



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Игнатьев Николай Игоревич

**Исследование и совершенствование метода
электромагнитного контроля электроэнергетического
оборудования, находящегося под рабочим напряжением**

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Владивосток
2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» на кафедре электроэнергетики и электротехники.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Силин Николай Витальевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Шишигин Сергей Леонидович
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», профессор кафедры управляющих и вычислительных систем

кандидат технических наук
Балагула Юрий Моисеевич
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем региональной экономики Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории Теоретической экономики

Ведущая организация: Институт автоматики и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится «29» января 2021 года в 12 часов на заседании диссертационного совета У.05.09.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 284).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 202_ года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Калимов Александр Гелиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований и степень её разработанности.

Системы диагностики высоковольтных установок играют важную роль в обеспечении таких качественных показателей электротехнических устройств, как надежность, безопасность, отказоустойчивость. Значимость задач по повышению эффективности диагностического контроля технического состояния оборудования в России подчеркнута в положениях о технической политике крупнейших электросетевых и электрогенерирующих компаний. Согласно этим документам, техническое диагностирование и мониторинг электросетевого оборудования в современных условиях должны проводиться в основном под рабочим напряжением без вывода оборудования из работы.

Достижение поставленных задач в первую очередь связывают с совершенствованием известных методов технического диагностирования, расширением их возможностей, разработкой новых способов, использованием новых достижений в области информационно-измерительной техники, повышением точности и глубины диагностических мероприятий. Существенные достижения в этом направлении отражены в трудах П.А. Бутырина, М.Е. Алпатова, Г.М. Михеева, М.Ю. Львова, А.Е. Монастырского, А.Г. Овсянникова, В.Н. Осотова, И.В. Давиденко, А.Н. Назарычева, А.И. Таджибаева и др. Среди зарубежных ученых, работающих в этом направлении, следует выделить R. Aggarwal, E. Lemke, J. Harley, A. Vilson, M. Muhr, R. Schwarz.

В настоящее время ведутся активные работы в области совершенствования таких диагностических методов, как хроматографический анализ растворённых в масле газов, высокочастотной рефлектометрии, частотно-диэлектрической спектроскопии, испытаний импульсным напряжением, вибрационных, акустических, электромагнитных способов контроля, методов контроля частичных разрядов и др. Вместе с тем, несмотря на определённые успехи в этих направлениях, проблемы своевременного обнаружения дефектов и мониторинга их развития, создания научно-обоснованной системы технического обслуживания и ремонта высоковольтного электротехнического оборудования (ВВЭО) продолжают оставаться актуальными.

Целью настоящей работы является исследование, совершенствование и апробация метода электромагнитного контроля ВВЭО, основанного на использовании свойств и параметров электромагнитных полей, излучаемых высоковольтным оборудованием, и расширение его возможностей для оценки технического состояния этого оборудования.

В работе поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Анализ существующих способов диагностики ВВЭО, основанных на использовании свойств измеряемых электромагнитных полей.

2. Исследование излучающих свойств ВВЭО.
3. Разработка моделей, учитывающих излучение ВВЭО, и исследование вопросов их использования для определения диагностической электромагнитной обстановки (ЭМО).
4. Совершенствование процедуры оценки технического состояния ВВЭО методом электромагнитного контроля.
5. Разработка методики электромагнитного контроля.
6. Апробация разработанной методики на электроэнергетических объектах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны модели для исследования излучающих свойств ВВЭО и оценки распределения собственного электромагнитного излучения (ЭМИ) на электроэнергетическом объекте.
2. Разработаны алгоритмы оценки диагностической ЭМО и построения информационных диаграмм распределения собственного ЭМИ ВВЭО.
3. Предложен способ оценки технического состояния ВВЭО, основанный на формировании составного эталонного спектра.
4. Предложены новые критерии оценки технического состояния ВВЭО методом электромагнитного контроля.
5. Разработан способ электромагнитного контроля, состоящий в использовании усовершенствованной методики, включающей в себя учёт диагностической ЭМО на электроэнергетическом объекте, алгоритмы повышения точности оценки технического состояния контролируемого ВВЭО, фильтрации спектральных линий, относящихся к сторонним излучениям, электромагнитную паспортизацию.
6. Проведена апробация разработанного способа электромагнитного контроля на электроэнергетических объектах.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Развиты: теория методов определения диагностической ЭМО вблизи ВВЭО, методы электромагнитного контроля, методы обработки спектров электромагнитного излучения.

Значение для практики заключается в создании способов диагностики и мониторинга технического состояния ВВЭО под рабочим напряжением без его отключения.

Разработанная методика использована на электроэнергетических объектах и может стать основой для совершенствования российских и международных нормативных документов по диагностике ВВЭО.

Методология и методы исследования.

При выполнении работы использовались основные положения теории электромагнитного поля, технической электродинамики, техники высоких напряжений,

элементы анализа электромагнитных шумов, теории фильтров, математической обработки результатов, натурные эксперименты.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований собственных электромагнитных полей ВВЭО.
2. Модели, учитывающие излучение ВВЭО различного типа, установленного на электроэнергетических объектах.
3. Процедура определения диагностической ЭМО.
4. Алгоритм выбора мест расположения измерительных антенн при проведении электромагнитного контроля.
5. Усовершенствованный способ электромагнитного контроля.
6. Результаты апробации методики электромагнитного контроля на электроэнергетических объектах

Достоверность результатов обеспечивается: корректным применением современных методов теоретической электротехники и технической электродинамики; сравнением результатов оценки технического состояния оборудования с результатами, полученными другими методами.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались (автором лично) и обсуждались на научных семинарах кафедры электроэнергетики и электротехники Дальневосточного федерального университета (Владивосток, 2016-2020 гг.), в ходе научного доклада об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (Владивосток, 2019 г.), а также на международных и российских конференциях, в том числе: на Межд. конференции «FarEastCon» (Владивосток, 2018 г.), региональной конференции «Наука, техника, промышленное производство» (Владивосток, 2017 г.), Межд. конференции «Пром-Инжиниринг 2017» (Владивосток, 2017 г.), Межд. конференциях «Современные технологии и развитие политехнического образования» (Владивосток, 2015, 2016 гг.), Всерос. конференции «Инженерные науки: актуальные проблемы и перспективы развития» (Владивосток, 2014 г.), Всерос. конференции «Гидроэлектростанции в XXI веке» (Саяногорск, Черёмушки, 2014 г.), Межрег. конференции «Энергия Евразии» (Владивосток, 2013 г.), Межд. конференции «Электроэнергетика глазами молодёжи – 2013» (Новочеркасск, 2013 г.).

