

На правах рукописи

Бабичев Александр Сергеевич

**СИСТЕМА СЕЛЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД БЛОЧНОЙ
ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новочеркасск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции и электроэнергетические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Научный руководитель **Кужеков Станислав Лукьянович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты **Савельев Виталий Андреевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Арцишевский Ян Леонардович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры релейной защиты и автоматизации энергосистем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

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

Защита состоится « 30 » июня 2021 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: 428034, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус № 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан « 14 » мая 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.02
к.т.н., доцент

Серебрянников
Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Электрооборудование (ЭО) собственных нужд напряжением 6 кВ тепловых электростанций (ТЭС) эксплуатируется в условиях повышенной температуры, влажности и вибрации, что приводит к его повреждениям. Наиболее характерными повреждениями ЭО собственных нужд ТЭС являются: повреждения изоляции кабелей, обмоток и коробок выводов электродвигателей (ЭД), обмоток трансформаторов; повреждения выводных устройств; повреждения короткозамкнутых обмоток роторов ЭД; повреждения изоляторов. Электрическая изоляция является одним из основных элементов электрооборудования.

Надежность работы ЭО собственных нужд в значительной мере влияет на функционирование основного энергетического оборудования – парогенераторов, паровых и газовых турбин, а также генераторов и силовых трансформаторов. Внезапный отказ ЭО ответственных механизмов, например, по причине перехода однофазного простого замыкания на землю в двухфазное короткое замыкание, может привести к нарушению функционирования энергоблоков ТЭС со значительным экономическим ущербом.

Выявление быстроразвивающихся дефектов может быть достигнуто путём создания средств непрерывного контроля состояния ЭО или с малыми периодами между измерениями. Применение указанных средств в перспективе позволит осуществить переход от планового технического обслуживания ЭО к обслуживанию его по состоянию.

Важным диагностическим параметром непрерывного контроля состояния ЭО является сопротивление изоляции. Известно применение систем непрерывного общего контроля изоляции ЭО, наиболее очевидным недостатком которых является невозможность выявить поврежденное присоединение. Для присоединений секции шин собственных нужд, которых может быть более десятка, целесообразно использовать систему непрерывного селективного контроля изоляции, информирующую о состоянии изоляции каждого присоединения.

Отмеченное выше объясняет актуальность исследований по теме данной диссертационной работы, посвященной вопросу непрерывного селективного контроля изоляции ЭО собственных нужд напряжением 6 кВ, соответствующей приоритетным направлениям развития науки.

Степень разработанности темы исследования. Контроль состояния изоляции ЭО под рабочим напряжением посвящены труды Ю.П. Аксенова, Я.Л. Арцишевского, А.Е. Богаченко, Р.А. Вайнштейна, В.П. Вдовико, А.С. Дордия, А.В. Доронина, А.С. Засыпкина, Е.А. Иванова, Е.Д. Коберника, Г.С. Кучинского, В.И. Лачина, С.Н. Пашковского, В.А. Русова, В.А. Савельева, П.М. Сви, А.П. Синегубова, И.М. Сироты, К.Ю. Соломенцева, А.П. Шаповала и др., а также зарубежных фирм «ABB», «Siemens» и др. Непосредственный контроль сопротивления изоляции ЭО ТЭС под рабочим напряжением осуществляется методом наложенного тока, который чаще всего применяется в системах общего контроля сопротивления изоляции. Селективный контроль сопротивления изоляции ЭО собственных нужд ТЭС методом наложенного тока не получил широкого распространения по причине сложности выделения малой активной составляющей наложенного тока на фоне помех и низкой чувствительности существующих технических решений.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы является разработка системы непрерывного селективного контроля сопротивления изоляции ЭО собственных нужд напряжением 6 кВ блочных тепловых электростанций, обеспечивающей выявление развившихся дефектов в изоляции.

В диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ существующих методов и устройств селективного контроля состояния изоляции присоединений собственных нужд.
2. Разработка математической модели электрической сети собственных нужд тепловой электростанции с элементами систем общего и селективного контроля изоляции присоединений, основанных на методе наложенного переменного тока.
3. Исследование точности преобразователя тока нулевой последовательности (ПТНП), а также точности и чувствительности устройства контроля изоляции присоединения (УКИП) на математической модели и выявление способов их повышения.
4. Разработка подсистемы наложенного переменного тока, устанавливаемой в ячейке комплектного распределительного устройства (КРУ) дополнительного трансформатора напряжения (ТН2).
5. Разработка алгоритма функционирования УКИП, обеспечивающего требуемую чувствительность системы селективного контроля изоляции.
6. Разработка и исследование экспериментального образца ПТНП, проведение испытаний указанного образца и разработанной математической модели алгоритма функционирования УКИП на лабораторной установке.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Значение частоты наложенного тока, используемого в системе селективного контроля изоляции присоединений собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС.
2. Подсистема наложенного тока, включающая в себя источник наложенного напряжения (ИНН), формирующий на выходе разнополярные импульсы наложенного тока, индуктивный фильтр присоединения, выполненный в виде дросселя с ограничителем перенапряжений, элемент защиты и трансформатор напряжения, обмотки низшего напряжения которого соединены в разомкнутый треугольник.
3. ПТНП, устанавливаемый в кабельном отсеке ячейки КРУ электрооборудования, включающий в себя специальный трансформатор тока нулевой последовательности (СТТНП), выполненный в виде трансформатора тока нулевой последовательности с одной вторичной обмоткой и тороидальным магнитопроводом из нанокристаллического материала, элемент защиты от перенапряжений и преобразователь «ток-ток», передающий в УКИП сигналы тока из присоединения.
4. Алгоритм функционирования высокочувствительного УКИП, обеспечивающий требуемую чувствительность к снижению сопротивления изоляции присоединения собственных нужд ТЭС.

Научная новизна работы

1. Доказано, что селективный контроль изоляции электрооборудования собственных нужд напряжением выше 1 кВ с использованием метода наложенного переменного тока, ранее не применявшийся в системе собственных нужд блочных ТЭС, позволяет выявить присоединение с предаварийным состоянием изоляции и исключить его внезапный отказ.
2. Доказана техническая целесообразность применения наложенного тока частотой 12,5 Гц в системе селективного контроля изоляции присоединений собствен-

ных нужд напряжением 6 кВ блочных ТЭС, что позволяет повысить точность и чувствительность указанной системы к активной составляющей наложенного тока.

3. Разработан специальный трансформатор тока нулевой последовательности, магнитопровод которого выполнен из нанокристаллического магнитомягкого материала с высокой магнитной проницаемостью, отличающийся от известных обеспечением точной трансформации наложенного тока, в том числе, при наличии остаточной магнитной индукции в магнитопроводе, что позволило отказаться от использования безгистерезисного намагничивания и накачки магнитной индукции.

4. Предложен алгоритм функционирования высокочувствительного устройства контроля изоляции присоединения с преобразователем «ток-ток» и элементом защиты входа от перенапряжений, заключающийся в вычислении активного сопротивления изоляции контролируемого присоединения путём выделения ортогональных составляющих наложенного тока и напряжения, формирования усредненного комплекса полного сопротивления изоляции с учетом отстройки от помех, отличающийся от известных компенсацией угловой погрешности преобразователя тока нулевой последовательности, что позволяет обеспечить требуемую чувствительность системы селективного контроля изоляции к снижению сопротивления изоляции присоединений собственных нужд ТЭС.

Соответствие паспорту специальности. Согласно формуле специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы, данная диссертация посвящена вопросам «развития и совершенствования теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в необходимом для потребителей количестве и требуемого качества». Научные положения, отраженные в диссертации, соответствуют областям исследования специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:

- пункту 5 «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» соответствует положенный в основу разработанной системы непрерывного селективного контроля изоляции метод селективного контроля активного сопротивления изоляции, заключающийся в измерении под рабочим напряжением активного сопротивления изоляции каждого из присоединений распределительного устройства собственных нужд напряжением выше 1 кВ с использованием приложенного к шинам распределительного устройства наложенного напряжения частотой 12,5 Гц. Указанный метод по ГОСТ 20911-89 входит в первую задачу технической диагностики – контроль состояния оборудования – и позволяет определить вид технического состояния: работоспособное или неработоспособное;

- пункту 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» соответствует предложенный метод оценки влияния остаточной магнитной индукции на точность трансформации СТТНП, в котором используется физическое моделирование работы СТТНП, заключающийся в сравнении полных погрешностей трансформации наложенного тока СТТНП с остаточной магнитной индукцией в магнитопроводе и размагниченного СТТНП при одинаковых напряженностях магнитного поля, не превышающих коэрцитивной силы;

- пункту 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствует метод комплексного имитационного моделирования электрической сети с электроприемниками собственных нужд напряжением выше 1 кВ тепловой электростанции и оборудования системы непрерывного селективного кон-

троля изоляции, позволивший обосновать возможность использования метода селективного контроля активного сопротивления изоляции указанных электроприемников под рабочим напряжением с помощью наложенного напряжения частотой 12,5 Гц.

