

На правах рукописи



ПУДОВИННИКОВ РОМАН НИКОЛАЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ТОКОВ
НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ВЫСОКОШИРОТНЫХ РЕГИОНОВ**

Специальность: 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

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

Тольятти 2023

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение и электротехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

Научный руководитель: **Вахнина Вера Васильевна**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение и
электротехника» ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет»

**Официальные
оппоненты:** **Ершов Михаил Сергеевич**
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теоретическая электротехника и
электрификация нефтяной и газовой
промышленности» ФГАОУ ВО «РГУ нефти и
газа (НИУ) имени И.М. Губкина»

Сычев Юрий Анатольевич
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Электроэнергетика и
электромеханика» ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский горный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
технический университет»

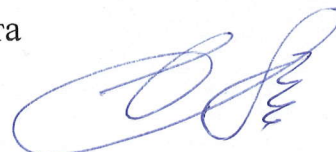
Защита состоится «22» декабря 2023 г. в 14.00 часов на заседании
диссертационного совета МЭИ.102 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу:
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, стр. 8, ауд. 26.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
организации, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва,
ул. Красноказарменная, д. 14, Учёный Совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ
«МЭИ».

Автореферат разослан « » _____ 202 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
МЭИ.102 к.т.н., доцент



Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Системы электроснабжения (СЭС) постоянно подвергаются воздействиям природного характера – сильному ветру, обледенению, мокрому снегу, молниям, продолжительной жаре или похолоданию и т.д. Воздействия природного характера относятся к числу главных причин отказа электрооборудования и развития аварийных ситуаций в СЭС. Изменение архитектуры и увеличение протяженности сетей, расширение географической зоны размещения объектов электроэнергетики в высокоширотные регионы, активное внедрение технологий Smart Grid ставят необходимость учета еще одного воздействия природного характера – повышенной геомагнитной активности, основным проявлением которой являются геомагнитные бури (ГМБ).

Наиболее сильному воздействию геомагнитных бурь подвержены электрические сети, расположенные в высокоширотных регионах – Канаде, северо-восточной части США и Скандинавии. В этих странах на протяжении многих лет осуществляется мониторинг геоиндуцированных квазипостоянных токов (КПТ) в электрических сетях, зарегистрированные всплески геоиндуцированных КПТ в годы с умеренной геомагнитной активностью составили более 100 А, а в годы с повышенной геомагнитной активностью превысили 200 А.

Территория РФ характеризуется меньшей интенсивностью воздействия геомагнитных бурь на системы электроснабжения. Это связано прежде всего с тем, что Северный магнитный полюс находится на территории Канады. Однако в настоящее время наблюдается тенденция смещения Северного магнитного полюса в направлении российской Арктики, и предполагается, что магнитный полюс к 2050 году переместится в Арктическую зону РФ – в район архипелага Северная Земля. В результате электрические сети высокоширотных регионов РФ окажутся в зоне высокого риска при воздействии геомагнитных бурь.

При повышенной геомагнитной активности непосредственному воздействию подвергаются силовые трансформаторы (СТ), по обмоткам высокого напряжения (ВН) которых протекают геоиндуцированные КПТ. Изменение режима работы силовых трансформаторов при насыщении магнитных систем под воздействием геоиндуцированных КПТ способно оказать также негативное влияние на работу генераторного оборудования источников генерации СЭС высокоширотных регионов. Поэтому **актуально** исследование функционирования систем электроснабжения высокоширотных регионов РФ при воздействии потенциально опасных геоиндуцированных КПТ, способных оказать деструктивное воздействие как на силовые трансформаторы, так и на генераторное оборудование, и, следовательно, на надежность электроснабжения потребителей высокоширотных регионов.

Степень разработанности темы исследования. Воздействие геоиндуцированных КПТ на электрооборудование СЭС описано в работах зарубежных и российских ученых Boteler D.H., Kappenman J.G., Gaunt C.T., Molinski T.S., Pirjola R., Pulkkinen A., Viljanen A., Вахниной В.В., Гершенгорна

А.И., Гуревича В.И., Пилипенко В.А., Сахарова Я.А. и др., где рассмотрены как физические аспекты появления геоиндуцированных КПТ в электрической сети и технические аспекты их мониторинга, так и вопросы деструктивного воздействия геоиндуцированных КПТ на силовые трансформаторы: рассмотрены вопросы насыщения их магнитной системы, возрастания тока намагничивания и генерации высших гармоник, а также увеличения потребления реактивной мощности.

В работах Boteler D.H., Kappenman J.G., Pirjola R., Viljanen A. приведены результаты моделирования процессов в энергосистемах при протекании геоиндуцированных квазипостоянных токов, выполнена верификация результатов расчетов и данных мониторинга, проведенных в периоды ГМБ. Однако, несмотря на проводимые исследования по воздействию ГМБ на электрические сети, которые значительно активизировались после Квебекского инцидента 1989 года в Америке и странах Скандинавии, в России мало внимания уделяется исследованиям, направленных на разработку закономерностей функционирования систем электроснабжения в высокоширотных регионах при геомагнитных бурях, не исследован механизм воздействия геоиндуцированных КПТ на блок «генератор-трансформатор», хотя по результатам расследования аварий при ГМБ приводятся данные об отказе блочных трансформаторов и отключении генераторов в системах электроснабжения высокоширотных регионов. Совокупность определенных проблем определяет цель и задачи диссертационного исследования.

Цель диссертационного исследования – разработка методики оценки влияния геоиндуцированных квазипостоянных токов на режимы функционирования систем электроснабжения высокоширотных регионов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи исследования**:

1. Анализ проблем, связанных с геоиндуцированными квазипостоянными токами при повышенной геомагнитной активности, в системах электроснабжения высокоширотных регионов РФ.

2. Разработка математической модели системы электроснабжения высокоширотного региона при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов.

3. Развитие методики исследования процессов насыщения магнитной системы блочного трансформатора при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов.

4. Определение безопасных уровней геоиндуцированных квазипостоянных токов для систем электроснабжения высокоширотных регионов РФ.

5. Разработка методики оценки перегрузки генератора блока мощностью намагничивания блочного трансформатора системы электроснабжения высокоширотного региона.

6. Разработка имитационной компьютерной модели и проведение имитационного компьютерного моделирования воздействия геоиндуцированных квазипостоянных токов на систему электроснабжения высокоширотного региона РФ.

Объектом исследования являются системы электроснабжения высокоширотных регионов РФ.

Предметом исследования – режимы функционирования систем электроснабжения высокоширотных регионов РФ при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что:

1. Выявлены особенности моделирования систем электроснабжения высокоширотных регионов РФ при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов при повышенной геомагнитной активности, учитывающие возможность задания воздействия геоиндуцированных КПТ одновременно на все силовые трансформаторы путем дополнения стандартных моделей моделью заземляющего устройства с плавающим потенциалом.