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 24 работах, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 4 в изданиях, индексируемых международными наукометрическими базами (Scopus – 3; Web of Science – 1), 4 патентах на изобретения.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы использованы при оценке технического состояния высоковольтного оборудования АО «Мобильные газотурбинные электрические станции», ООО «ТранснефтьЭлектросетьСервис», филиала ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» – Приморского предприятия магистральных электрических сетей.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 134 наименования, и двух приложений. Общий объём работы составляет 173 страницы, в том числе 84 рисунка и 33 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и степень её разработанности, сформированы цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология, положения, выносимые на защиту, достоверность и апробация результатов диссертационной работы.

В первой главе проведён анализ проблем, связанных с обеспечением контроля технического состояния ВВЭО на электроэнергетических объектах. Отмечены основные этапы, преимущества и недостатки систем обслуживания оборудования по техническому состоянию. Представлены основные направления развития диагностики ВВЭО. Рассмотрены основные разновидности способов диагностики, основанных на анализе свойств измеряемых электромагнитных полей. Показано, что способ электромагнитного контроля, основанный на анализе спектральных характеристик собственного ЭМИ ВВЭО с учётом его излучающих свойств, позволяет получить оперативную информацию о техническом состоянии оборудования под рабочим напряжением.

Показано, что спектры собственного ЭМИ ВВЭО формируются в результате сложных электрофизических процессов, связанных с появлением и развитием электрических шумов в изоляции оборудования. Анализ состава спектральных линий, энергетических свойств спектров ЭМИ в определенных информационных диапазонах позволяет получить информацию об интенсивности электротермических процессов в изоляции и конструктивных элементах ВВЭО, отследить процессы их появления и развития. Суть исследуемого способа электромагнитного контроля составляет регистрация и анализ квалификационных свойств спектров собственного ЭМИ ВВЭО с целью оценки его технического состояния.

В работе определены основные задачи, решение которых позволило существенно расширить возможности и повысить точность способа электромагнитного контроля, основанного на регистрации и анализе спектров собственного электромагнитного излучения. К числу наиболее важных задач следует отнести определение диагностической электромагнитной обстановки, выбор мест расположения измерительных антенн на электроэнергетических

объектах, формирование рабочих спектров собственного ЭМИ, выявление диагностических признаков, разработку критериев оценки технического состояния, разработку и апробацию методики технического контроля.

Вторая глава посвящена вопросам определения диагностической ЭМО вблизи ВВЭО. Анализ диагностической ЭМО позволяет осуществить обоснованный выбор места расположения измерительных антенн при проведении электромагнитного контроля.

С целью определения диагностической ЭМО разработаны модели, учитывающие излучение различных единиц ВВЭО, установленных на электроэнергетических объектах. В качестве основных излучающих элементов рассматриваются вводы ВВЭО. Анализ их излучающих свойств позволяет определить частотные диапазоны, представляющие наибольшую диагностическую ценность. В моделях вводы представлены в виде штыревых вибраторных антенн. Электромагнитное поле, излучаемое вертикально расположенной штыревой антенной, имеет наибольшую интенсивность на резонансной частоте, определяемой с помощью соотношения $(f_{pi})_n = \frac{n \cdot c}{4h_i}$, где n – число натурального ряда, определяющее номер резонанса; h_i – высота излучающей части i -го ввода; c – скорость света. Штыревая антенна может быть представлена в виде набора из последовательно расположенных элементарных электрических вибраторов длиной l , для каждого из которых комплексные амплитуды векторов напряженностей поля в заданной точке, не содержащей токи и заряды (см. рисунок 1), определяют по формулам:

$$\dot{E}_{mr} = \frac{\dot{I}_m l \cos \theta}{2\pi} k^2 Z_0 \left[\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr}$$

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{\dot{I}_m l \sin \theta}{4\pi} k^2 Z_0 \left[\frac{j}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr}$$

$$\dot{H}_{m\phi} = \frac{\dot{I}_m l \sin \theta}{4\pi} k^2 \left[\frac{j}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr}$$

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$ – волновое сопротивление

свободного пространства; $k = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = \omega / c$ –

коэффициент распространения в свободном пространстве. Конфигурация поля в ближней зоне ($kr \ll 1$) имеет сложную форму, с изменением расстояния r характер убывания векторов поля претерпевает существенные изменения, поэтому результаты регистрации ЭМИ в этой зоне не обладают детерминированной ценностью. В дальней зоне ($kr \gg 1$), амплитуда напряжённости поля убывает пропорционально $1/r$. В этой зоне точность расположения измерительных

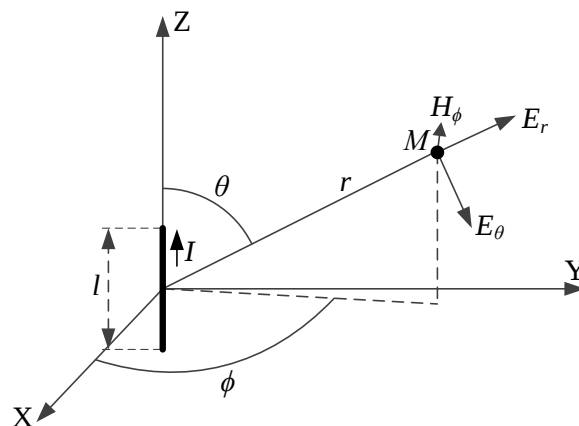


Рисунок 1 – К определению поля элементарного электрического вибратора

приборов оказывает существенно меньшее влияние на результаты измерений, чем в ближней зоне. С учётом требований электробезопасности, регистрацию ЭМИ вблизи ВВЭО в высокочастотном диапазоне целесообразно осуществлять в дальней зоне.