Теоретическая значимость работы обусловлена тем, что содержащиеся в ней результаты теоретических исследований могут быть положены в основу разработки системы селективного контроля изоляции присоединений собственных нужд, основанной на методе наложенного переменного тока. В частности, могут использоваться следующие результаты, полученные автором.

1. Разработанные схемы замещения и расчетные выражения позволяют определить токи в элементах системы контроля изоляции, а также целесообразное значение частоты наложенного напряжения.

2. Предложена методика расчета ПТНП, позволяющая, при необходимости, произвести перерасчет его при других параметрах электрической сети собственных нужд и контролируемых присоединений.

3. Предложен метод оценки влияния остаточной магнитной индукции на точность трансформации СТТНП.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработанная система непрерывного селективного контроля изоляции ЭО собственных нужд позволяет снизить ущерб за счёт предотвращения внезапных отказов ответственного ЭО и обусловленных этим нарушений нормального функционирования основного энергетического оборудования ТЭС.

2. Разработанная подсистема наложенного тока, обеспечивая требуемый по условиям чувствительности системы селективного контроля изоляции уровень наложенного напряжения на шинах секции собственных нужд, может быть размещена в ячейке комплектного распределительного устройства трансформатора напряжения. На указанную разработку получен патент на полезную модель.

3. Использование предложенного алгоритма функционирования УКИП позволяет обеспечить требуемую чувствительность УКИП к снижению сопротивления изоляции присоединения.

4. Разработанная лабораторная установка позволяет испытать ПТНП с токами, адекватными токам в присоединениях собственных нужд напряжением 6 кВ блочной ТЭС.

Результаты исследований использованы в разработках ООО НПФ «Квазар» для филиала ПАО «ОГК-2» – Новочеркасская ГРЭС и в учебном процессе кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании использовались методы теории электрических цепей, теории подобия, математического анализа, численного эксперимента, имитационного моделирования с применением пакетов прикладных программ *Micro-Cap*, *Mathcad*, *Matlab/Simulink* и *PSCAD*.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математических моделей и методов, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Полученные в работе основные научные положения и выводы имеют необходимое научное обоснование. Использованные в диссертации допущения не противоречат физике рассматриваемых процессов.

Апробация результатов работы. Основные результаты научных исследований докладывались и обсуждались: на региональной научно-технической конферен-

ции «Студенческая научная весна», Новочеркасск, 2018, 2019 гг.; на научном семинаре «Кибернетика энергетических систем», Новочеркасск, 2018, 2019 гг.; на научно-технической конференции «РЕЛАВЭКСПО-2019», Чебоксары, 2019 г.; на национальной конференции «Результаты исследований – 2019», Новочеркасск, 2019 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ (общим объемом 3,07 п.л., вклад соискателя 2,94 п.л.), в том числе, 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 97 наименований и 6 приложений. Общий объем работы составляет 206 страниц, включая 28 страниц приложений и 63 иллюстрации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлена общая характеристика работы.

В первой главе обоснована целесообразность применения системы непрерывного селективного контроля состояния ответственного ЭО собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС. Ущерб снижается за счёт предотвращения внезапных отказов указанного ЭО и обусловленных ими нарушений нормального функционирования основного энергетического оборудования ТЭС, а также за счёт снижения затрат на ремонт ЭО. Это объясняет целесообразность создания и внедрения системы непрерывного селективного контроля состояния ЭО. Однако создание такой системы связано с большими организационными и техническими трудностями и требует больших затрат. В диссертации решена часть указанной задачи, а именно – проведение непрерывного селективного контроля состояния изоляции присоединений собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС. Это объясняется тем, что основным видом неисправностей ЭО являются электрические повреждения, так или иначе связанные с нарушением изоляции.

В настоящее время основой профилактики изоляции ЭО на ТЭС является периодический селективный контроль сопротивления изоляции мегаомметром, проводимый персоналом электростанции по регламенту. Указанный вид контроля позволяет распознать, главным образом, медленно развивающиеся дефекты, не гарантируя своевременного выявления развития дефектов до недопустимой стадии.

Рассмотрены методы непрерывного селективного контроля состояния изоляции, к которым относятся метод частичных разрядов, а также методы наложенного постоянного и переменного тока. Метод частичных разрядов потенциально позволяет селективно выявить дефекты в изоляции на начальной стадии развития. Однако в настоящее время при использовании этого метода требуется совершенствование измерительных устройств и методов интерпретации полученных результатов. Метод наложенного постоянного тока может быть эффективным для общего контроля изоляции электрооборудования. В этом случае разрешающая способность по сопротивлению может составлять до 100 МОм. При осуществлении селективного контроля изоляции присоединений необходимо применение сложных и дорогостоящих преобразователей тока утечки, основанных на безгистерезисном намагничивании и накачке магнитной индукции. Кроме того, к нейтрали основного трансформатора напряжения необходимо подключить дополнительное высоковольтное оборудование. При реализации метода наложенного переменного тока для селективного контроля изоляции присоединений необходимо на фоне емкостных составляющих

наложенного тока и тока нулевой последовательности промышленной частоты распознать с достаточной точностью малую активную составляющую наложенного тока. На присоединении устанавливаются ПТНП, построенные на принципе обычных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП), а к секции шин собственных нужд подключается дополнительный ТН.

Сравнительный анализ методов наложенного тока по предложенным критериям безопасности обслуживания, стоимости реализации и чувствительности показал, что метод наложенного переменного тока является наиболее целесообразным для применения в составе системы автоматизированного селективного контроля изоляции присоединений собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС.

Во второй главе произведен выбор параметров системы селективного контроля изоляции присоединений, основанной на методе наложенного переменного тока.

Анализ функциональных схем системы селективного контроля изоляции присоединений показал, что наиболее целесообразным является построение функциональной схемы с индивидуальными малогабаритными микропроцессорными УКИП (рисунок 1). Индивидуальные УКИП1 – УКИП N устанавливаются в релейных отсеках ячеек КРУ ЭО1 – ЭО N . УКИП1 – УКИП N получают сигналы напряжения от основного трансформатора напряжения (ТН1) и сигналы тока от ПТНП1 – ПТНП N , установленных в кабельных отсеках указанных ячеек КРУ на кабельных линиях КЛ1 – КЛ N . Связь между УКИП и ПТНП осуществляется с помощью экранированного кабеля, длина которого не превышает 2,5 м.

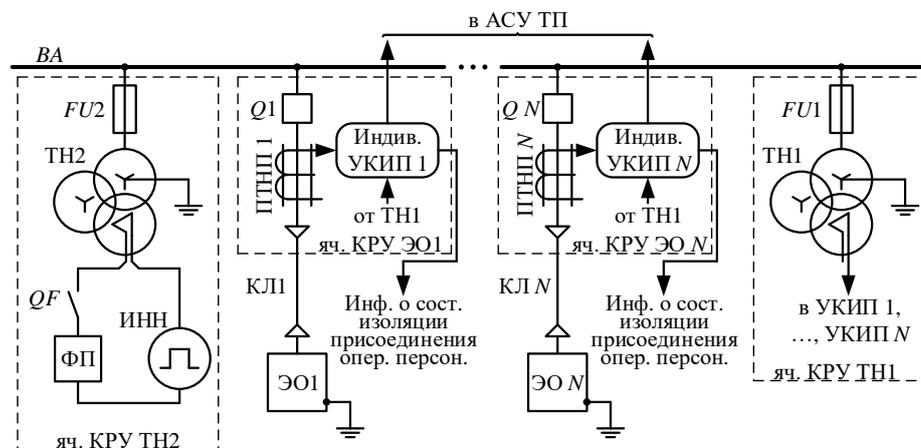


Рисунок 1 – Функциональная схема системы селективного контроля изоляции присоединений собственных нужд ТЭС с индивидуальными УКИП

К секции шин BA , с которой соединены электрооборудование ЭО1 – ЭО N , подключены трансформаторы напряжения ТН1 и ТН2. К обмотке низшего напряжения ТН2, соединенной в разомкнутый треугольник, подключены ИНН, фильтр присоединения (ФП) и автоматический выключатель QF . ИНН формирует прямоуголь-

ные импульсы наложенного напряжения обеих полярностей частотой, отличной от промышленной частоты. Указанное напряжение повышается трансформатором напряжения ТН2 и накладывается на оборудование, подключенное к секции шин BA . Фильтр присоединения ФП ограничивает ток промышленной частоты в цепи ИНН в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в электрической сети напряжением 6 кВ, а автоматический выключатель QF разрывает цепь этого тока.