2. Разработана математическая модель однофазного и трехфазного двухобмоточных силовых трансформаторов, отличающаяся от известных введением логических условий изменения индуктивного сопротивления ветви намагничивания при насыщении магнитной системы.

3. Разработана методика исследования процессов насыщения магнитной системы блочного трансформатора при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов, позволяющая установить диапазоны геоиндуцированных КПТ и фазового угла насыщения магнитной системы блочного трансформатора, как безопасных для высокоширотных систем электроснабжения, так и способных оказать заметное влияние на режим генерации реактивной мощности генератором блока, что может привести к перегрузке по току статора и последующему отключению источника генерации.

4. Предложена методика оценки перегрузки генератора блока мощностью намагничивания блочного трансформатора под воздействием геоиндуцированных квазипостоянных токов возрастающей интенсивности, применение которой позволит определить возможный сценарий реакции блока «генератор-трансформатор» с учетом ограничений, налагаемых АРВ.

5. Разработана и реализована имитационная компьютерная модель системы электроснабжения высокоширотного региона РФ, позволяющая осуществить имитационное компьютерное моделирование тестового воздействия геоиндуцированных КПТ различной амплитуды и продолжительности для исследования изменения режимных параметров блока «генератор – трансформатор».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная математическая модель системы электроснабжения высокоширотного региона с учетом насыщения магнитной системы силовых трансформаторов и возможностью задания воздействия геоиндуцированных квазипостоянных токов одновременно на все силовые трансформаторы СЭС.

2. Методика исследования процессов насыщения магнитной системы блочного трансформатора при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов.

3. Методика оценки перегрузки генератора блока мощностью намагничивания блочного трансформатора системы электроснабжения.

4. Результаты исследования функционирования системы электроснабжения высокоширотного региона РФ при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов с помощью разработанных математических и компьютерных моделей.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии общей теории исследования и разработке основ функционирования систем электроснабжения высокоширотных регионов при повышенной геомагнитной активности для снижения деструктивного воздействия геоиндуцированных квазипостоянных токов на блок «генератор – трансформатор».

Практическая значимость исследования заключается в возможности прикладного применения результатов исследования при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения высокоширотных регионов для повышения надежности их функционирования при повышенной геомагнитной активности. Выявленные особенности и проблемы функционирования систем электроснабжения высокоширотных регионов при природных рисках используются в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» при изучении дисциплины «Проектирование и оптимизация систем электроснабжения»; разработанные технические решения вошли в практику ООО «Тольяттинский трансформатор» при анализе факторов, влияющих на надежность эксплуатации высоковольтных силовых трансформаторов в процессе эксплуатации.

Методологическая база, методы и средства исследования. Методологическая основа опирается на теорию электрических цепей и электромагнитных и электромеханических переходных процессов, методы математического моделирования электротехнических комплексов и на совокупность результатов научных исследований в области функционирования электрооборудования систем электроснабжения при ГМБ.

В диссертации применены общенаучные методы исследования – анализ и синтез, обобщение, сравнение и систематизация, моделирование, а также специальные методы исследования, применяемые в электротехнике – методы анализа установившихся и переходных режимов в электротехнических комплексах и системах, методы имитационного компьютерного моделирования электротехнических комплексов и систем. Для решения поставленных задач (имитационного компьютерного моделирования функционирования СЭС высокоширотного региона РФ при тестовом воздействии геоиндуцированного КПТ) использован программный комплекс MATLAB (Simulink).

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждается корректным применением методологической основы, общенаучных и специальных методов исследования, использованием современных сертифицированных программно-технических комплексов и сопоставлением результатов численного эксперимента с данными мониторинга и моделирования реальных высокоширотных систем электроснабжения различной сложности при оценке уровня опасности геоиндуцированных КПТ, приведенных в источниках информации.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Область исследования соответствует паспорту специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» в части направлений исследований: п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем...»; п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях...».

Апробация результатов работы. Основные результаты работы лично докладывались на международных и всероссийских конференциях: PQM 2020 «Управление качеством электрической энергии» (г. Москва, 2020); Industrial Engineering, Applications and Manufacturing ICIEAM-2021, ICIEAM-2022, ICIEAM-2023 (г. Сочи, 2021, 2022, 2023); «Глобальная электрическая цепь» (геофизическая обсерватория «Борок», 2021); «Федоровские чтения – 2021» и «Федоровские чтения – 2022» (г. Москва, 2021, 2022); «Инновационные технологии в обучении и производстве» (г. Камышин, 2021); Proceedings of International Ural Conference on Electrical Power Engineering UralCon 2021 (г. Челябинск, 2021); «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» (г. Казань, 2022); Plasma-2023 «Физика плазмы в солнечной системе» (г. Москва, 2023); на научно-технических семинарах ФГБОУ ВО «ТГУ».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 5 – в научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 4 – в изданиях, индексируемых международными базами цитирования Scopus, и 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора заключается в формулировании проблемы исследования, постановке цели и задач исследования, в проведении анализа состояния работ по исследованию воздействия геоиндуцированных КПТ на системы электроснабжения высокоширотных регионов РФ. Лично автором разработаны: методика исследования процессов насыщения магнитной системы блочного трансформатора при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов; методика оценки перегрузки генератора мощностью намагничивания блочного трансформатора СЭС высокоширотного региона; математическая модель системы электроснабжения высокоширотного региона с учетом особенностей при воздействии геоиндуцированных КПТ, реализованная в компьютерную модель системы электроснабжения Норильско-Таймырского энергорайона Красноярского края, на которой самостоятельно проведен численный эксперимент и выполнен анализ полученных результатов; подготовлены основные публикации по теме исследования.

Структура и объем работы.

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 116 наименований и двух приложений, выполнена на 156 страницах, включая 53 рисунка и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования влияния потенциально опасных геомагнитных возмущений на функционирование систем электроснабжения высокоширотных регионов РФ. Определены цель и задачи исследования, объект и предмет исследования, описаны методы и средства исследования, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации, личном вкладе автора и структуре работы.

В первой главе показано, что к высокоширотным регионам РФ с позиции воздействия повышенной геомагнитной активности условно относят регионы, расположенные выше 65° географической широты, т.е. около трети территории страны. Показано, что при анализе функционирования систем электроснабжения, расположенных в высокоширотных регионах, необходимо учитывать влияние такого природного фактора как геомагнитные бури. Приведена статистическая зависимость между количеством аварий и уровнем геомагнитной активности: число аварий возрастает вслед за возрастанием геомагнитной активности, а в годы минимума геомагнитной активности вероятности аварий в геомагнитно-опасных высокоширотных и безопасных районах практически уравниваются.

Установлено, что в высокоширотных регионах РФ, в состав которых входят крупные промышленные потребители и населенные пункты, в качестве источников генерации в основном применяются ГЭС и ТЭС, в Мурманской области крупным источником генерации является АЭС, суммарная установленная мощность которых составляет 94,4% от других источников генерации электрической энергии. Главная схема электрических соединений источников генерации в основном строится по блочному принципу, в схемах применяются блочные трансформаторы с броневыми и бронестержневыми конструкциями магнитных систем, насыщение которых под воздействием геоиндуцированных КПТ может оказать негативное влияние на функционирование источников генерации электрической энергии и, как следствие, на надежность электроснабжения потребителей.