Одной из ключевых проблем при расчете диагностической электромагнитной обстановки является построение моделей, учитывающих излучение ВВЭО. Функционирование основного электроэнергетического оборудования всегда связано с наличием дополнительных конструкций, существенно влияющих на распределение электромагнитного поля. Поэтому в работе разработаны и представлены модели как для отдельных единиц основного оборудования, так и с учетом дополнительных конструкций. Основу каждой модели основного оборудования (силовых трансформаторов, управляемых шунтирующих реакторов, автотрансформаторов) составляют высоковольтные вводы, ввод нейтрали, основной и расширительный баки. Кроме того, в моделях учитывается влияние земли. В качестве дополнительных элементов в моделях учтены такие конструкции, как радиаторы охлаждения, спуски и присоединения к вводам, вспомогательные стойки, опоры для крепления шинпровода, конструкции системы пожаротушения, железобетонные перегородки и т.д. (рисунок 2).

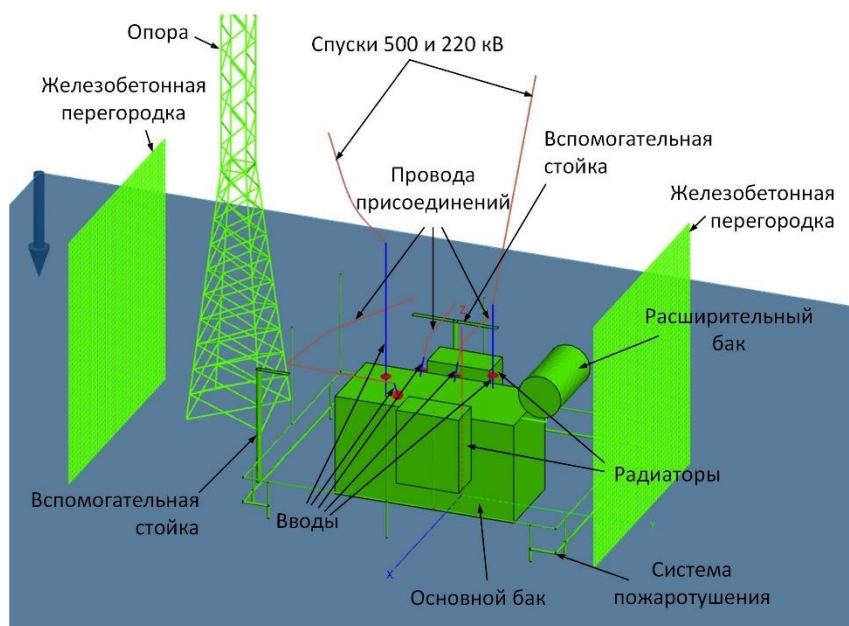


Рисунок 2 – Модель, учитывающая излучение силового автотрансформатора

Расчёт электромагнитного поля базируется на системе уравнений электромагнитного поля, решение которой относительно векторной $\vec{A}$ и скалярной U потенциальных функций, удовлетворяющих уравнениям Гельмгольца

$$\nabla^2 U + k^2 U = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{J},$$

имеет вид:

$$U(\vec{r}_0) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\vec{r}_s) \frac{e^{-jkR}}{R} dV_s, \quad \vec{A}(\vec{r}_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \vec{J}(\vec{r}_s) \frac{e^{-jkR}}{R} dV_s,$$

где $R = |\vec{r}_0 - \vec{r}_s|$ – расстояние между точкой наблюдения P и точкой расположения источника.

Вектора поля вычисляются с помощью потенциальных функций из соотношений:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad \vec{E} = \frac{1}{j\omega\mu_0\epsilon_0} \text{grad}(\text{div} \cdot \vec{A}) - j\omega\vec{A}.$$

В работе расчёт электромагнитного поля вблизи моделей, учитывающих излучение различных типов ВВЭО, выполнен в программном комплексе Altair FEKO с использованием метода моментов и методов физической оптики. Результаты расчёта представлены в виде диаграмм направленности, характеризующих распределение напряжённости электрического поля в дальней зоне излучения. В качестве примера, на рисунке 3а под номером 1 представлена диаграмма направленности, соответствующая модели на рисунке 2.

Исследования показали, что расчёт электромагнитного поля с использованием модели, учитывающей расположенные вблизи ВВЭО конструктивные элементы, может занимать достаточно много времени, что затрудняет проведение обследования в полевых условиях. В связи с этим в работе дополнительно разработаны и проанализированы модели, позволяющие оптимизировать объем и время вычислений.

Для анализа влияния расположенных рядом с ВВЭО конструкций на точность формирования диагностической ЭМО в работе использована средняя величина отклонения формы диаграмм направленности $\Delta E_{icp, \%}$:

$$\Delta E_{icp, \%} = \frac{1}{n} \sum_{\varphi} |E_{\varphi i} - E_{\varphi 0}| \cdot 100\% = \frac{1}{n} \sum_{\varphi} \Delta E_{\varphi i, \%}$$

где $E_{\varphi i}$ – нормированное значение напряжённости электрического поля i -ой модели для угла φ ; $E_{\varphi 0}$ – нормированное значение напряжённости электрического поля эталонной модели для угла φ ; n – количество рассматриваемых значений угла φ .