Устройство контроля изоляции присоединения УКИП осуществляет фильтрацию наложенного тока и напряжения, вычисляет текущее активное сопротивление изоляции и сравнивает его с уставкой. При превышении уровня уставки УКИП выдает соответствующую информацию на дисплей, в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) и на блочный щит управления ТЭС.

Предложены критерии, по которым с помощью компьютерного и аналитического моделирования проведен выбор технически целесообразного значения частоты наложенного тока для элементов системы селективного контроля изоляции. Общими для всех элементов систем селективного контроля изоляции являются частоты наложенного тока 12,5 Гц, 16,(6) Гц и 25 Гц. Из этого ряда следует исключить сигналы частотой 16,(6) Гц, которые сложны для обработки в УКИП. Предложено выражение, позволяющее определить относительную погрешность измерения сопротивления изоляции с учетом погрешности ТН1, ПТНП и относительной погрешности измерения УКИП. Указанное выражение имеет следующий вид

$$\delta_{\text{ут}} = \left[\delta_{f.\text{ТН}}^2 + \delta_{f.\text{ПТНП}}^2 + \delta_{\text{УКИП}}^2 + \arctg^2(2\pi f_{\text{ИНН}} R_{\text{ут}} C_{\Sigma\text{ЭО}}) \cdot (2\pi f_{\text{ИНН}} R_{\text{ут}} C_{\Sigma\text{ЭО}} \delta_{\varphi})^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\delta_{f.\text{ТН}}$ – погрешность напряжения ТН1; $\delta_{f.\text{ПТНП}}$ – токовая погрешность ПТНП; $\delta_{\text{УКИП}}$ – относительная погрешность работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в токовом канале УКИП, определяемая как отношение погрешности квантования к активной составляющей наложенного тока; $f_{\text{ИНН}}$ – частота наложенного тока; $R_{\text{ут}}$ – активное сопротивление утечки изоляции контролируемого ЭО1; $C_{\Sigma\text{ЭО}}$ – суммарная емкость трех фаз контролируемого присоединения с ЭО1; δ_{φ} – относительная погрешность измерения угла между наложенным напряжением и наложенным током с помощью ТН1 и ПТНП, определяемая как разность между угловой погрешностью ПТНП и ТН1, отнесенная к углу $\varphi_{\text{из}}$ равному $\arctg(2\pi f_{\text{ИНН}} R_{\text{ут}} C_{\Sigma\text{ЭО}})$.

В рассматриваемых условиях для присоединения с суммарной емкостью трех фаз от 41,053 нФ до 1,745 мкФ и сопротивлением изоляции 1 МОм погрешность $\delta_{\text{ут}}$, определенная по выражению (1), на частоте наложенного сигнала 25 Гц примерно в 1,25 раза больше погрешности $\delta_{\text{ут}}$ на частоте наложенного сигнала 12,5 Гц. С учетом изложенного технически целесообразно использовать наложенный ток с частотой 12,5 Гц для селективного контроля изоляции присоединений собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС.

По сигналам тока и напряжения, передаваемым в УКИП, получено аналитическое выражение для расчета сопротивления изоляции контролируемого присоединения с ЭО

$$R_{\text{ут}} = \frac{U'_{\text{ш.нал}} k_{\text{ТН1}}}{I'_{\text{нал}} k_{\text{ПТНП}} \cos(\varphi_i - \varphi_u)}, \quad (2)$$

где $U'_{\text{ш.нал}}$ – 1/3 наложенного напряжения на выводах вторичной обмотки ТН1, соединенной в разомкнутый треугольник; $k_{\text{ТН1}}$ – коэффициент трансформации ТН1; $I'_{\text{нал}}$ – наложенный ток во вторичной цепи ПТНП; $k_{\text{ПТНП}}$ – коэффициент трансформации ПТНП; φ_i , φ_u – начальные фазы векторов наложенного тока и напряжения.

Погрешность вычисления $R_{\text{ут}}$ по выражению (2) для присоединения с суммарной емкостью трех фаз от 41,053 нФ до 1,745 мкФ в случае снижения сопротивления изоляции одной фазы ЭО1 с 1 МОм до 50 кОм составит менее 0,2 %. Несимметрия фазных напряжений, вызванная увеличением емкости в цепи ЭО1, увеличивает емкостный ток, но не влияет на активную составляющую наложенного тока в цепи этого присоединения.

Рассмотрены упрощенные схемы замещения подсистемы наложенного тока, подключенной к электрической сети собственных нужд, позволяющие без использова-

ния специального программного обеспечения определить токи в цепи ИНН. По упрощенным схемам замещения при ОЗЗ погрешность вычисления тока промышленной частоты в цепи ИНН составляет 0,12 %, а погрешность вычисления наложенного тока в цепи ИНН составляет 0,01 %. При нормальном режиме работы электрической сети собственных нужд с суммарной емкостью трех фаз от 3,91 до 13,127 мкФ погрешность вычисления наложенного тока в цепи ИНН не превысит 4 %, а при снижении сопротивления изоляции одной фазы с 1 МОм до 50 кОм погрешность не превысит 3,7 %. Погрешность вычисления наложенного тока, определенного с применением метода узловых потенциалов, в цепи ИНН полной схемы замещения, соответствующей схеме имитационной модели в программном комплексе *Matlab/Simulink*, при снижении сопротивления изоляции одной фазы ЭО1 с 1 МОм до 50 кОм в электрической сети с суммарной емкостью трех фаз от 3,91 до 13,127 мкФ не превысит 0,008 %.

В третьей главе проведена разработка системы селективного контроля изоляции присоединений, основанной на методе наложенного переменного тока.

Основным оборудованием подсистемы наложенного тока являются ИНН с элементом токовой защиты, ФП и ТН2. В электрической сети собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС наиболее распространены ТН серии НТМИ-6, которые устанавливаются в ячейках КРУ. Зачастую в помещении с ячейками КРУ нет возможности установки дополнительного шкафа, поэтому оборудование подсистемы наложенного тока целесообразно расположить в той же ячейке КРУ, в которой расположен ТН2. Анализ применяемых подсистем наложенного переменного тока с полосовым ФП показал, что существующие технические решения либо имеют значительные габариты и не могут быть установлены в ячейке КРУ, либо не обеспечивают требуемый по условиям чувствительности УКИП уровень наложенного напряжения на шинах секции собственных нужд.

В таблице 1 приведено сравнение резистивного и индуктивного ФП без учета активного сопротивления обмотки дросселя. Указанные ФП ограничивают ток в цепи ИНН в момент ОЗЗ в электрической сети собственных нужд до предельно-допустимого тока ТН2 серии НТМИ-6 и не зависят от емкости электрической сети собственных нужд.

Таблица 1 – Сравнение резистивного и индуктивного ФП без учета активного сопротивления обмотки дросселя

Тип ФП	Параметр ФП	Потеря мощности в нормальном режиме	Отношение потери мощности к полной мощности ИНН, %	Потеря мощности на частоте 50 Гц при ОЗЗ
Резистивный	7,845 Ом	27,04 Вт	81,9	948,61 Вт
Индуктивный	27,7 мГн	7,502 ВАр	151,3	1 046,064 ВАр

Применение резистивного ФП требует увеличения мощности ИНН и особых мер по отводу тепловой энергии. Индуктивный ФП имеет меньшее тепловыделение, а также позволяет сгладить форму кривой наложенного сигнала. В рассматриваемых условиях на наложенном сигнале потеря мощности в индуктивном ФП в 1,513 раза больше выходной мощности ИНН. В этом случае индуктивный ФП не только защищает ИНН и обмотки ТН2 от токов промышленной частоты, но и позволяет снизить ИНН выходную мощность, повысив экономичность.

Емкость электрической сети собственных нужд на наложенной частоте компенсируется индуктивностью дросселя (рисунок 3), в результате чего наложенное

напряжение 3, прикладываемое к обмотке ТН2, соединенной в разомкнутый треугольник, в 1,98 раза больше выходного напряжения ИИН $U_{\text{ИИН}}$. Напряжение 2 характеризует разность модулей указанных напряжений. В случае ухудшения состояния изоляции эта компенсация несколько нарушится, так как угол между выходным наложенным током ИИН $I'_{\text{ИИН}}$ и напряжением $U_{\text{ИИН}}$ изменится, причем при больших сопротивлениях изоляции это изменение менее значительное.