Во второй главе рассмотрены особенности моделирования СЭС высокоширотных регионов при воздействии геоиндуцированных КПТ. Задача анализа воздействия геоиндуцированных КПТ на СЭС в общем случае состоит из трех этапов (рис. 1).

Первый этап (рис. 2), включает в себя расчет геоэлектрического поля при ГМБ и расчет геоиндуцированных КПТ в нейтралях силовых трансформаторов СЭС. Геоэлектрическое поле может быть определено через измеряемые вариации напряженностей геомагнитного поля B_x и B_y и поверхностный импеданс $z(\omega)$ для однородной земной коры:

$$E_x(\omega) = \frac{z(\omega) \cdot B_y(\omega)}{\mu_0}, E_y(\omega) = -\frac{z(\omega) \cdot B_x(\omega)}{\mu_0}, z(\omega) = \sqrt{\omega \mu_0 \rho}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота источника поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; ρ – удельное электрическое сопротивление внутри Земли.

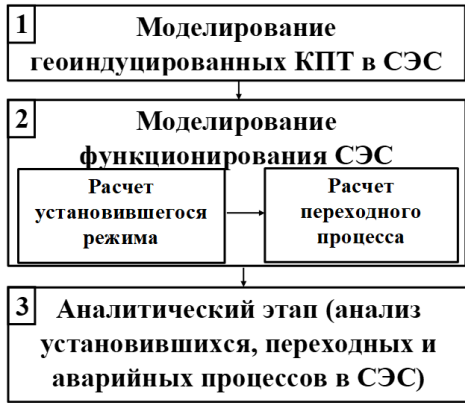


Рис. 1 – Алгоритм моделирования воздействия геоицированных КПТ на СЭС



Рис. 2 – Алгоритм моделирования геоицированных КПТ в СЭС

Так как геоелектрическое поле является полем ультранизкой частоты с диапазоном частот $f = (0,001 - 0,1)$ Гц, поэтому для определения ρ используется слоистая модель Земли. Однако оптимальной глобальной модели геоелектрической проводимости Земли не существует, поэтому показано, что при расчетах геоицированных КПТ в электрических сетях приходится пользоваться различными приближенными методами. При допущении неизменности величины и направления горизонтальной компоненты геоелектрического поля на поверхности земли в пределах пространственной области, занимаемой частью или всей рассматриваемой электрической сети, задача определения геоицированных КПТ сводится к расчету линейных цепей постоянного тока. В этом случае геоицированный КПТ определяется интегральной оценкой разности потенциалов между заземленными узлами i и $(i-1)$ СЭС протяженностью l и омическим сопротивлением контура протекания $R_{\text{КПТ}}$:

$$I_{\text{КПТ}} = \frac{\varphi_i - \varphi_{(i-1)}}{R_{\text{КПТ}}} = \frac{\int_l E_0 \cdot dl}{R_{\text{КПТ}}} \quad (2)$$

Второй этап – моделирование функционирования СЭС при воздействии геоицированных КПТ. Рассмотрена расчетная схема типового фрагмента системы электроснабжения, приведенная на рис. 3.

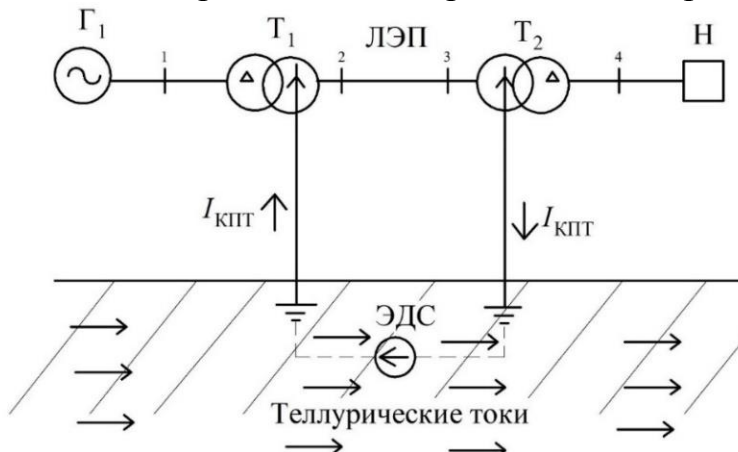


Рис. 3 – Расчетная схема типового фрагмента системы электроснабжения при воздействии геоицированных КПТ

В расчетной схеме блок «генератор-трансформатор», представленный генератором G_1 и повышающим блочным трансформатором T_1 , через протяженную воздушную ЛЭП и понижающий трансформатор T_2 осуществляет питание потребителя H . При повышенной геомагнитной активности в грунте возбуждаются теллурические токи, которые между заземляющими устройствами T_1 и T_2 создают разность потенциалов, которая на рис. 3 представлена источником постоянной ЭДС.

Так как геомагнитные бури способны охватывать всю территорию, на которой расположена высокоширотная СЭС, то геоиндуцированные КПТ воздействуют почти одновременно на все СТ с заземленными нейтралью обмоток ВН. Показано, что для определения общей картины растекания геоиндуцированных КПТ по нейтралью силовых трансформаторов СЭС необходимо формирование матрицы разностей потенциалов между всеми парами заземляющих устройств. Для этого разработана математическая модель заземляющего устройства с плавающим потенциалом (φ_j, R_j) , где φ_j и $R_j = r_{3Y}$ – потенциал и активное сопротивление j -го заземляющего устройства, которая позволяет задавать воздействие ГМБ одновременно на все силовые трансформаторы высокоширотной СЭС в виде квазипостоянных потенциалов, действующих на нейтраль обмоток ВН, и без изменения схемы замещения сети исследовать распределение геоиндуцированных КПТ.

В этом случае схемы замещения силовых трансформаторов формируются путем дополнения стандартной Г-образной схемы замещения СТ моделью заземляющего устройства с плавающим потенциалом (φ_j, R_j) . Ветвь намагничивания для всех СТ вынесена на сторону ВН, как показано на рис. 4.

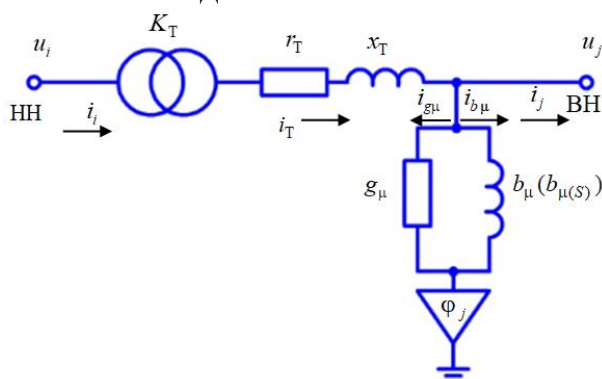


Рис. 4 – Модифицированная Г-образная схема замещения однофазного или фазы трехфазного двухобмоточного СТ

Обозначения: r_T и x_T – активное и индуктивное сопротивления продольной ветви; g_μ – активная проводимость ветви намагничивания; $b_\mu(x_\mu)$ и $b_\mu(s)(x_\mu(s))$ – ненасыщенное и насыщенное значения проводимостей (сопротивлений) ветви намагничивания; K_T – действительный коэффициент трансформации идеального трансформатора; ψ_s – величина потокосцепления, при которой происходит насыщение магнитной системы; I_s – ток насыщения.