Сопоставление результатов численной оценки точности и продолжительности расчёта диагностической ЭМО для различных электроэнергетических объектов позволило выработать рекомендации по составу моделей. Показано, что отсутствие железобетонных перегородок в модели (номер 2 на рисунке 3) не приводит к существенной потере точности расчёта и в то же время позволяет сократить его продолжительность на 87,5%. Исследование влияния дополнительных конструкций на точность и продолжительность расчёта в остальных случаях проводилось без учёта железобетонных перегородок. Например, исключение из модели радиаторов позволяет уменьшить продолжительность расчёта на величину до 90,9%, однако это приводит к увеличению $\Delta E_{icp, \%}$ до 14,4% (номер 5 на рисунке 3б). К похожим результатам

приводит исключение по отдельности из моделей высоковольтной опоры, системы пожаротушения, вспомогательных стоек (номера 7-9 на рисунке 3б соответственно). Отсутствие в модели совокупности вышеприведённых конструкций (номер 3 на рисунке 3) приводит к уменьшению времени расчёта на 97% при увеличении значения $\Delta E_{icp, \%}$ до 17,8%. Наиболее значительное влияние на точность расчёта диагностической ЭМО оказывает учет в модели спусков и присоединений к вводам ВВЭО. Их отсутствие приводит к увеличению $\Delta E_{icp, \%}$ до 20,2% при наличии других вышеприведённых конструкций (номер 6 на рисунке 3б) и до 23,7% при отсутствии (номер 4 на рисунке 3).

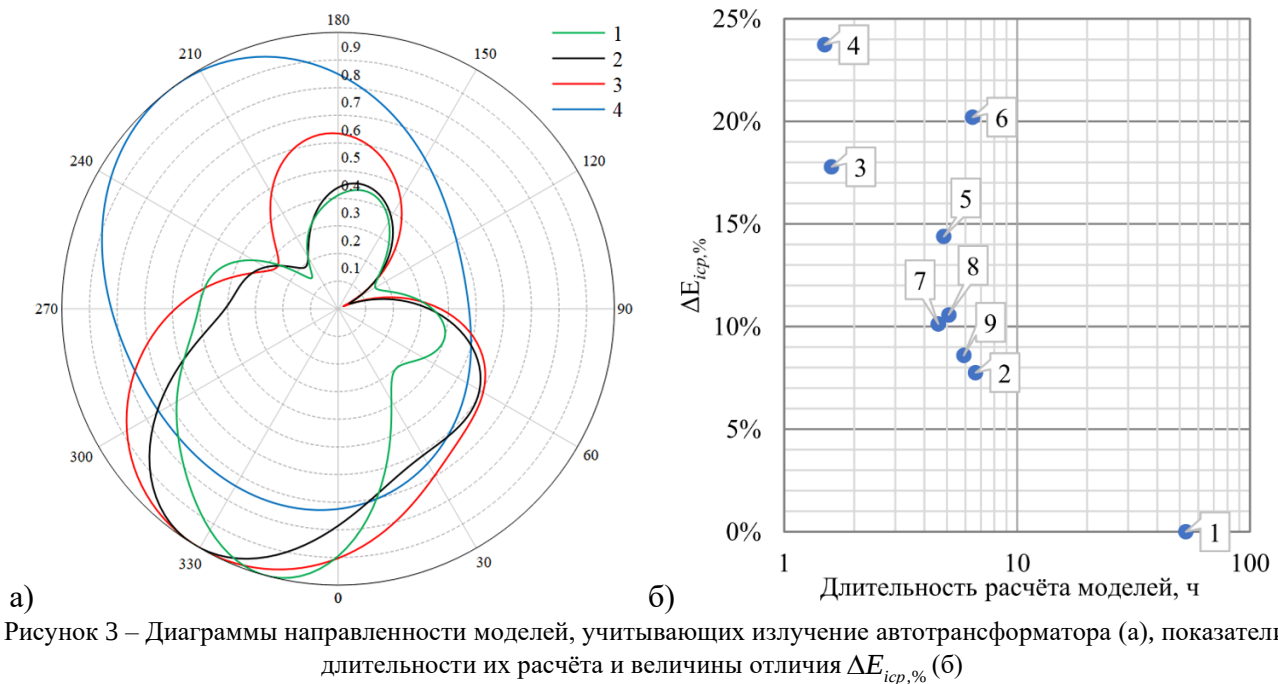


Рисунок 3 – Диаграммы направленности моделей, учитывающих излучение автотрансформатора (а), показатели длительности их расчёта и величины отлчия $\Delta E_{icp, \%}$ (б)

При разработке моделей, учитывающих излучение ВВЭО, необходимо принимать во внимание тот факт, что распределение электромагнитного поля вблизи ВВЭО зависит от места локализации дефекта. Например, при локализации дефекта во вводе одной из фаз трёхфазного трансформатора и при отсутствии других дефектов основным излучающим элементом будет являться его дефектный ввод. Для учета этого обстоятельства в работе предложена и проиллюстрирована процедура определения диагностической ЭМО, включающая в себя разработку для каждой единицы ВВЭО нескольких моделей, отличающихся частотой источника излучения и его местом расположения, расчёт электромагнитного поля и представление его в виде круговых диаграмм направленности. Круговые диаграммы направленности преобразуются в информационные, отличительной особенностью которых является отображение в виде секторов областей вблизи ВВЭО с наибольшей напряжённостью электрического поля для разных вариантов излучения его вводов. Пример сформированной по результатам расчёта электромагнитного поля информационной диаграммы для модели,

изображённой на рисунке 2, представлен на рисунке 4. Цветными линиями на диаграмме обозначены сектора, соответствующие наибольшей напряжённости электрического поля при учёте источника излучения в каждом из вводов автотрансформатора по отдельности.

