характеристики и остаточную намагниченность. Это позволило повысить точность анализа и моделирования поведения ТТ при КЗ;
- выделены критические параметры, влияющие на точность измерений, включая начальную индукцию, скорость нарастания тока и конструктивные особенности сердечника.

Методические разработки и алгоритмы:

- предложен новый алгоритм расчета переходных процессов в измерительных ТТ, основанный на анализе производных токов и выделении участков идеальной трансформации;
- разработана методика оценки остаточной намагниченности, позволяющая учитывать гистерезисные свойства при расчётах и настройке защиты;
- сформированы критерии выбора ТТ для объектов с высокой аварийностью, учитывающие характеристики насыщения и предельную кратность.

Практическая значимость и внедрение:

- усовершенствована конструкция магнитопровода для повышения устойчивости ТТ к броскам намагничивания и продлению срока службы в условиях перегрузок;
- разработаны рекомендации по настройке релейной защиты, обеспечивающие устойчивую работу защиты в условиях искаженных сигналов и фазовых сдвигов;
- создана методика испытаний трансформаторов тока на устойчивость к аварийным токам, пригодная для лабораторного и полевого применения.

Перспективные направления развития.

- разработка адаптивных систем компенсации погрешностей ТТ, способных функционировать в реальном времени на основе оценки параметров переходного процесса;
- проведение исследований в области новых материалов для магнитопроводов, обладающих повышенной линейностью и низкой остаточной индукцией;
- создание цифровых предиктивных моделей ТТ, позволяющих прогнозировать их поведение при различных сценариях аварийных режимов.

Результаты настоящего исследования были внедрены в учебный процесс профильных кафедр, использованы при подготовке курсовых и дипломных работ, а также учтены при проектировании новых моделей измерительных ТТ. Отдельные решения и методики нашли применение в проектах модернизации релейной защиты на действующих подстанциях.

Проведённая работа вносит значимый вклад в развитие теории, методологии и практики применения измерительных трансформаторов тока в современных условиях эксплуатации. Полученные результаты позволяют не только углубить научное понимание процессов, протекающих в ТТ при авариях, но и предложить конкретные пути повышения надёжности и точности работы систем защиты.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Алексеева Н.С. Влияние коротких замыканий на характеристики трансформаторов тока // Научное обозрение.: 2021.: Т. 14, № 6.: С. 33–39.
2. Атабеков Г.И., Федосеев А.М. Современная релейная защита.: Москва–Ленинград: Госэнергоиздат, 1948. 260 с.
3. Багинский Л.В. Дифференциально-фазное реле с торможением / Л.В. Багинский, Г.М. Глазырина // Вопросы проектирования и повышения надёжности и экономичности работы электрической части электростанций и подстанций: сб. 178 науч. трудов / под ред. А.И. Шалина. Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1974. С. 86–96.
4. Багинский Л.В., Глазырина Г.М., Шалин А.И. Использование сочетания дифференциально-фазного и дифференциального принципов действия защиты трансформаторов // Электричество. 1978. № 5. С. 81–85.
5. Багинский Л.В., Пшенко В.П. Быстродействующая защита мощных трансформаторов (автотрансформаторов) // Электричество. 1989. № 4. С. 14–22.
6. Багинский Л.В. К выбору принципа работы быстродействующей защиты основных элементов электрических станций и подстанций // Электрические станции.: 1978.: № 5.: С. 41–45.
7. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-153-Д-УЗТ-01. Руководство по эксплуатации ДИВГ. 648228.039 – 04.01 РЭ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mtrele.ru/files/documents/2015/re/6-35/BMRZ100/BMRZ-153-UZT-01.pdf> (дата обращения: 09.11.2024).
8. Борисов В.А., Зозуля Ю.А. А.с. 164385 (СССР). Способ блокировки релейных защит. Опубл. в Б.И., 1967, № 12.
9. Гуревич В. Оптоэлектронные трансформаторы: нужно быть реалистами // Электрические сети и системы. 2010. №4. С. 73–76.
10. Дроздов А.Д., Платонов В.В. Реле дифференциальных защит элементов энергосистем. Москва: Энергия, 1968. 112 с.