В модифицированной Г-образной схеме замещения возможность учета насыщения магнитной системы СТ под воздействием геоиндуцированных КПТ реализована использованием кусочно-линейной аппроксимации характеристики

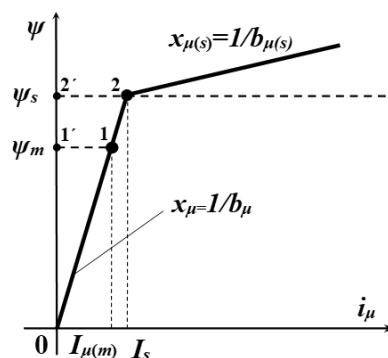


Рис. 5 – Кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания

намагничивания в координатах «потокосцепление обмотки ВН ψ – ток намагничивания i_μ » с одной точкой излома с координатами (ψ_S, I_S) , при которых начинается насыщение магнитной системы силового трансформатора (рис. 5).

Математическая модель однофазного или фазы трехфазного двухобмоточного СТ описана выражениями:

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{\omega_{ном}}{x_T} \cdot (K_T \cdot u_i - u_j - r_T \cdot i_T); \quad (3)$$

$$\frac{di_{b\mu}}{dt} = \omega_{ном} \cdot (\alpha \cdot b_{\mu(s)} + \bar{\alpha} \cdot b_\mu) \cdot [u_j - \varphi_j - R_j \cdot (i_T - i_j)]; \quad (4)$$

$$i_i = K_T \cdot i_T, \quad i_j = i_T - i_{b\mu} - i_{g\mu}, \quad i_{g\mu} = \frac{g_\mu}{1 + R_j \cdot g_\mu} \cdot [(u_j - \varphi_j) - R_j \cdot i_{b\mu}], \quad (5)$$

и дополнена логическими условиями изменения реактивной проводимости ветви намагничивания, описывающими насыщенное и ненасыщенное состояние магнитной системы:

$$\alpha(\psi) = \begin{cases} 1 & \text{при } \psi \geq \psi_S \text{ (ключ замкнут, магнитная система насыщена),} \\ 0 & \text{при } \psi < \psi_S \text{ (ключ разомкнут, магнитная система не насыщена),} \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{\alpha} = (1 - \alpha).$$

Модифицированная схема замещения воздушной ЛЭП получена путем дополнения стандартной П-образной схемы замещения моделью заземляющего устройства с плавающим потенциалом при $R_i = R_j = 0$.

При моделировании установившегося режима фазные токи и напряжения в СЭС принимаются симметричными и синусоидальными. В этом случае можно рассматривать схему замещения и параметры только одной фазы типового фрагмента СЭС (рис. 6), используя соответственно однофазные схемы замещения электрооборудования. В однофазной схеме замещения для генератора блока Γ_1 использована *PU* – модель синхронного генератора.

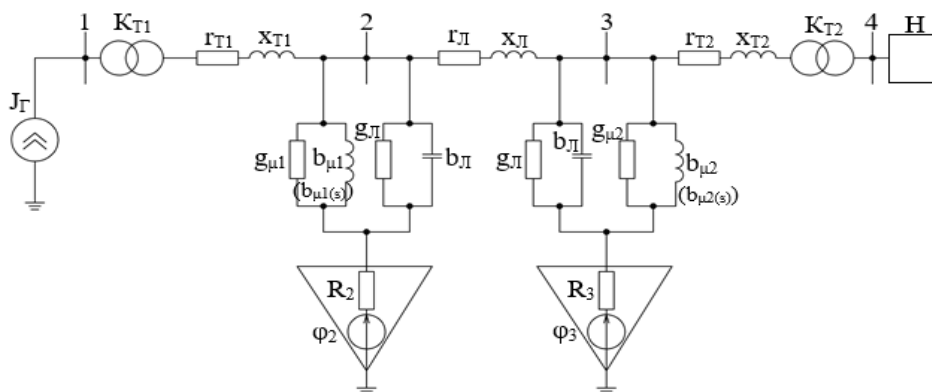


Рис. 6 – Однофазная схема замещения типового фрагмента СЭС

Выполнено преобразование однофазной схемы замещения типового фрагмента СЭС после расчета установившегося режима в трехфазную схему замещения для исследования переходного процесса, вызванного воздействием геоиндуцированных КПТ. В трехфазной схеме замещения СЭС использована упрощенная модель синхронного генератора (уравнения Лебедева-Жданова).

В третьей главе разработана методика исследования процессов насыщения магнитной системы блочного трансформатора при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов. Показано, что при повышенной геомагнитной активности насыщение магнитной системы блочного

трансформатора T_1 может служить причиной перегрузки генератора блока Γ_1 только в случае сохранения работоспособности АРВ, обеспечивающего постоянство напряжения на шинах генератора ($U_1 = const$). Поэтому для дальнейшего рассмотрения выбран режим стабилизации напряжения U_1 . Полученные для этого режима временные диаграммы фазного напряжения $U_{1(\Phi)}$ на шинах генератора Γ_1 , тока намагничивания $i_{\mu 1}$, основной гармоники тока намагничивания $i_{\mu 1(1)}$ и геоиндуцированного КПТ при насыщении магнитной системы блочного трансформатора T_1 , приведены на рис. 7. На рис. 7 угол φ_Φ – фазовый угол насыщения, который определяет момент времени τ_Φ , когда магнитная система блочного трансформатора T_1 достигает состояния насыщения, $\varphi_\Phi = \omega\tau_\Phi/2$.

Кривая тока намагничивания $i_{\mu 1}(t)$ является реактивной составляющей тока, мгновенные значения тока намагничивания определяются выражением:

$$i_{\mu 1}(t) = I_{\mu 1(s)} \cdot (\cos\omega t + \cos\varphi_\Phi), \quad (7)$$

где $I_{\mu 1(s)}$ – амплитуда тока намагничивания при полном насыщении магнитной системы блочного трансформатора T_1 .