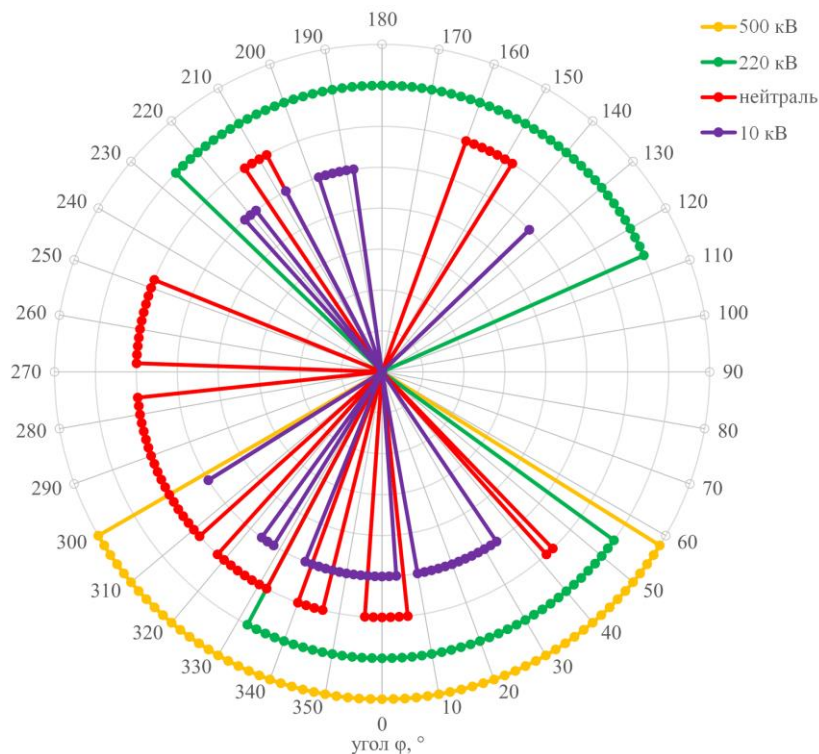


Рисунок 4 – Информационная диаграмма для выбора места расположения измерительной аппаратуры

С помощью информационных диаграмм проводится выбор места расположения измерительных антенн при выполнении мероприятий по электромагнитному контролю ВВЭО.

В **третьей главе** приведены результаты работы по совершенствованию метода электромагнитного контроля.

Основу метода составляет анализ спектров ЭМИ, зарегистрированных вблизи ВВЭО, включающий в себя в первую очередь расчёт интегральной мощности излучения в пределах информационно-частотных полос:

$$P_i = \int_{f_{in}}^{f_{ik}} S(f) df ,$$

где f_{in} и f_{ik} – границы i -ой информационной частотной полосы; $S(f)$ – спектральная плотность мощности ЭМИ. В качестве показателя технического состояния ВВЭО методом электромагнитного контроля используется коэффициент интегральной мощности $K_{ij(об)}$, представляющий собой отношение интегральной мощности спектра ЭМИ контролируемого ВВЭО P_{ij} к интегральной мощности эталонного спектра P_{i0} в логарифмическом масштабе:

$$K_{ij(\partial B)} = 10 \lg \frac{P_{ij}}{P_{i0}}.$$

В качестве эталонной интегральной мощности P_{i0} принимается наименьшее значение интегральной мощности среди спектров ЭМИ ВВЭО рассматриваемого типа в пределах i -ой информационной частотной полосы. При контроле однотипного оборудования, в составе которого все единицы имеют повышенную дефектность, такой подход может привести к существенным погрешностям. Для решения этой проблемы в работе предложен способ оценки технического состояния, основанный на формировании составного эталонного спектра.

Построение составного эталонного спектра выполняется путём выделения из зарегистрированных спектров ЭМИ однотипного оборудования наименьших значений спектральной плотности для каждой измеренной частоты и формирования из этих значений единого эталонного спектра с сохранением соответствия между выбранными значениями и принадлежащими им частотами. Исследования показали, что применение составного эталонного спектра позволяет увеличить точность определения технического состояния контролируемого ВВЭО до 12%.

При проведении электромагнитного контроля существенное значение имеет исключение сторонних излучений в регистрируемых вблизи ВВЭО спектрах ЭМИ. Применение известных способов (таких как использование направленных и поляризационных свойств антенны, выделение информационных частотных полос, определение уровня внутренних помех измерительной аппаратуры, внешнего фона, применение временной и пространственной селекции и др.) не позволяет в полной мере решить эту проблему. В работе предложено применение рекурсивного фильтра второго порядка:

$$y_i = \begin{cases} y_{i-1} + \frac{x_i - y_{i-1}}{\sqrt{1 + (\frac{x_i - y_{i-1}}{A \cdot \Delta f})^{2n}}}, & x_i - y_{i-1} > 0, \\ x_i, & x_i - y_{i-1} \leq 0, \end{cases}$$

где x_i и y_i – i -ые значения исходного спектра и конечного спектра соответственно; $A = 8$ – коэффициент; Δf – частотный интервал между соседними значениями спектра, МГц; $n = 2$ – порядок фильтра. Применение предложенного фильтра позволяет устранить спектральные линии, относящиеся к сторонним излучениям, представить спектры в виде, удобном для дальнейшего анализа. В качестве примера на рисунке 5 изображены спектры ЭМИ силового трансформатора до и после фильтрации исходного спектра.