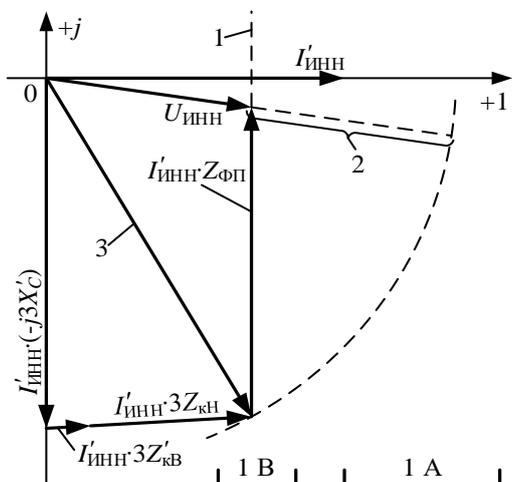


Рисунок 3 – Векторная диаграмма токов и напряжений подсистемы наложенного тока с индуктивным ФП при нормальном режиме работы электросети

сопротивления приведены к стороне низшего напряжения обмотки ТН2, соединенной в разомкнутый треугольник.

Емкость электрической сети может быть полностью скомпенсирована индуктивностью дросселя, что приведет к большему снижению ИИН выходной мощности и экономии электрической энергии. В общем случае, если $6X'_C > 2\pi f_{\text{ИИН}} L_{\text{др}}$, где $L_{\text{др}}$ – индуктивность дросселя, и суммарная емкость трех фаз электрической сети собственных нужд находится в диапазоне от 3,91 до 13,127 мкФ, то, без учета $R_{\text{др}}$ и при поддержании в электрической сети требуемого уровня наложенного напряжения, выходное напряжение ИИН $U_{\text{ИИН}}$ будет меньше напряжения 3, прикладываемого к обмотке ТН2, соединенной в разомкнутый треугольник. То есть мощность ИИН с индуктивным ФП не превысит мощности ИИН без ФП.

С увеличением индуктивности дросселя снижается уровень тока в его цепи при ОЗЗ в электрической сети собственных нужд, уменьшается объем магнитопровода и масса дросселя, но при этом увеличивается число витков обмотки и активное сопротивление дросселя. С учетом перечисленных параметров даны рекомендации по выбору индуктивного ФП с броневым ленточным магнитопроводом типа ШЛ.

На рисунке 4 показана схема подсистемы наложенного тока, в состав которой входит ИИН, представляющий собой статический генератор переменного тока, последовательно с ним соединены дроссель LR , автоматический выключатель QF с максимальным расцепителем тока SQF и серийно выпускаемый трансформатор напряжения ТН2, обмотки низшего напряжения которого соединены в разомкнутый треугольник. Дроссель LR и включенный параллельно ему ограничитель перенапряжений FV в совокупности образуют фильтр присоединения ФП.

Траектория движения 1 конца вектора напряжения $U_{\text{ИИН}}$ показана при изменении индуктивности дросселя и при условии поддержания в электрической сети требуемого уровня наложенного напряжения, то есть при неизменном уровне тока $I'_{\text{ИИН}}$.

Векторная диаграмма на рисунке 3 построена по одной из упрощенных схем замещения и без учета активного сопротивления обмотки дросселя $R_{\text{др}}$ в сопротивлении индуктивного ФП $Z_{\text{ФП}}$. На векторной диаграмме также показаны утроенные сопротивления короткого замыкания ТН2 $3Z'_{\text{кв}}$, $3Z'_{\text{кн}}$ и утроенное емкостное сопротивление фазы на землю всей секции шин собственных нужд $3X'_C$. Указанные

Трансформатор

напряжения ТН2 устанавливается на выкатной тележке ячейки КРУ, а ИНН, ФП и автоматический выключатель QF с максимальным расцепителем тока SQF устанавливаются в релейном отсеке ячейки КРУ этого ТН2. Выводами подсистемы

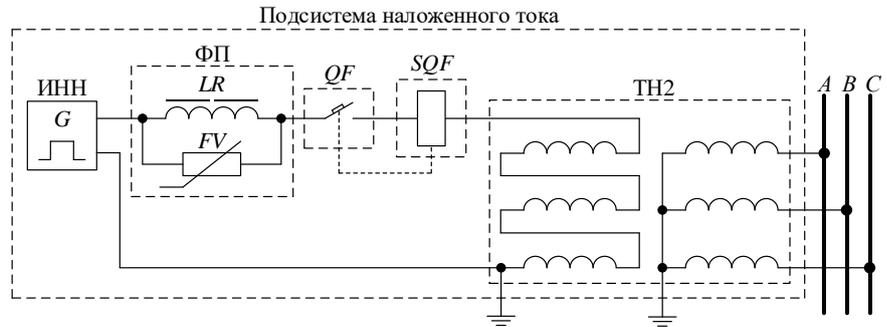


Рисунок 4 – Подсистема наложенного тока с индуктивным фильтром присоединения

наложенного тока являются зажимы обмотки высшего напряжения ТН2, соединенной в звезду с заземленной нейтралью. Подсистема наложенного тока подключается к шинам A, B, C питания собственных нужд напряжением 6 кВ и выдает наложенный ток в электрическую сеть с контролируемым электрооборудованием.

С использованием имитационной модели в программном комплексе *Matlab/Simulink* проведена оценка влияния материала магнитопровода на точность и чувствительность УКИП. В качестве условия чувствительности устройства контроля изоляции присоединения принято неравенство:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{из}} \geq 10 \cdot \operatorname{tg} \delta_{\text{ПТНП}}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \delta_{\text{из}}$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции контролируемого присоединения; $\operatorname{tg} \delta_{\text{ПТНП}}$ – тангенс угловой погрешности ПТНП.

В таблице 2 приведены технические данные стандартного ТТНП серии ТЗЛМ, магнитопровод которого изготовлен из электротехнической стали марки 3411, а также выполненных в его габаритах с таким же количеством витков вторичной обмотки преобразователей тока с различными магнитопроводами. Результаты расчетов показывают, что сочетание предложенных мер позволит обеспечить селективный контроль сопротивления изоляции присоединения с ЭО1 на уровне около 300 кОм. Нетрудно показать, что увеличение сечения магнитопровода ПТНП в два раза или числа витков вторичной обмотки в 1,4 раза позволит понизить угловую погрешность ПТНП $\delta_{\text{ПТНП}}$ при использовании магнитопровода из нанокристаллического сплава до 0,711 град. При этом возможен селективный контроль сопротивления изоляции присоединения собственных нужд ТЭС на уровне 500 кОм.

Таблица 2 – Технические данные стандартного ТТНП серии ТЗЛМ

Материал	Угловая погрешность ПТНП $\delta_{\text{ПТНП}}$, град	Ток частотой 50 Гц $I_{\text{ут.50}}$ в месте дефекта изоляции, мА	Уровень $R_{\text{ут}}$ при выполнении условия (3), кОм
Сталь 3411, листовая шихтованная	56,738	811,31	4,069
Сталь 3411 ленточная	47,567	599,25	5,671
Феррит 2000 НН	27,623	297,34	11,854
Пермаллой 79 МН ленточный	3,807	38,848	93,229
Нанокристаллический магнитомягкий сплав АМАГ-200С	1,232	12,593	288,336

Задавшись числом витков вторичной обмотки w_2 в количестве 40 вит, сопротивлением вторичной цепи R_2 (определенным в режиме короткого замыкания), габаритами магнитопровода и параметрами нанокристаллического магнитомягкого материала АМАГ-200С с высокой магнитной проницаемостью, аналитически опреде-

лено, что требуемая угловая погрешность ПТНП достигается при использовании магнитопровода с площадью поперечного сечения 4 см^2 и более.

Специальный трансформатор тока нулевой последовательности в ПТНП должен работать в режиме, близком к режиму короткого замыкания. Поэтому преобразователь выходного сигнала (ПВС) СТТНП должен иметь нулевое входное сопротивление. Одной из таких схем, имеющих нулевое входное сопротивление, является схема источника напряжения, управляемого током на операционном усилителе (ОУ) DA1 (рисунок 5).