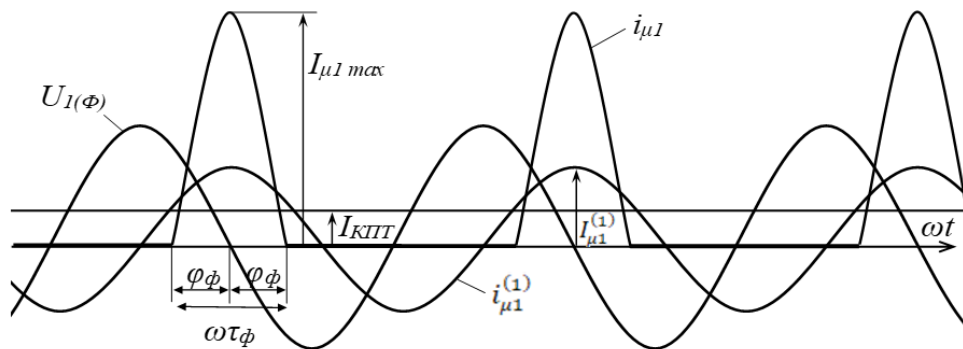


Рис. 7 – Временные диаграммы мгновенных значений фазного напряжения $U_{1(\Phi)}$ на шинах генератора Γ_1 , тока намагничивания $i_{\mu 1}$, первой гармоники тока намагничивания $i_{\mu 1(1)}$ и $I_{КПТ}$

Постоянная составляющая тока намагничивания (нулевая гармоника $I_{\mu 1}^{(0)}$), численно равная величине геоиндуцированного КПТ, определяется интегрированием выражения (7) по φ_Φ на интервале периода напряжения:

$$I_{\mu 1}^{(0)} = I_{КПТ} = \frac{I_{\mu 1(s)}}{\pi} \cdot (\sin\varphi_\Phi - \varphi_\Phi \cdot \cos\varphi_\Phi). \quad (8)$$

Амплитуды n -й гармоники и первой (основной) гармоники тока намагничивания определяются формулами:

$$I_{\mu 1}^{(n)} = \frac{I_{\mu 1(s)}}{\pi} \cdot \left[\frac{\sin(n-1)\varphi_\Phi}{(n-1)} + \frac{\sin(n+1)\varphi_\Phi}{(n+1)} - \frac{2}{n} \cdot \cos\varphi_\Phi \cdot \sin(n\varphi_\Phi) \right], \quad (9)$$

$$I_{\mu 1}^{(1)} = \frac{I_{\mu 1(s)}}{\pi} \cdot \left(\varphi_\Phi - \frac{\sin 2\varphi_\Phi}{2} \right). \quad (10)$$

Получено, что фазовый угол насыщения φ_Φ магнитной системы блочного трансформатора T_1 полностью определяет как гармонический состав тока намагничивания, так и количественные соотношения между отдельными гармониками. Поэтому в качестве количественного критерия глубины насыщения магнитной системы блочного трансформатора предложено

рассматривать фазовый угол насыщения φ_ϕ : при $\varphi_\phi = 0$ – магнитная система не насыщена; $0 < \varphi_\phi < \pi$ – частичное насыщение магнитной системы; $\varphi_\phi = \pi$ – полное насыщение магнитной системы.

Анализ гармонического состава тока намагничивания показал, что при любой глубине насыщения магнитной системы блочного трансформатора T_1 в спектре тока намагничивания присутствуют все канонические гармоники. Исключением являются спектры гармоник при фазовом угле насыщения $\varphi_\phi = \pi/2$, в котором отсутствуют все нечетные гармоники тока намагничивания, и фазовом угле насыщения $\varphi_\phi = \pi$, при котором все высшие гармоники принимают нулевое значение.

Мощность намагничивания блочного трансформатора T_1 обусловлена первой гармоникой тока намагничивания $I_{\mu 1}^{(1)}$. Относительная величина мощности намагничивания T_1 при насыщении магнитной системы определяется выражением:

$$Q_{\mu 1}^* = \frac{Q_{\mu 1}}{S_{ГН}} = U_1^* \cdot I_{\mu 1}^{(1)*} \cdot \left(\frac{K_T \cdot I_{\mu 1}(s)}{\sqrt{2} \cdot I_{H1}} \right), \quad (11)$$

где $S_{ГН}$, U_{H1} и I_{H1} – номинальная мощность, номинальные напряжение и ток статорных обмоток генератора Γ_1 ; $U_1^* = U_1/U_{H1}$; $I_{\mu 1}^{(1)*} = I_{\mu 1}^{(1)}/I_{\mu 1}(s)$.

Установлены диапазоны геоиндуцированного КПТ ($I_{КПТ}^* = I_{КПТ}/I_{\mu 1}(s)$) и фазового угла насыщения магнитной системы блочного трансформатора φ_ϕ , способные оказать заметное влияние на режим генерации реактивной мощности генератором блока. При $I_{КПТ}^* \leq 0,0047$ и, соответственно, фазовом угле насыщения $\varphi_\phi \leq \pi/9$ (20 эл.гр.) мощность намагничивания блочного трансформатора T_1 на много меньше генерации реактивной мощности Γ_1 в номинальном режиме: $Q_{\mu 1}^* \ll Q_{ГН}^*$, и не способна оказать заметного влияния на режим генерации реактивной мощности генератором Γ_1 . При $I_{КПТ}^* \geq 0,0148$ и, соответственно, $\varphi_\phi \geq \pi/6$ (30 эл.гр.) мощность намагничивания блочного трансформатора T_1 становится соизмеримой с генерацией реактивной мощности генератором Γ_1 : $Q_{\mu 1}^* \geq (0,18 - 0,37)Q_{ГН}^*$. При $I_{КПТ}^* \geq 0,0652$ и, соответственно, $\varphi_\phi \geq 5\pi/18$ (50 эл.гр.) мощность намагничивания блочного трансформатора T_1 превышает уровень генерации реактивной мощности генератором Γ_1 в номинальном режиме: $Q_{\mu 1}^* > Q_{ГН}^*$. В этом режиме при насыщении магнитной системы блочного трансформатора из-за возрастания мощности намагничивания возникает необходимость ее компенсации за счет дополнительной выработки реактивной мощности генератором блока Γ_1 , что может привести к увеличению его перегрузки и последующему отключению.

Четвертая глава посвящена разработке методики оценки перегрузки генератора мощностью намагничивания блочного трансформатора. Показано, что выполнение условия сохранения неизменного напряжения на шинах генератора Γ_1 блока ($U_1 = const$) при увеличении мощности намагничивания $Q_{\mu 1}$ блочного трансформатора T_1 под воздействием геоиндуцированных КПТ возможно только путем увеличения выдачи реактивной мощности генератором Γ_1 , которое обеспечивается увеличением тока возбуждения I_f в результате

действия АРВ. При этом реактивная составляющая тока статора генератора Γ_1 увеличивается на величину первой (основной) гармоники тока намагничивания $I_{\mu 1}^{(1)}$ блочного трансформатора T_1 . Поэтому поддержание заданного уровня напряжения $U_1 = const$ возможно только до нарушения одного из ограничений

$$I_{\Gamma} \leq I_{\Gamma(\text{доп})}; \quad I_f \leq I_{f(\text{доп})}, \quad (12)$$

где $I_{\Gamma(\text{доп})}$ – предельно допустимая перегрузка по току статора генератора; $I_{f(\text{доп})}$ – предельно допустимая перегрузка по току возбуждения генератора.