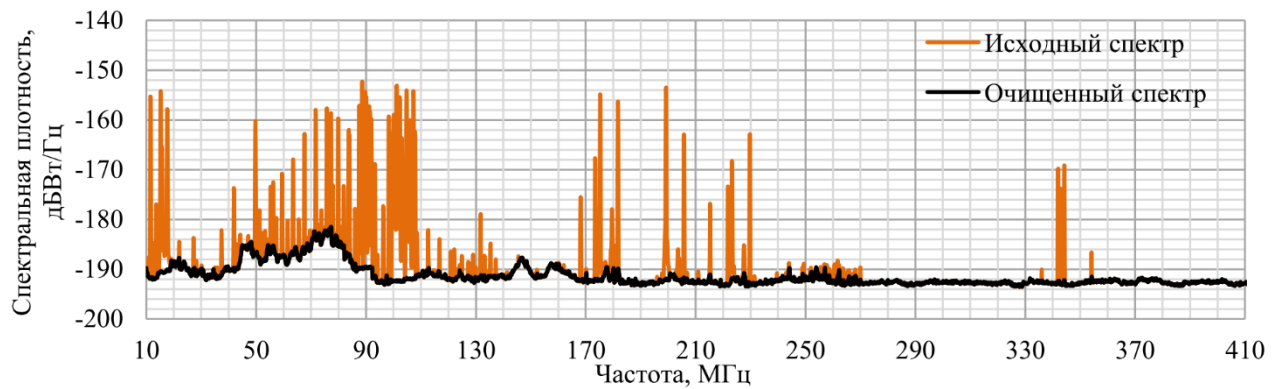


Рисунок 5 – Спектр электромагнитного излучения до и после применения фильтра

С целью повышения качества диагностирования в работе предложены два критерия оценки технического состояния ВВЭО методом электромагнитного контроля. Первый критерий – превышение по крайней мере одним из коэффициентов интегральной мощности $K_{ij(дБ)}$ определённого порогового значения. Использование этого критерия позволяет своевременно обнаружить дефект при наличии соответствующего ему ЭМИ от малого количества вводов контролируемого ВВЭО. Второй критерий – превышение эффективным значением коэффициента интегральной мощности $K_{эфj(дБ)} = \sum_i K_{ij(дБ)}$ порогового значения, вычисляемого с учётом количества используемых информационных частотных диапазонов. Применение данного критерия позволяет своевременно обнаружить дефект, ЭМИ которого наблюдается на частотах излучения вводов разного напряжения контролируемого ВВЭО. Таким образом, использование разработанных критериев позволяет своевременно обнаружить дефект как при его концентрации в отдельной части контролируемого ВВЭО, так и при рассредоточении в объёме корпуса.

Возможности диагностического контроля существенно повышаются при введении электромагнитной паспортизации контролируемого оборудования. Электромагнитная паспортизация оборудования на различных этапах эксплуатации позволяет как отслеживать изменения в техническом состоянии, так и проводить ранжирование однотипного оборудования. Применение электромагнитных паспортов наиболее эффективно в том случае, когда они включают в себя информацию о квалификационных свойствах спектров, контролируемом оборудовании и месте его расположения, показателях режима работы, расположении и составе измерительной аппаратуры, погодных условиях. Разработанная и представленная в работе форма электромагнитного паспорта предусматривает использование всей вышеперечисленной информации, а также результатов оценки технического состояния ВВЭО.

В четвёртой главе приведены методика электромагнитного контроля и результаты её применения при обследовании различных типов ВВЭО.

Разработанная методика характеризуется повышенной точностью проведения оценки технического состояния ВВЭО, поскольку включает в себя предложенные в данной работе алгоритм выбора мест расположения измерительных антенн при проведении электромагнитного контроля, формирование составного эталонного спектра, фильтрацию исходных спектров, вычисление специальных критериев степени дефектности оборудования, электромагнитную паспортизацию.

Обследования ВВЭО проводились с целью раннего обнаружения развивающихся дефектов. Выбор мест для размещения измерительной аппаратуры проводился с учетом результатов анализа диагностической ЭМО. Исследование диагностической ЭМО стационарных трансформаторов и автотрансформаторов показало целесообразность размещения аппаратуры в одной точке, в то время как для трансформаторов мобильных подстанций – в трёх точках.

Оценка технического состояния проводилась на основе расчета и анализа как значений, так и динамики изменения коэффициентов интегральной мощности. Результаты пяти обследований методом электромагнитного контроля силовых однофазных автотрансформаторов 500 кВ (рисунок 6) позволили выявить факт появления и развития дефекта в фазе А.

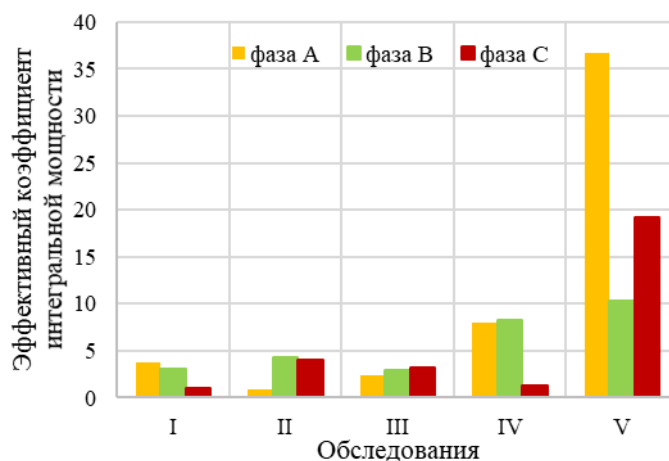
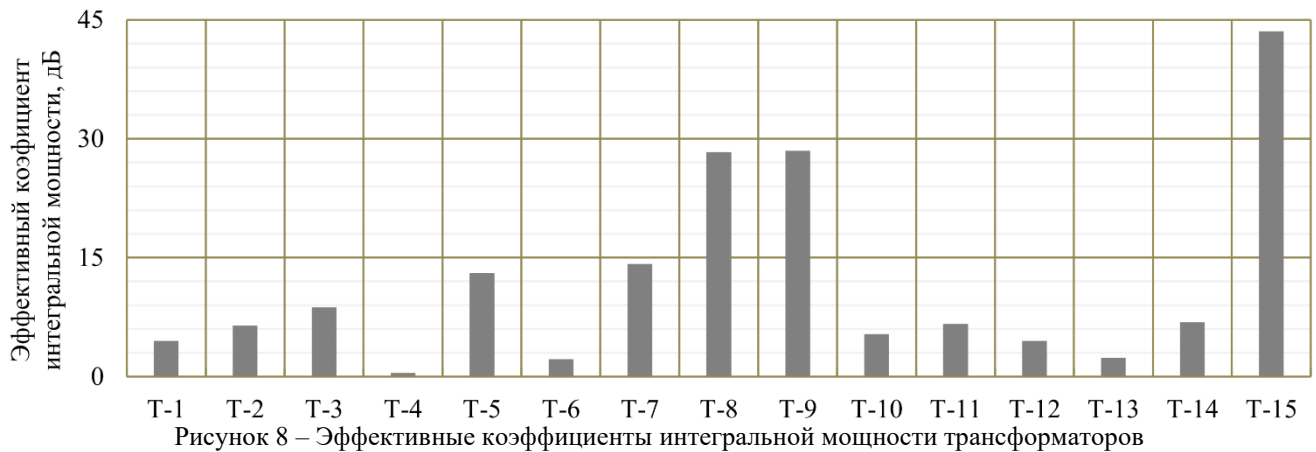
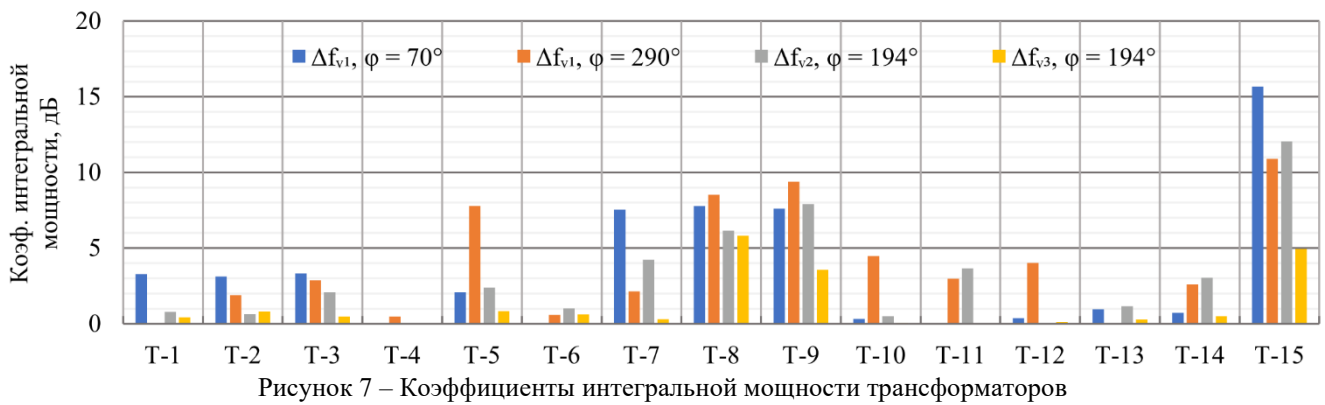