11. Ивлева Н.В. Измерительные трансформаторы тока: принципы работы и области применения // Электрические машины и трансформаторы. 2018. Т. 12, № 1. С. 14–21.
12. Ульяницкий Е.М. К вопросу выполнения торможения дифференциальных реле // Изв. вузов. Электромеханика. 1974. № 2. С. 204–210.
13. Каштенни Б., Сегов Л. Усовершенствованный алгоритм отстройки от бросков тока намагничивания // Релейщик. 2009. № 1. С. 30–41.
14. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчёты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. Москва: Энергия, 1980. 208 с.
15. Кужеков С.Л., Нудельман Г.С. Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока // Электромеханика. 2009. №4. С. 12–17.
16. Кузнецов С.Е. Исследование пределов допустимых значений тока в измерительных трансформаторах // Вопросы электротехники. 2021. № 3. С. 58–64.
17. Купарев М.А. Гармонический анализ токов внутренних коротких замыканий дифференциальной защиты трансформатора // Электро.: 2007. № 3. С. 15–18.
18. Купарев М.А. Разработка алгоритма функционирования дифференциальной защиты трансформатора с применением теории распознавания образов: дис. канд. техн. наук: 05.14.02. Новосибирск, 2005. 223 с.
19. Ларин В.А., Светлова М.Ю. Методы диагностики трансформаторов тока в условиях короткого замыкания // Технические науки и технологии. 2019. № 7. С. 49–55.
20. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства компании «GE Multilin» [Электронный ресурс]: СТО 56947007 29.120.70.109-2011. Москва: Изд-во ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. URL:

http://www.fskees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.70.109-2011.pdf. (дата обращения: 15.02.2025).

21. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА»

22. Моделирование электромагнитных переходных процессов в сетях с однофазными силовыми трансформаторами / В.В. Кузнецов, А.Р. Калядин, Д.Б. Антонов, А.Н. Низовой [Электронный ресурс]. URL: <http://www.v-itc.ru/electrotech/2008/03/pdf/2008-03-02.pdf>. (дата обращения: 08.01.2025).

23. Осинцев А.А. Разработка методов и средств повышения устойчивости функционирования дифференциальной защиты генератора: дис. канд. техн. наук: 05.14.02. Новосибирск, 2013. 182 с.

24. Подгорный Э.В., Ульяницкий Е.М. Сравнение принципов отстройки дифференциальных реле от токов включения силовых трансформаторов // Электричество. 1969. № 10. С. 26–32.

25. Подгорный Э.В., Люткевич В.И. Исследование работы дифференциальных реле с быстронасыщающимися трансформаторами при повреждении в зоне защиты / Изв. вузов СССР. Энергетика.: 1968. № 1. С.1–6.

26. Романов Д.П. Методы защиты трансформаторов тока от перегрузок и коротких замыканий // Электротехнические системы. 2022. № 9. С. 15–21.

27. Сергеева О.Л. Оценка надежности измерительных трансформаторов тока при аварийных режимах // Электрические системы. 2020. Т. 10, № 1. С. 88–95.

28. Соловьев Н.П. Особенности работы трансформаторов тока при коротком замыкании // Научные исследования в электротехнике. 2020. Т. 15, № 4. С. 76–82.

29. Способ отстройки дифференциально-фазной защиты трансформатора от броска тока намагничивания [Электронный ресурс]. URL: <http://silovoytransformator.ru/stati/otstroyki-namagnichivaniya.htm>. (дата

обращения: 09.11.2024).

30. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.

31. Harish Balaga. Numerical Differential Protection of Power Transformer using ANN as a Pattern Classifier [Электронный ресурс] / Harish Balaga, D. N. Vishwakarma, Amrita Sinha. URL: https://www.researchgate.net/publication/279315305_Numerical_DifferentialProtection_of_Power_Transformer_using_ANN_as_a_Pattern_Classifier. (дата обращения: 09.11.2024).

32. Kojovic L.A. Advanced protective relaying based on Rogowski coil current sensors // IET 9th International conference on developments in power system protection: Conference publications. Glasgow, UK, 2008 P.168–173.

33. Mlejnek P. System for measurement and testing of contactless current sensors [Электронный ресурс]. URL: <https://sgs.cvut.cz/workshopy/ws2008.pdf>. (дата обращения: 09.11.2024).

34. SIPROTEC. Дифференциальная защита 7UT612. Версия 4.0. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: http://w5.siemens.com/web/ua/ru/em/Automation,_control_and_protection/Relay_Protection/Differential_protection_of_transformers/Documents/file_8_1.pdf (дата обращения: 09.11.2024).

35. Sonnemann W.K. Magnetizing inrush phenomena in transformer banks // Power Apparatus and Systems. 1958. № 38. P. 884–892.