Разработан обобщенный сценарий реакции блока «генератор-трансформатор» на геоиндуцированные КПТ возрастающей интенсивности с учетом ограничений (12), блок-схема которого с возможными тремя вариантами изменения режима работы генератора приведена на рис. 8.



Рис. 8 – Блок-схема обобщенного сценария реакции блока «генератор-трансформатор» на увеличение геоиндуцированных КПТ

Для верификации разработанных методик оценки влияния геоиндуцированных КПТ на режимы функционирования СЭС высокоширотных регионов РФ выполнено моделирование в ПК MATLAB для СЭС Норильско-Таймырского энергорайона Красноярского края, расчетная схема фрагмента которой приведена на рис. 9. Источник геоэлектрического поля Γ_2 в модели представлен гармонической функцией. С учетом рекомендаций стандарта NERC TPL-007-4 и результатов многолетних геомагнитных наблюдений в Российской Арктике при моделировании воздействия геоиндуцированных КПТ на СЭС Норильско-Таймырского энергорайона амплитуда напряженности

геоэлектрического поля источника Γ_2 принята равной $E_{0(m)} = (3 - 8) \text{ В/км}$, частота изменений напряженности геоэлектрического поля – $f_{\text{КПТ}} = 0,05 \text{ Гц}$.

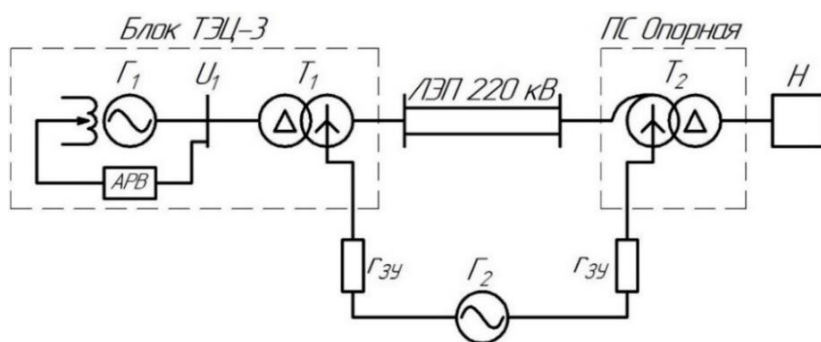


Рис. 9 – Расчетная схема фрагмента СЭС Норильско-Таймырского энергорайона Красноярского края

Результаты имитационного компьютерного моделирования при вариации значений амплитуды тестовой напряженности геоэлектрического поля источника Γ_2 $E_{0(m)} = 3, 5, 7, 8 \text{ В/км}$ представлены на рис. 10-12. Выполненное имитационное компьютерное моделирование воздействия тестового геоиндуцированного КПТ на блок «генератор – трансформатор» ТЭЦ-3 СЭС Норильско-Таймырского энергорайона позволило выявить следующие закономерности.

Происходит запаздывание процесса насыщения магнитной системы блочного трансформатора T_1 относительно момента начала тестового воздействия геоиндуцированного КПТ на СЭС высокоширотного региона РФ. Увеличение амплитуды тестовой напряженности геоэлектрического поля приводит к более быстрому переходу магнитной системы T_1 в зону технического насыщения. Насыщение магнитной системы блочного трансформатора T_1 фиксируется по появлению в составе тока нейтрали гармоник нулевой последовательности.

Для момента времени $t = 10 \text{ с}$ – момента достижения максимального значения $I_{\text{КПТ}}$ для всех значений амплитуды тестовой напряженности геоэлектрического поля источника Γ_2 магнитная система блочного трансформатора T_1 насыщена, кривые тока намагничивания имеют однополярный характер (рис. 10, а). При возрастании амплитуды напряженности геоэлектрического поля $E_{0(m)}$ одновременно с увеличением амплитуды тока намагничивания происходит увеличение фазового угла насыщения φ_ϕ . Гармонический состав тока намагничивания (рис. 10, б) представлен как нечетными, так и четными гармониками, причем появление последних служит характерным индикатором насыщения магнитной системы блочного трансформатора T_1 , но при этом изменяется процентное содержание отдельных гармоник относительно основной гармоники тока намагничивания, что отражается на величине суммарного коэффициента гармонических составляющих тока – от $THD_I = 166,49\%$ при $E_{0(m)} = 3 \text{ В/км}$ до $THD_I = 131,81\%$ при $E_{0(m)} = 8 \text{ В/км}$.

Влияние тестового геоиндуцированного КПТ на режим функционирования генератора G_1 начинается с момента насыщения магнитной системы блочного трансформатора T_1 вследствие обратной трансформации гармоник тока

намагничивания в цепи статорных обмоток, существенно искажающих синусоидальность кривой мгновенных значений статорного тока (рис. 11, а).

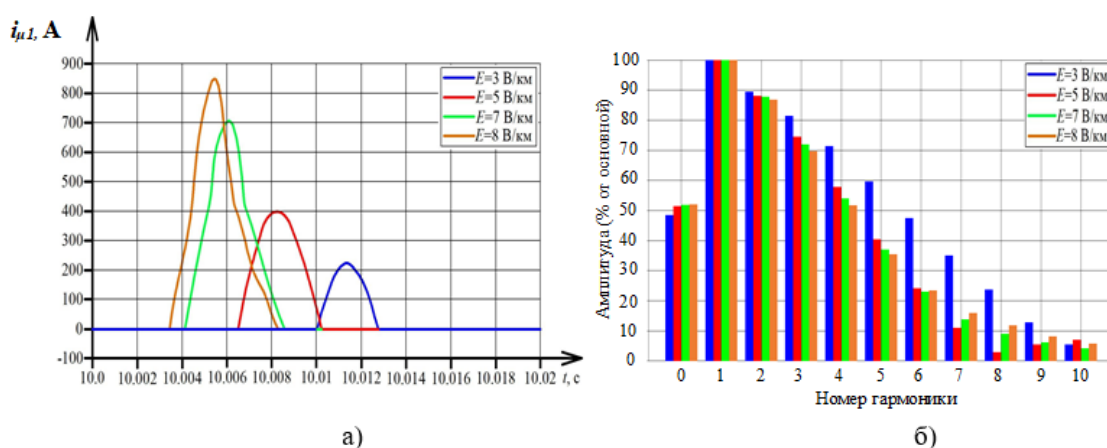


Рис. 10 – Временная диаграмма (а) и гармонический состав (б) тока намагничивания через ≈ 10 с после начала тестового воздействия геоиндуцированного КПТ