Рисунок 6 – Динамика изменения эффективного коэффициента интегральной мощности однофазных автотрансформаторов

Анализ результатов, полученных в ходе обследования методом электромагнитного контроля пятнадцати силовых трансформаторов 110 кВ, установленных на мобильных подстанциях, по отдельным коэффициентам интегральной мощности (рисунок 7) и по эффективным коэффициентам интегральной мощности (рисунок 8) позволил подтвердить надёжную работу большей части трансформаторов и выявить несколько единиц с дефектами на разных стадиях развития.



Полученные выводы согласуются с результатами физико-химического анализа масла, хроматографического анализа растворённых в масле газов, контроля тока утечки по высоковольтным вводам.

Обработка и систематизация полученного материала выполнялась с использованием специально разработанной базы данных, включающей в себя квалификационные характеристики спектров ЭМИ ВВЭО, параметры работы и основные технические характеристики контролируемого оборудования, результаты обследований, полученные другими диагностическими методами.

Заключение

1. Проанализированы достоинства и недостатки способов диагностики ВВЭО, основанных на использовании свойств измеряемых электромагнитных полей. Показана перспективность использования для целей непрерывного дистанционного контроля ВВЭО метода, основанного на анализе спектров собственного электромагнитного излучения. Исследованы способы повышения эффективности метода электромагнитного контроля ВВЭО и расширения его возможностей в области оценки технического состояния оборудования.

2. Разработаны модели, учитывающие излучение ВВЭО, и исследованы особенности их использования для оценки распределения собственного ЭМИ вблизи оборудования. Обоснованы оптимальные варианты моделей с точки зрения обеспечения требуемой точности и

объема вычислений, позволяющие определить диагностическую ЭМО при проведении электромагнитного контроля.

3. Разработан алгоритм выбора мест расположения измерительных антенн при проведении электромагнитного контроля. Обоснована целесообразность включения в состав алгоритма процедуры определения диагностической ЭМО и формирования информационных диаграмм. Алгоритм позволяет обеспечить качественную регистрацию спектров собственного ЭМИ ВВЭО.

4. Усовершенствована процедура оценки технического состояния ВВЭО. Включение в процедуру таких этапов, как формирование составного эталонного спектра, фильтрация исходных спектров, вычисление специальных критериев степени дефектности оборудования, электромагнитная паспортизация, существенно повышает точность диагностирования.

5. Разработана методика электромагнитного контроля, отличающаяся повышенной точностью оценки технического состояния ВВЭО. Повышение точности обусловлено включением в методику алгоритма выбора мест расположения измерительных антенн и совершенствованием процедуры оценки технического состояния.

6. Проведена оценка технического состояния различных типов ВВЭО действующих электроэнергетических объектов с использованием разработанной методики. Сравнение результатов обследований с данными, полученными с помощью других методов диагностики, подтвердило работоспособность и эффективность разработанной методики.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК

1. Коровкин, Н.В. Совершенствование метода электромагнитного контроля высоковольтного оборудования / Н.В. Коровкин, Н.И. Игнатьев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2019. – №1. – С. 100-108.

2. Игнатьев, Н.И. К вопросу шумовой диагностики высоковольтного оборудования / Н.И. Игнатьев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т.20. – №1-2. – С. 100-110.

3. Клоков, В.В. Шумовая диагностика электротехнического оборудования морского транспорта / В.В. Клоков, В.Л. Лосев, Н.И. Игнатьев, Н.В. Силин // Морские интеллектуальные технологии. Санкт-Петербург: Моринтех. – 2015. – №3(29). – Т.1. – С. 142-147.

4. Туркин, Д.Г. Формирование спектральных диапазонов распространения и туннелирования волн в градиентных диэлектрических плёнках / Д.Г. Туркин, Н.И. Игнатьев, В.В. Шевель, Е.И. Волокитин // Естественные и технические науки. Москва: Спутник+. – 2015. – №11 (89). – С. 74-79.

Публикации в научных изданиях, индексируемых международными наукометрическими базами Scopus и Web of Science

5. Ignatev, N.I. Simulation of high-voltage equipment electromagnetic radiation / N.I. Ignatev, N.V. Silin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №643 – 012015. – DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012015.