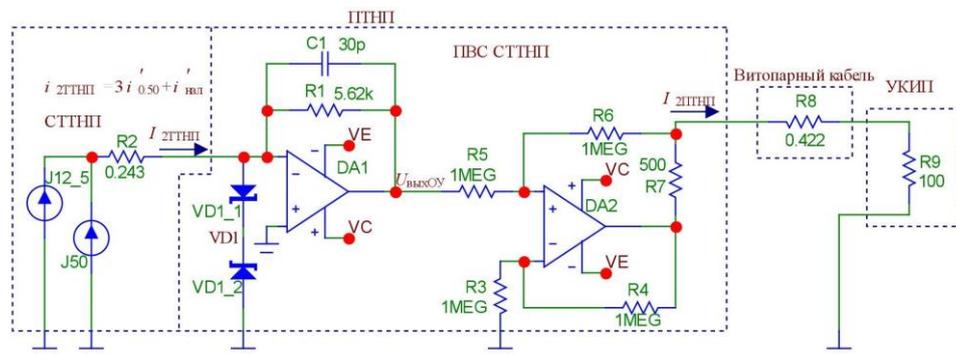


Рисунок 5 – Принципиальная схема преобразователя выходного сигнала СТТНП в ПТНП

Анализ функциональных схем системы селективного контроля изоляции присоединений, основанной на методе наложенного переменного тока, показал, что для принятой схемы (рисунок 1) целесообразно передавать от ПТНП в

УКИП аналоговый токовый сигнал. Для этого к выходу источника напряжения на ОУ DA1 в ПТНП подключен управляемый напряжением источник тока на ОУ DA2 с заземленной нагрузкой (рисунок 5). Диапазон стандартного токового интерфейса выбран в качестве ориентира для диапазона амплитуд выходного сигнала, причем верхняя граница диапазона может быть ограничена выходным током ОУ DA2, а нижняя граница диапазона может быть ограничена чувствительностью УКИП. С учетом всех коэффициентов преобразования определено, что вторичный ток ПТНП $I_{2\text{ПТНП}}$, проходящий по токовому шунту R_9 в УКИП, в 11,246 раз превышает вторичный ток СТТНП $I_{2\text{ТТНП}}$, а с учетом числа витков w_2 коэффициент трансформации ПТНП $k_{\text{ПТНП}}$ равен 3,557 о.е.

Устройство контроля изоляции присоединения является микропроцессорным устройством, на точность и чувствительность которого влияют АЦП и полосовой фильтр (ПФ). На работу УКИП также влияет алгоритм функционирования.

Для контроля сопротивления изоляции 500 кОм и более достаточно, чтобы ПФ обеспечивал затухание на частоте 50 Гц α_{50} равное 40 дБ. Добиться такого затухания на частоте 50 Гц при наложенном токе частотой 12,5 Гц позволяет ПФ Бесселя 4-го порядка. Указанный фильтр состоит из двух последовательно соединенных ПФ 2-го порядка с многопетлевой обратной связью, имеющих небольшой сдвиг частотных характеристик.

Расчет номиналов резисторов и конденсаторов ПФ произведен с применением программы *Texas Instruments Filter Design Tool* для ряда E192. С помощью программы *Micro-Cap 9* получены характеристики и уточнены параметры ПФ УКИП: центральная частота 12,5 Гц; ширина полосы пропускания 3 Гц; коэффициент усиления 1,015 о.е.; затухание на частоте 50 Гц порядка 43,59 дБ.

Математическое моделирование работы АЦП проведено в программе *Mathcad*. Токи присоединения, полученные в программном комплексе *Matlab/Simulink*, преобразованы в исходный сигнал $s_H(n \cdot T_s)$ с теми же коэффициентами, которые используются в ПТНП и аналоговом токовом входе УКИП. В сигнале

$s_{и}(n \cdot T_s)$ учтено значение начальной фазы сигнала частотой 50 Гц φ_{i50} , которое изменяется при моделировании в диапазоне от 0 до 360 град. Из заданного разрешения АЦП вычитаются два младших бита, значения которых могут быть искажены шумом собственных микроселекционных компонентов УКИП. Квантование сигнала $s_{и}(n \cdot T_s, \varphi_{i50})$ произведено по следующему выражению

$$s_{к}(n \cdot T_s, \varphi_{i50}) = \text{round}\left(\frac{|s_{и}(n \cdot T_s, \varphi_{i50})|}{\Delta_{ш}}\right) \cdot \Delta_{ш} \cdot \text{sign}(s_{и}(n \cdot T_s, \varphi_{i50})),$$

где $s_{и}(n \cdot T_s, \varphi_{i50})$ – исходный сигнал на входе АЦП; n – номер отсчета входного сигнала; T_s – интервал дискретизации; φ_{i50} – начальная фаза сигнала частотой 50 Гц; $\Delta_{ш}$ – шаг квантования АЦП. Функция $\text{round}(x)$ округляет свой аргумент до ближайшего целого числа, а функция $\text{sign}(x)$ выдает знак своего аргумента.

Из сигнала $s_{к}(n \cdot T_s, \varphi_{i50})$ активная составляющая наложенного сигнала выделялась с помощью фильтра ортогональных составляющих (ФОС), пересчитывалась к первичной стороне ПТНП и сравнивалась с заданным значением. В результате моделирования определено, что, при применении АЦП с разрешением 16 бит и более, максимальная относительная погрешность вычисления активной составляющей наложенного тока, связанная с работой АЦП, не превысит 0,2 % для присоединения с суммарной емкостью трех фаз от 41,053 нФ до 1,745 мкФ и с сопротивлением утечки от 1 МОм до 500 кОм.

Повышение чувствительности системы селективного контроля изоляции присоединения возможно не только путём использования ПТНП с магнитопроводами, изготовленными из материалов с высокой магнитной проницаемостью, но также путем применения алгоритма функционирования УКИП, реализующего выделение ортогональных составляющих наложенного тока и напряжения, формирование усредненного комплекса полного сопротивления изоляции с учетом отстройки от помех и компенсации угловой погрешности ПТНП.

Действительная и мнимая составляющие комплексной амплитуды первой гармоники сигнала равны:

$$\text{Re}(\underline{X}(k)) = \frac{2}{N} \sum_{n=k-N+1}^k \left[x(n \cdot T_s) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right], \quad \text{Im}(\underline{X}(k)) = \frac{2}{N} \sum_{n=k-N+1}^k \left[x(n \cdot T_s) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right],$$

где $\underline{X}(k)$ – k -я комплексная амплитуда наложенного сигнала, полученная за период основной гармоники; N – число отсчетов за период основной гармоники.

Полученные ортогональные составляющие наложенных сигналов используются при вычислении измеренных комплексных сопротивлений изоляции $\underline{Z}'_{из}$. Комплекс $\underline{Z}'_{из}$ через схему нахождения средних значений (среднего арифметического) на заданном интервале подается на вход 6 схемы рисунка 6. Указанная схема состоит из элемента компенсации угловой погрешности ПТНП *MathFunc1*, элемента вычисления сопротивления изоляции *MathFunc2* и схемы алгоритма формирования выходных сигналов о недопустимом снижении сопротивления изоляции.

Измеренный комплекс полного сопротивления изоляции на входе элемента *MathFunc1*, содержащий угловую погрешность ПТНП $\delta_{ПТНП}$, связан с заданным комплексом полного сопротивления изоляции следующим образом

$$\frac{\dot{U}'_{ш.нал}}{I'_{нал} \cdot e^{j(\varphi_i + \delta_{ПТНП})}} = \underline{Z}'_{из} \cdot e^{-j\delta_{ПТНП}},$$

умножив выражение выше на $e^{j \cdot \delta_{ПТНП}}$, произведем корректировку аргумента этого комплексного числа и получим заданный комплекс полного сопротивления изоляции.

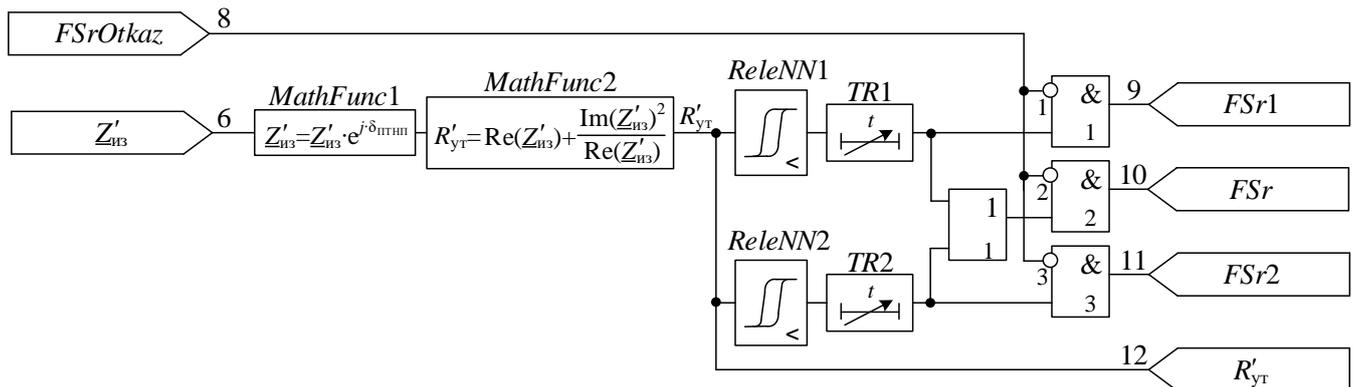


Рисунок 6 – Функциональная схема алгоритма контроля сопротивления изоляции

Результатом работы ФОС в УКИП является комплексное число в алгебраической форме записи. Преобразовав формулу (2), получим выражение для расчета сопротивления изоляции $R'_{ут}$ в алгоритме УКИП, а также получим выражение для расчета уставок реле *RelеNN1* и *RelеNN2*, с которыми сравниваются текущие значения $R'_{ут}$

$$R'_{ут} = \frac{|Z'_{из}|^2}{\text{Re}(Z'_{из})} = \text{Re}(Z'_{из}) + \frac{\text{Im}(Z'_{из})^2}{\text{Re}(Z'_{из})}, \quad R'_{ут} = R_{ут} \cdot \frac{k_{ПТНП}}{k_{ТНП}}. \quad (4)$$