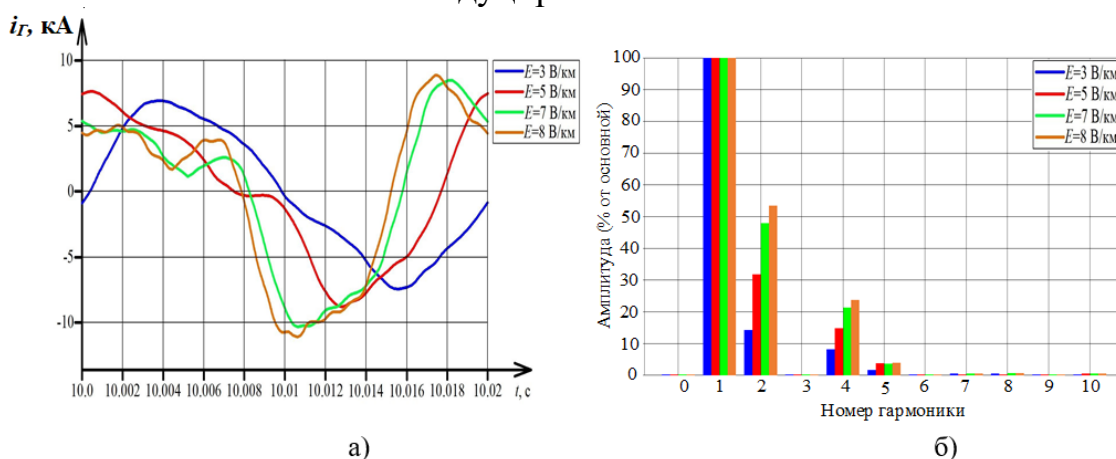


Рис. 11 – Кривые изменения (а) и гармонический состав (б) тока статора генератора Γ_1 ТЭЦ-3 через ≈ 10 с после начала тестового воздействия геоиндуцированного КПТ

Гармонический анализ статорного тока генератора Γ_1 (рис. 11, б) показал, что при всех рассмотренных вариациях амплитуды напряженности геоэлектрического поля $E_{0(m)}$ значения второй гармоники превышают длительно допустимое значение тока обратной последовательности, поэтому полученная в результате моделирования несинусоидальность статорного тока генератора Γ_1 не допустима даже при отсутствии симметричной перегрузки.

При заданных исходных условиях (коэффициент загрузки по статорному току для Γ_1 до начала воздействия тестового геоиндуцированного КПТ $k_{зГ} = 0,67$) симметричной перегрузки по току статора не возникает. Однако при $E_{0(m)} = 8$ В/км коэффициент загрузки статорного тока генератора блока достигает значения, близкого к 1,5 ($k_{зГ} = 1,48$).

При работе АРВ в режиме стабилизации напряжения U_1 на генераторных шинах выдача активной мощности в примыкающую электрическую сеть остается практически неизменной, но при этом происходит увеличение выдачи реактивной мощности генератором Γ_1 блока в 3,23 раза (рис. 12).

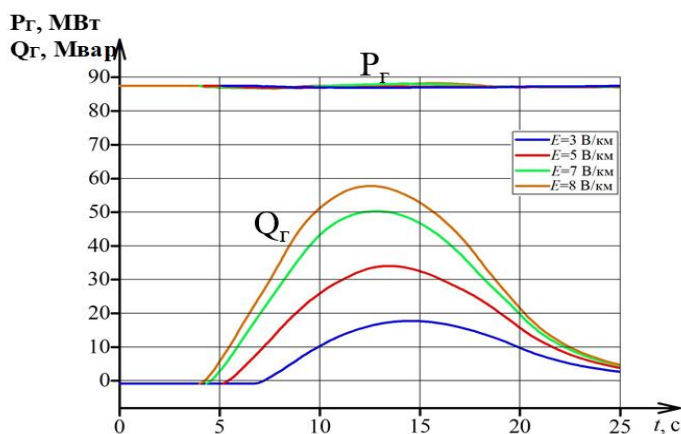


Рис. 12 – Моделирование выдачи активной и реактивной мощности генератором Γ_1 ТЭЦ-3 в режиме APB, обеспечивающем $U_1 = const$

Сопоставление результатов численного эксперимента с данными мониторинга геоиндуцированных КПТ и моделирования реальных высокоширотных СЭС, приведенных в источниках информации, свидетельствует о адекватности и корректности разработанной имитационной компьютерной модели.

Рассмотрены практические рекомендации по защите блока «генератор-трансформатор» от воздействия геоиндуцированных КПТ. Разработан способ мониторинга геоиндуцированного тока в нейтрали силового трансформатора и управления режимом заземления, который может быть рекомендован к практическому использованию на блочных трансформаторах номинальной мощностью свыше (80-100) МВА электростанций высокоширотных СЭС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате диссертационного исследования решена важная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке методики оценки влияния геоиндуцированных квазипостоянных токов на режимы функционирования систем электроснабжения высокоширотных регионов РФ.

В диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана математическая модель системы электроснабжения высокоширотного региона, позволяющая реализовать моделирование установившихся и переходных режимов функционирования при воздействии геоиндуцированных КПТ. Данная математическая модель учитывает возможность задания воздействия геоиндуцированных КПТ одновременно на все силовые трансформаторы системы электроснабжения путем дополнения стандартных моделей моделью заземляющего устройства с плавающим потенциалом и позволяет реализовать путем введения логических условий возможность изменения индуктивного сопротивления ветви намагничивания силовых трансформаторов при насыщении их магнитной системы.

2. В разработанной методике исследования процесса насыщения магнитной системы блочного трансформатора при воздействии геоиндуцированных квазипостоянных токов в качестве количественного критерия глубины насыщения магнитной системы блочного трансформатора предложено рассматривать фазовый угол насыщения φ_ϕ : при $\varphi_\phi = 0$ –

магнитная система не насыщена; $0 < \varphi_{\phi} < \pi$ – частичное насыщение магнитной системы; $\varphi_{\phi} = \pi$ – полное насыщение магнитной системы.

3. Выполнен гармонический анализ тока намагничивания при насыщении магнитной системы блочного трансформатора, вызванного воздействием геоиндуцированных КПТ. Показано, что при любой глубине насыщения магнитной системы блочного трансформатора в спектре тока намагничивания присутствуют все канонические гармоники. Исключением являются спектры гармоник при фазовом угле насыщения $\varphi_{\phi} = \pi/2$, в котором отсутствуют все нечетные гармоники тока намагничивания, и фазовом угле насыщения $\varphi_{\phi} = \pi$, при котором все высшие гармоники принимают нулевое значение.

4. Установлены диапазоны геоиндуцированного КПТ и фазового угла насыщения магнитной системы блочного трансформатора φ_{ϕ} , способные оказать заметное влияние на режим генерации реактивной мощности генератором блока. При $I_{\text{КПТ}}^* \leq 0,0047$ и $\varphi_{\phi} \leq \pi/9$ мощность намагничивания блочного трансформатора на много меньше генерации реактивной мощности в номинальном режиме и не способна оказать заметного влияния на режим генерации реактивной мощности генератором блока. При $I_{\text{КПТ}}^* \geq 0,0148$ и $\varphi_{\phi} \geq \pi/6$ мощность намагничивания блочного трансформатора становится соизмеримой с генерацией реактивной мощности генератором в номинальном режиме. При $I_{\text{КПТ}}^* \geq 0,0652$ и $\varphi_{\phi} \geq 5\pi/18$ мощность намагничивания блочного трансформатора превышает уровень генерации реактивной мощности генератором в номинальном режиме, возникает необходимость ее компенсации за счет дополнительной выработки реактивной мощности генератором блока и соответственно увеличению его перегрузки.