6. Павленко, С.В. Применение прогрессивных методов диагностики высоковольтного энергетического оборудования / С.В. Павленко, Н.В. Силин, Н.И. Игнатьев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2018. – Т.8. – №1. – С. 92-101. – DOI: 10.28999/2541-9595-2018-8-1-92-101.

7. Silin, N.V. Advanced electromagnetic control method of transformer equipment / N.V. Silin, N.I. Ignatev, D.V. Kalmykov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg. – 2017. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076269.

8. Silin, N.V. High-voltage equipment electromagnetic control / N.V. Silin, N.I. Ignatiev, N.V. Korovkin, I.V. Filimonov // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Art. no. 6653418. – P. 850-853.

Патенты на изобретения

9. Пат. 2589303 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Способ контроля технического состояния электроэнергетического оборудования / В.Л. Лосев, Д.Г. Шевердин, В.В. Клоков, Н.И. Игнатьев, Н.В. Силин; заявитель и патентообладатель Дальневосточный институт коммуникаций. – №2015121890/28; заявл. 08.06.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. №19. – 15 с.: ил.

10. Пат. 2610823 Российская Федерация, МПК G01R 31/02. Способ контроля технического состояния электроэнергетического оборудования / В В.Л. Лосев, Д.Г. Шевердин, В.В. Клоков, Н.И. Игнатьев, Н.В. Силин; заявитель и патентообладатель Дальневосточный институт коммуникаций. – №2015157339; заявл. 30.12.2015; опубл. 15.02.2017, Бюл. №5. – 22 с.: ил.

11. Пат. 2610854 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Способ дистанционного контроля технического состояния электроэнергетического оборудования / В.Л. Лосев, Д.Г. Шевердин, В.В. Клоков, Н.И. Игнатьев, Н.В. Силин; заявитель и патентообладатель Дальневосточный институт коммуникаций. – №2015157414; заявл. 31.12.2015; опубл. 16.02.2017, Бюл. №5. – 20 с.: ил.

12. Пат. 2611554 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Способ контроля технического состояния электроэнергетических объектов / В.Л. Лосев, Д.Г. Шевердин, В.В. Клоков, Н.И. Игнатьев, Н.В. Силин; заявитель и патентообладатель Дальневосточный институт коммуникаций. – №2015152372; заявл. 07.12.2015; опубл. 28.02.2017, Бюл. №7. – 15 с.: ил.

Прочие работы по теме диссертации

13. Павленко, С.В. Опыт применения электромагнитного контроля для технического диагностирования электроэнергетического оборудования ООО «ТранснефтьЭлектросетьСервис» / С.В. Павленко, Н.И. Игнатьев, Н.В. Силин // Современные технологии и развитие политехнического образования: международная научная конференция, Владивосток. – 2016. – С. 360-361.

14. Силин, Н.В. Advances in interpretation of electromagnetic control results from high-voltage power equipment / Н.В. Силин, Н.И. Игнатьев // Современные технологии и развитие политехнического образования: международная научная конференция, Владивосток. – 2016. – С. 387-390.

15. Турнаев, М.А. Моделирование электромагнитной обстановки в программных пакетах MMANA-GAL и Elcut / М.А. Турнаев, Н.И. Игнатьев // Электроэнергетика глазами молодёжи : материалы VII Международной научно-технической конференции, 19-23 сентября 2016. В 3 т. – Т 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. – 2016. – С. 409-412.

16. Игнатьев, Н.И. Направления развития метода электромагнитного контроля высоковольтного электротехнического оборудования / Н.И. Игнатьев, М.А. Турнаев // Электроэнергетика глазами молодёжи : материалы VII Международной научно-технической конференции, 19-23 сентября 2016. В 3 т. – Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. – 2016. – С. 147-150.

17. Игнатьев, Н.И. Совершенствование методов обследования трансформаторного оборудования / Н.И. Игнатьев, Н.В. Силин, В.Л. Лосев, Д.В. Калмыков // Современные технологии и развитие политехнического образования: международная научная конференция. Владивосток: Дальневосточный Федеральный университет. – 2015. – С. 539-543.

18. Игнатьев, Н.И. Динамика изменения спектров электромагнитного излучения силового автотрансформатора / Н.И. Игнатьев // Инженерные науки: актуальные проблемы и перспективы развития: материалы всероссийской научно-практической конференции молодых учёных. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет. – 2014. – С. 156-159.

19. Игнатьев, Н.И. Оценка состояния основных конструктивных элементов силовых автотрансформаторов методом электромагнитного контроля / Н.И. Игнатьев // Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды V международной конференции. Томск. – 2014. – Т.2. – С. 156-160.

20. Игнатьев, Н.И. Электромагнитный контроль технического состояния трансформаторного оборудования гидроэлектростанций / Н.И. Игнатьев, А.В. Тишкин // Гидроэлектростанции в XXI веке: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Саяногорск; Черёмушки: Сибирский федеральный университет. – 2014. – С. 165-168.

21. Игнатьев, Н.И. Спектры электромагнитного излучения однотипных автотрансформаторов / Н.И. Игнатьев // Энергия Евразии : материалы научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Владивосток: ДВФУ, 2014. – С. 21-23.

22. Игнатьев, Н.И. Электромагнитная диагностика автотрансформаторов подстанции 220 кВ / Н.И. Игнатьев, И.В. Филимонов // Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды IV международной научно-технической конференции. Новочеркасск: Лик, 2013. – Т.1. С. 478-481.

23. Силин, Н.В. Современные методы диагностики высоковольтного электрооборудования: состояние и направления развития / Н.В. Силин, Н.И. Игнатьев, В.В. Филимонов // Вологдинские чтения: материалы научной конференции. – Вып. 81. – Владивосток: Издательский дом ДВФУ. – 2013. – С. 172-174.

24. Игнатьев, Н.И. Информационные системы диагностики высоковольтного оборудования / Н.И. Игнатьев // Материалы международного научного форума студентов, аспирантов и молодых учёных стран АТР. Владивосток. – 2012. – Т. 1. – С. 383-387.