Сопротивление изоляции работающего электродвигателя должно быть не ниже одного мегаома на киловольт номинального линейного напряжения. Опыт эксплуатации показал, что сопротивление изоляции ЭД собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС на уровне 500 кОм является границей недопустимого состояния. При сопротивлении изоляции ЭД напряжением 6 кВ около 1 МОм электродвигатель не проходит испытание повышенным напряжением промышленной частоты. КЛ напряжением 6 кВ с бумажной пропитанной изоляцией и с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката не проходят испытание повышенным выпрямленным напряжением при сопротивлении изоляции 100 МОм и менее. Деление сопротивлений изоляции присоединения по стадиям развития дефектов в изоляции электродвигателя приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Деление сопротивлений изоляции присоединения по стадиям развития дефектов в изоляции электродвигателя

Степени состояния изоляции ЭД	Диапазон сопротивлений изоляции присоединения	Действие персонала электростанции
Нормальное состояние изоляции	от ∞ до 6 МОм	–
Начальная степень ухудшения состояния изоляции	от 6 МОм до 1 МОм	Наблюдение за состоянием изоляции присоединения с выводом в ремонт, запланированным по графику
Развившийся дефект в изоляции	от 1 МОм до 0,5 МОм	Наблюдение за состоянием изоляции присоединения с выводом в ремонт при ближайшем отключении
Аварийное состояние изоляции	от 0,5 МОм до 0	Немедленное отключение присоединения

Из приведенных в таблице 3 данных следует, что для реле *RelеNN2* (рисунок 6) целесообразно использовать уставку, соответствующую сопротивлению изоляции $R_{ут}$ контролируемого присоединения с ЭД не ниже 500 кОм.

Для присоединения с силовым трансформатором целесообразно использовать уставку реле *ReleNN2*, соответствующую не менее 1 МОм, и контроль скорости изменения сопротивления изоляции. Это позволит определять предпробойные явления в присоединении.

В четвертой главе приведены методики и результаты испытаний системы селективного контроля изоляции присоединений. Описано внедрение результатов диссертационной работы.

По вольтамперной характеристике (ВАХ), снятой для экспериментального образца СТТП, рассчитаны магнитная индукция B_m , напряженность магнитного поля H_m и относительная магнитная проницаемость материала $\mu_{отн}$. Начальная $\mu_{отн}$ магнитопровода СТТП в два раза меньше типовой $\mu_{отн}$, но даже в этом случае она примерно в 26 раз больше, чем $\mu_{отн}$ ленточной стали 3411.

В аварийном режиме работы электрической сети собственных нужд напряжением 6 кВ в первичной цепи СТТП может протекать увеличенный ток, перемагничивающий магнитопровод СТТП по предельной петле гистерезиса. При отключении в момент перехода через ноль тока в первичной цепи СТТП, B_m в магнитопроводе СТТП снижается до уровня предельной остаточной магнитной индукции B_r и при следующем включении в ту же полуволну номинального первичного тока частный цикл петли гистерезиса СТТП формируется от B_r . Ввиду нелинейности ветвей петли гистерезиса, точность трансформации СТТП при разных частных циклах петли гистерезиса может различаться.

Одним из методов оценки влияния B_r на точность трансформации СТТП является сравнение полных погрешностей намагниченного СТТП $\varepsilon_{Br,н}$ и размагниченного СТТП $\varepsilon_{Br,р}$ при одинаковой напряженности магнитного поля H_m , не превышающей коэрцитивной силы H_c . Полная погрешность СТТП и действующее значение первичного тока СТТП определяются по формулам, соответственно

$$\varepsilon_{Br} = \frac{100}{I_{1ПТП}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (i'_{2ТТП}(n \cdot T_s) - i_{1ПТП}(n \cdot T_s))^2}, \quad I_{1ПТП} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_{1ПТП}^2(n \cdot T_s)},$$

где $i'_{2ТТП}(n \cdot T_s)$ – мгновенные значения тока во вторичной обмотке СТТП, приведенные к первичной стороне; $i_{1ПТП}(n \cdot T_s)$ – мгновенные значения тока в первичной обмотке СТТП.

Коммутирование в определенную фазу и с разной амплитудой первичного тока в процессе намагничивания СТТП проводилось с использованием разработанного устройства включения в заданную фазу (УВЗФ). На рисунке 7 показаны осциллограммы токов СТТП, полученные в результате работы УВЗФ. По мгновенным значениям токов, при которых H_m СТТП не превышает H_c , равной 7 А/м, намагниченного СТТП вычислена полная погрешность $\varepsilon_{Br,н}$.

Размагничивание СТТП производилось медленно затухающим синусоидальным первичным током, после чего уровень этого тока был плавно поднят до значения, при котором H_m СТТП не превышает H_c . По мгновенным

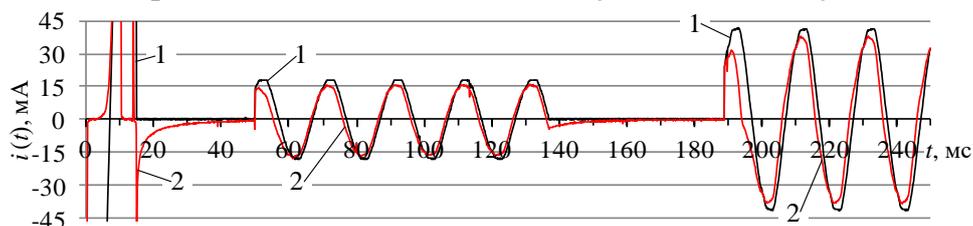


Рисунок 7 – Осциллограммы токов, снятые в процессе намагничивания СТТП: 1 – первичный ток СТТП; 2 – вторичный ток СТТП, приведенный к первичной стороне

значениям токов размагниченного СТТНП рассчитана полная погрешность $\varepsilon_{Br.p}$, значение которой в данных исследованиях составило 21,69 %. Разность погрешностей $\varepsilon_{Br.н}$ и $\varepsilon_{Br.p}$ для следующих промежутков времени составляет: с 49,9 мс по 69,8 мс – 15,058 %; с 69,9 мс по 89,8 мс – 2,988 %; с 89,9 мс по 109,8 мс – 0,745 %; с 109,9 мс по 129,8 мс – 0,581 %. Разность полных погрешностей намагниченного СТТНП $\varepsilon_{Br.н}$ и размагниченного СТТНП $\varepsilon_{Br.p}$ уменьшается в процессе перемагничивания магнитопровода и уже на третьем периоде становится меньше 0,75 %. Частный цикл с течением времени возвращается на более линейный участок петли гистерезиса СТТНП. Ввиду того, что в процессе перемагничивания магнитопровода СТТНП с наличием B_r магнитным полем с H_m , не превышающей H_c , точность трансформации СТТНП повышается, то применение специальных схем, основанных на эффектах безгистерезисного намагничивания и накачки магнитной индукции, не требуется.

Проведенные на экспериментальном образце СТТНП исследования угловой погрешности $\delta_{ПТНП}$ показали, что в диапазоне первичных токов, адекватных для присоединения с ЭД собственных нужд напряжением 6 кВ, среднее арифметическое значение угловой погрешности СТТНП составляет 1,067 град (рисунок 8). Погрешность вычисления сопротивления изоляции, связанная с такой угловой погрешностью экспериментального образца СТТНП, составит от 6,41 % до 100 % и более для присоединения с суммарной емкостью трех фаз от 41,053 нФ до 1,745 мкФ и с сопротивлением утечки 1 МОм.