5. Разработан обобщенный сценарий реакции блока «генератор – трансформатор» под воздействием геоиндуцированных токов возрастающей интенсивности с учетом ограничений, налагаемых АРВ. Показаны три возможных варианта изменения режима работы генератора блока в зависимости от интенсивности геоиндуцированных КПТ, протекающих по обмоткам ВН блочного трансформатора: в I и II вариантах не происходит нарушения ограничений по току статора и току возбуждения, в III варианте – при критическом увеличении мощности намагничивания блочного трансформатора возникает перегрузка генератора блока и происходит нарушение ограничений по току статора и току возбуждения.

6. Разработана MATLAB-модель, позволяющая проводить исследования режимов функционирования систем электроснабжения высокоширотных регионов РФ при воздействии геоиндуцированных КПТ различной амплитуды и продолжительности. Адекватность и корректность разработанной MATLAB-модели подтверждена путем сопоставления результатов численного эксперимента с данными мониторинга и моделирования реальных высокоширотных систем электроснабжения различной сложности при оценке уровня опасности геоиндуцированных КПТ, приведенных в источниках информации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Вахнина, В.В. Моделирование воздействия геоиндуцированных токов на изолированную энергосистему / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, Д.А. Кретов, А.Н. Черненко, **Р.Н. Пудовинников** // Промышленная энергетика. – 2022. – №3. – С. 2-11.
2. Вахнина, В.В. Несимметричная перегрузка синхронных генераторов под воздействием квазипостоянных токов/ В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, Бычков А.В., **Р.Н. Пудовинников**, О.В. Федяй // Вопросы электротехнологии. – 2021. – №4(31). – С. 34-43.
3. Кувшинов, А.А. Линейная аппроксимация зависимости режимных параметров блочного генератора от величины квазипостоянных токов / А.А. Кувшинов, В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, А.В. Бычков, О.В. Федяй, **Р.Н. Пудовинников** // Промышленная энергетика. – 2021. – №8. – С.2-12.
4. Кувшинов, А.А. Реактивная нагрузка синхронного генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора под воздействием квазипостоянных токов / А.А. Кувшинов, В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, **Р.Н. Пудовинников** // Промышленная энергетика. – 2021. – №4. – С. 11-19.
5. Вахнина, В.В. Практический критерий устойчивости блочной электропередачи к воздействию квазипостоянных токов / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, **Р.Н. Пудовинников** // Вопросы электротехнологии. – 2021. – №2 (31). – С.42-48.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

6. Kuvshinov, A.A. Identifying operating parameters of synchronous generator that are the most sensitive to impacts of quasi-constant currents on unit transformer / A.A. Kuvshinov, A.N. Chernenko, **R.N. Pudovinnikov** // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2023 International Conference on. Moscow: Moscow Polytechnic University, 2023. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139046.
7. Vakhnina, V.V. Developing the requirements for a programming and computing suite used for the calculation of electric power system operation under natural and anthropogenic electromagnetic impacts / V.V. Vakhnina, A.N. Chernenko, **R.N. Pudovinnikov** // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022 International Conference on. Moscow: Moscow Polytechnic University, 2022. DOI:10.1109/ICIEAM54945.2022.9787200.
8. Bychkov, A. Magnetizing power at one-sided saturation of power transformers with armored magnetic system / A. Bychkov, O. Fedyai, **R. Pudovinnikov** // UralCon 2021 : Proceedings of International Ural Conference on Electrical Power Engineering. Chelyabinsk, 2021. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559599.
9. Vakhnina, V.V. Computer-assisted modeling of magnetic fluxes of power transformer affected by quasi direct currents / V.V. Vakhnina, A.N. Chernenko, **R.N. Pudovinnikov** // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021 International Conference on. Moscow: Moscow Polytechnic University, 2021. DOI:10.1109/ICIEAM51226.2021.9446288.

Публикации в других изданиях

10. Вахнина, В.В. Ранжирование значений геоиндуцированных токов по степени угрозы для режима выдачи активной мощности блоком «генератор-трансформатор» / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, **Р.Н. Пудовинников**, А.А. Тренькин, С.В. Воеводин // Физика плазмы в солнечной системе Plasma-2023 : тезисы докладов 18-ой конференции. – М.: ИКИ РАН. – С. 383.

11. Вахнина, В.В. Тестовая модель силового трансформатора с учетом насыщения его магнитной системы / В.В. Вахнина, **Р.Н. Пудовинников** // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: матер. IV Всерос. науч.-практ. конф. : сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции. – Казань: Казан.гос.энерг.ун-т, 2022. – С. 192-195.

12. Вахнина, В.В. Оценка симметричной перегрузки статора и ротора синхронного генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, **Р.Н. Пудовинников** // Федоровские чтения – 2022 : сборник трудов 52-ой Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием. – М. : Изд. дом МЭИ, 2022. – С. 154-159.

13. Вахнина, В.В. Разработка моделей генераторов электростанций / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, **Р.Н. Пудовинников**, Р.Н. Еремин // Инновационные технологии в обучении и производстве: сборник трудов XVI Всероссийской заочной научно-практической конференции. – Камышин : Камышинский технологический институт (филиал ВолГТУ), 2021. – С. 36-44.

14. Вахнина, В.В. Инженерное моделирование геоиндуцированных токов в электроэнергетических системах / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, А.А. Кувшинов, А.В. Бычков, О.В. Федяй, **Р.Н. Пудовинников** // Глобальная электрическая цепь : материалы четвертой Всероссийской конференции. – Ярославль : Филигрань, 2021. – С. 63-64.

15. Вахнина, В.В. Особенности моделирования электрических сетей при воздействии квазипостоянных токов / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, **Р.Н. Пудовинников** // Федоровские чтения – 2021 : сборник трудов LI Международной научно-практической конференции. – М. : Изд. дом МЭИ, 2021. – С. 178-183.

16. Вахнина, В.В. Несимметричная перегрузка синхронного генератора гармониками токов намагничивания блочного трансформатора при геомагнитных возмущениях / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, **Р.Н. Пудовинников** // Управление качеством электрической энергии : сборник трудов Международной научно-практической конференции PQM 2020. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. – С. 50-56.

Патенты на изобретения

17. Пат. на изобретение № 2794749, МКП H01F27/42, H02H3/20, H02H9/00, Российская Федерация. Способ мониторинга геоиндуцированного тока в нейтрали силового трансформатора и управление режимом заземления / А.А. Кувшинов, В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, Д.А. Кретов, О.В. Федяй, А.В. Бычков, **Р.Н. Пудовинников**. – №2022128555; заявл. 03.11.22; опубл. 24.04.2023.