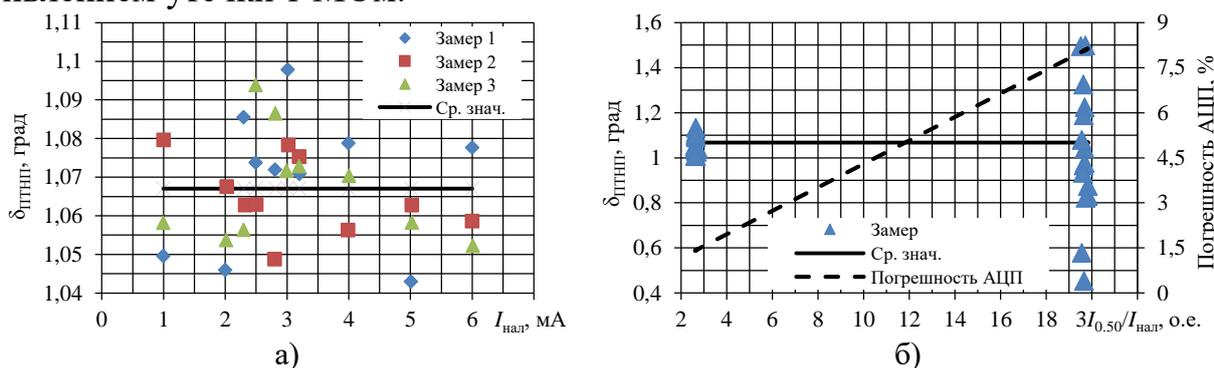


Рисунок 8 – Измеренные значения угловой погрешности СТТНП при протекании в первичной обмотке токов частотой 12,5 Гц (а) и токов частотой 50 и 12,5 Гц (б)

Увеличение разброса $\delta_{ПТНП}$ (рисунок 8, б) связано с погрешностью в работе ФОС при девиации промышленной частоты, а также связано с погрешностью цифрового осциллографа, имеющего 8-разрядное АЦП.

На входе ПВС СТТНП установлены последовательно встречно включенные диоды $VD1$ (рисунок 5), защищающие ПТНП и элементы токового входа УКИП. В момент двухфазного короткого замыкания на землю в электрической сети 6 кВ по элементу защиты ПТНП пройдут разнополярные импульсы тока с площадью одного импульса $1,529 \cdot 10^{-3}$ А·с, амплитудой тока 21,436 А и периодом повторения импульса одной полярности 20 мс. С помощью испытательного комплекса (ИК) РЕТОМ-51 на экспериментальный образец преобразователя, включающего диоды $VD1$ серии SA11 и ОУ DA1 серии OPA2277UA, поданы импульсы тока с площадью одного импульса $8,96 \cdot 10^{-3}$ А·с (рисунок 9), амплитудой тока 22,4 А (кривая 2) и длиной всего сигнала 0,5 с. Площадь и амплитуда рассматриваемых импульсов превышают расчётные. При неоднократном повторении сигнала схема сохранила рабочее состояние.

Операционный усилитель DA1 рассматриваемой серии выдерживает без повреждения ± 30 В дифференциального напряжения на входах, тогда как максимальное напряжение на диодах VD1 указанной ранее серии может достигать 20,1 В. В выбранной схеме последовательно встречного включения защитных диодов VD1 исключена возможность протекания тока утечки в нормальном режиме работы.

Испытание алгоритма УКИП проведено на математической модели, сигналы в которую поступают от разработанной лабораторной установки, показанной на рисунке 10. В лабораторной установке используется квазифизическая модель изоляции контролируемого присоединения с ЭО1, которая представлена конденсаторами и резисторами утечки. Номиналы конденсаторов и резисторов с учетом масштаба активных сопротивлений и емкостей, равного 50 о.е., соответствуют присоединению собственных нужд с суммарной емкостью трех фаз 0,205 мкФ и с сопротивлением изоляции от 1 МОм до 50 кОм. В качестве источника напряжения с частотами 12,5 и 50 Гц используется ИК РЕТОМ-51.

Сигналы, зафиксированные цифровым осциллографом на лабораторной установке, импортируются в математическую модель алгоритма УКИП (рисунок 11), разработанную в программном комплексе *Matlab/Simulink*. Как и в функциональной схеме рисунка 6, блок *MathFunc1* проводит корректировку аргумента комплекса полного сопротивления изоляции путем его умножения на единичный вектор с аргументом 1,067 град и передает полученный результат в блок *MathFunc2*. По выражениям (4) в блоке *MathFunc2* проводится вычисление сопротивления резистора утечки, а в блоке *Convert* рассчитанное сопротивление резистора утечки с помощью масштаба активных сопротивлений пересчитывается в сопротивление изоляции $R_{ут}$ и переводится в килоомы.

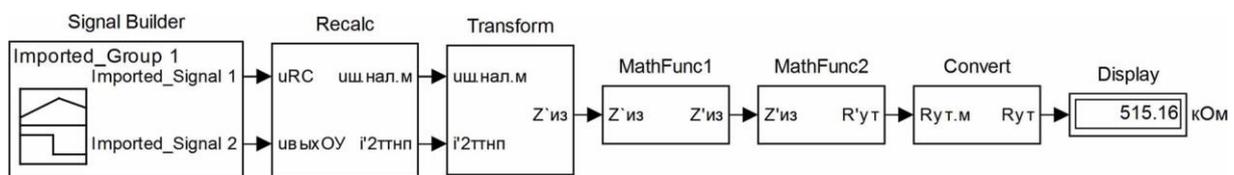


Рисунок 11 – Математическая модель алгоритма функционирования УКИП

В математической модели алгоритма УКИП рассчитаны измеренное $R_{ут}$ без компенсации $\delta_{ПТНП}$, с компенсацией $\delta_{ПТНП}$, а также рассчитано заданное $R_{ут}$. Полученные кривые зависимости измеренного $R_{ут}$ от заданного $R_{ут}$ показаны на рисунке 12.

В лабораторной установке алгоритм УКИП с компенсацией угловой погрешности ПТНП при сопротивлении изоляции 500 кОм (рисунок 12) позволяет снизить погрешность определения сопротивления изоляции $\delta_{ут}$ с 21,49 % (кривая 1) до

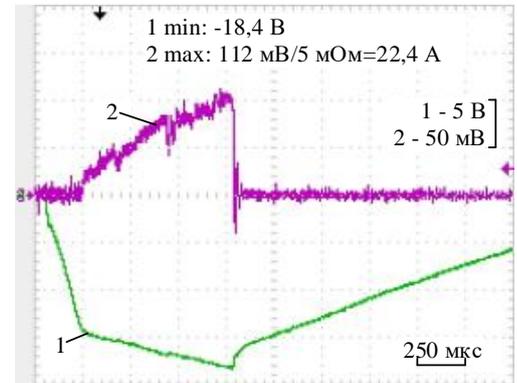


Рисунок 9 – Сигнал напряжения (1) на диодах SA11 и сигнал напряжения (2) на токовом шунте, включенном последовательно с преобразователем

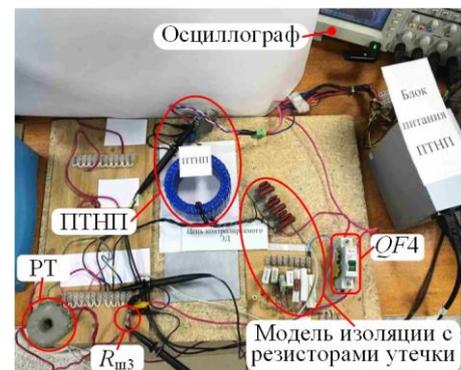


Рисунок 10 – Лабораторная установка

3,42 % (кривая 2), а при сопротивлении изоляции 1 МОм позволяет снизить погрешность $\delta_{ут}$ с 52,5 % (кривая 1) до 5,35 % (кривая 2).

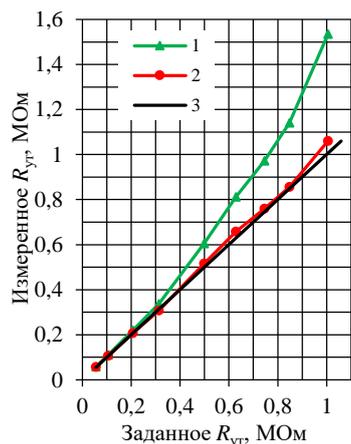


Рисунок 12 – Зависимости измеренного $R_{ут}$ от заданного $R_{ут}$: 1 – без компенсации $\delta_{ПТНП}$; 2 – с компенсацией $\delta_{ПТНП}$; 3 – касательная прямая

Результаты исследований использованы в ООО НПФ «Квазар» при разработке опытных образцов системы селективного контроля состояния изоляции электрооборудования собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС, выполненной по заданию филиала ПАО «ОГК-2» – Новочеркасская ГРЭС. Использование результатов диссертации подтверждено полученным актом внедрения. Два образца системы селективного контроля изоляции проходят опытную эксплуатацию на одном из энергоблоков Новочеркасской ГРЭС. Используемые технические решения позволили поместить оборудование опытных образцов системы селективного контроля изоляции электрооборудования в ячейках КРУ без применения дополнительных шкафов или установки датчиков вблизи ЭО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача по селективному контролю сопротивления изоляции электрооборудования собственных нужд напряжением 6 кВ блочных ТЭС. Основные научные выводы и практические результаты можно сформулировать в следующем виде.

1. Применение системы непрерывного селективного контроля состояния ответственного ЭО собственных нужд напряжением 6 кВ блочных ТЭС позволит снизить ущерб за счёт предотвращения внезапных отказов указанного ЭО и обусловленных этим нарушений нормального функционирования основного энергетического оборудования ТЭС.

2. Особенностью задачи селективного контроля изоляции ЭО собственных нужд блочных ТЭС с помощью метода наложенного переменного тока является трудность распознавания с требуемой для практики точностью малой активной составляющей наложенного тока на фоне емкостных составляющих наложенного тока и тока нулевой последовательности промышленной частоты.

3. Анализ принципов селективного контроля изоляции присоединений с помощью метода наложенного переменного тока показал, что наиболее целесообразным является разложение контролируемых токов и напряжений на ортогональные составляющие, которое производится индивидуальными микропроцессорными УКИП. Индивидуальные УКИП фиксируют ток в цепи контролируемого присоединения и напряжение на секции шин собственных нужд, осуществляют фильтрацию наложенного тока и напряжения, вычисляют текущее активное сопротивление изоляции и сравнивают его с уставкой.

4. С помощью анализа влияния частоты наложенного тока на параметры выходного сигнала ИНН, точность ПТНП, чувствительность и точность УКИП, трансформацию наложенного напряжения, а также на соотношение уровней емкостных составляющих наложенного тока и тока основной частоты, доказана

техническая целесообразность применения наложенного тока частотой 12,5 Гц в системе селективного контроля изоляции присоединений собственных нужд напряжением 6 кВ блочных ТЭС.

5. Предложен алгоритм функционирования УКИП, заключающийся в вычислении активного сопротивления изоляции контролируемого присоединения путём выделения ортогональных составляющих наложенного тока и напряжения, формирования усредненного комплекса полного сопротивления изоляции с учетом отстройки от помех, отличающийся компенсацией угловой погрешности ПТНП. Алгоритм позволяет обеспечить чувствительность УКИП к развившемуся дефекту в изоляции присоединений собственных нужд блочной ТЭС.

6. Установлено, что ошибка трансформации СТТНП с магнитопроводом из нанокристаллического материала, обусловленная влиянием остаточной магнитной индукции, зависит от времени и на третьем периоде первичного тока частотой 50 Гц не превышает 0,75 %. Это позволило отказаться от применения специальных схем, основанных на эффектах безгистерезисного намагничивания и накачки магнитной индукции.

7. Путем математического и физического моделирования доказана целесообразность и реализуемость предложенного алгоритма функционирования УКИП, позволяющего снизить погрешность определения сопротивления изоляции и повысить чувствительность системы селективного контроля сопротивления изоляции к развившимся дефектам в изоляции присоединений.

8. Разработана подсистема наложенного тока, включающая в себя ИНН, формирующий на выходе разнополярные импульсы наложенного тока, индуктивный фильтр присоединения, выполненный в виде дросселя с ограничителем перенапряжений, элемент защиты и трансформатор напряжения, обмотки низшего напряжения которого соединены в разомкнутый треугольник. Элементы подсистемы наложенного тока снижают до допустимого уровня значения коммутационных перенапряжений на дросселе и ИНН, защищают ИНН и обмотки дополнительного ТН от токов промышленной частоты, возникающих при однофазных замыканиях на землю в системе собственных нужд, а также позволяют снизить выходную мощность ИНН, отличаются от известных тем, что могут быть размещены в ячейке КРУ трансформатора напряжения и обеспечивают требуемый по условиям чувствительности системы селективного контроля изоляции уровень наложенного напряжения на шинах секции собственных нужд. Техническое решение подсистемы защищено патентом на полезную модель.

9. Результаты исследований использованы в ООО НПФ «Квазар» при разработке опытных образцов основанной на методе наложенного переменного тока системы селективного контроля изоляции электрооборудования собственных нужд напряжением 6 кВ блочной ТЭС. Используемые технические решения позволили разместить оборудование опытных образцов системы селективного контроля изоляции в ячейках КРУ без применения дополнительных шкафов или установки датчиков вблизи контролируемого ЭО.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ

1. Бабичев, А. С. Методы селективного контроля состояния изоляции ответственных электродвигателей собственных нужд тепловых электростанций / А. С. Бабичев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 92–97. – DOI: 10.17213/0136-3360-2019-2-92-97 (0,7 п.л.).

2. Бабичев, А. С. Применение наложенного тока для селективного контроля изоляции группы электродвигателей / А. С. Бабичев // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2 (35). – С. 32–35 (0,47 п.л.).

3. Бабичев, А. С. Выбор частоты наложенного переменного тока в системе селективного контроля состояния изоляции ответственных электродвигателей собственных нужд тепловых электростанций / А. С. Бабичев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 73–81. DOI:10.17213/0136-3360-2019-4-73-81 (1,05 п.л.).

Патент на полезную модель

4. Пат. 191462 Российская Федерация, МПК G01R 31/02 (2006.01). Источник наложенного напряжения системы селективного контроля состояния изоляции группы электродвигателей напряжением выше 1 кВ / Р. А. Вайнштейн, С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярёв, А. С. Бабичев. Опубл. 06.08.2019. Бюл. № 22.

Публикации в других изданиях

5. Бабичев, А. С. Система контроля изоляции электродвигателей собственных нужд напряжением 6 кВ ТЭС с энергоблоками мощностью 300 МВт / А. А. Малахов, А. С. Бабичев // Студенческая научная весна – 2018: материалы регион. науч.-техн. конф. (конкурса науч.-техн. работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростов. обл., г. Новочеркасск, 24-25 мая 2018 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2018. – С. 168 (0,06 п.л. / 0,04 п.л.).

6. Бабичев, А. С. Селективный контроль изоляции группы электродвигателей напряжением 6 кВ собственных нужд блочной тепловой электростанции / А. С. Бабичев // Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XI сессии семинара по тематике «Электроснабжение», 25-26 сент. 2018 г., г. Новочеркасск / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2018. – С. 107–111 (0,27 п.л.).

7. Бабичев, А. С. Применение наложенного тока для селективного контроля изоляции группы электродвигателей / А. С. Бабичев // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: сб. докл. V науч.-техн. конф. молодых специалистов, г. Чебоксары, 23-26 апр. 2019 г. / РЕЛАВЭКСПО-2019. – Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 162–166 (0,23 п.л.).

8. Бабичев, А. С. Селективный контроль изоляции группы электродвигателей при использовании метода наложенного тока / А. С. Бабичев // Студенческая научная весна – 2019: материалы региональной науч.-техн. конф. (конкурса науч.-техн. работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост. обл., г. Новочеркасск, 13-14 мая 2019 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2019. – С. 195 (0,06 п.л.).

9. Бабичев, А. С. Оценка влияния остаточной магнитной индукции на точность трансформации специального трансформатора тока нулевой последовательности / С. Л. Кужеков, А. С. Бабичев // Результаты исследований – 2019: материалы IV Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и науч. работников, 14 мая 2019 г., г. Новочеркасск / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2019. – С. 126–129 (0,23 п.л. / 0,12 п.л.).

Личный вклад автора в результаты работ, опубликованных в соавторстве, состоит в [4] – поиске и анализе информации, разработке математических моделей подсистем наложенного тока и анализе результатов моделирования, разработке способа отключения источника наложенного напряжения и снижения коммутационных перенапряжений; [5] – разработке математической модели и анализе результатов моделирования; [9] – разработке и создании экспериментальной установки, проведении экспериментальных исследований с последующей обработкой и анализом результатов.

Бабичев Александр Сергеевич

**СИСТЕМА СЕЛЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД БЛОЧНОЙ
ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 30.04.2021.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 46-0159.

Отпечатано в ИД «Политехник»
346428, г. Новочеркасск, ул. Первомайская, 166
idp-npi@mail.ru