

На правах рукописи

СИЛИН Николай Витальевич

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗЛУЧАЕМОГО ИМ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность: 05.09.05 « Теоретическая электротехника »

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Дальневосточный государственный технический университет (ДВПИ им. В.В.Куйбышева)», г. Владивосток

Научный консультант: доктор технических наук,  
профессор  
Киншт Николай Владимирович,

Официальные оппоненты: действительный. член АЭН РФ,  
доктор технических наук  
Алпатов Михаил Евгеньевич  
  
доктор технических наук  
Таджибаев Алексей Ибрагимович  
  
доктор технических наук,  
профессор  
Титков Василий Васильевич

Ведущая организация: Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» Приморское  
предприятие магистральных электрических  
сетей (г. Владивосток)

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2009 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г.Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, главное здание, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент

Журавлева Н.М.

## Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы.** Интенсивное использование разнообразных электротехнических устройств, в частности, высоковольтных установок, во многих сферах жизни и деятельности человека характеризуется рядом особенностей, а именно, повышенной ответственностью выполняемых функций и высокой ценой отказа. Эти обстоятельства вынуждают уделять повышенное внимание обеспечению таких качественных показателей функционирования электротехнических устройств, как надежность, безопасность, отказоустойчивость.

Поиск компромисса между желанием снизить ущерб от аварийных ситуаций за счет обеспечения надежности работы электроэнергетического оборудования и потребностью в уменьшении величины среднегодовых затрат на поддержание его в работоспособном состоянии с требуемым уровнем надежности становится особенно актуальным.

Значимость задач обеспечения энергетической безопасности, а также оптимизации и повышения эффективности технологического процесса выработки и распределения электрической энергии, нашло в нашей стране отражение в Федеральном законе «О техническом регулировании», в принятой Правительством РФ «Энергетической стратегии России на период до 2020 года», в концепции диагностики электротехнического оборудования подстанций и линии передачи электрических сетей ОАО «ФСК ЕЭС » и в некоторых других директивных документах.

Основным принципом новых технологий управления техническим состоянием электроэнергетического оборудования является обеспечение надежности функционирования электроэнергетических объектов, предусматривающее контроль и оценку технического состояния без вмешательства в технологический процесс. Получение информации как о наличии дефекта, так и о динамике его развития на ранних стадиях этих процессов позволяет повысить эффективность процедуры контроля и технического диагностирования электротехнического оборудования. С учетом результатов такого контроля испытания, определенные нормативным документом «Объем и нормы испытаний электрооборудования » РД 34.45-51.300-97, можно проводить по мере необходимости и в том объеме, который позволяет определить ресурс работоспособности оборудования. На практике периодичность межремонтного контроля в основном устанавливается техническим руководителем электроэнергетического предприятия с учётом условий и опыта эксплуатации, технического состояния и срока службы электрооборудования.

С 1993 года началось активное обсуждение проблем непрерывного контроля на сессиях СИГРЭ, где представители крупнейших энергосистем мира представили свои тех-

нические предложения по «On-line мониторингу». С 1995 года эти проблемы были в центре внимания ряда международных симпозиумов и конференций, где в результате обмена опытом специалисты разных стран пришли к выводу о необходимости разработки новых систем непрерывного контроля и диагностики.

Разнообразие методов и средств, предназначенных для этих целей, требуют глубоких теоретических и экспериментальных исследований, анализа полученных результатов, сравнения их эффективности, разработки рекомендаций по выбору наиболее целесообразного комплекса контрольно-диагностических мероприятий. Работы в этом направлении интенсивно велись в научной школе академика К.С. Демирчяна и нашли отражение в работах Ю.П. Аксенова, Б.А. Алексеева, М.Е. Алпатова, А.В. Бондаренко, П.А. Бутырина, В.П. Вдовико, Л.В. Данилова, В.Ф. Дмитрикова, Н.В. Киншта, Н.В. Коровкина, Г.С. Кучинского, М.Ю. Львова, А.Е. Монастырского, А.Г. Овсянникова, В.Н. Осотова, Г.В. Попова, Г.Е. Пухова, В.А. Савельева, В.В. Соколова, А.И. Таджибаева, М.А. Шакирова и др. Среди зарубежных ученых, работающих в этом направлении, следует выделить R. Aggarwal, E. Lemke, J. Harley, A. Vilson.

Мероприятия по разработке методов текущего контроля могут быть реализованы только на основе использования богатого материала в области теоретической электротехники. Известно, что в настоящее время в области теоретической электротехники накоплен большой запас знаний об электрофизических процессах, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований в конкретных электротехнических, электроэнергетических и электрофизических устройствах и системах.

Для высоковольтного электроэнергетического оборудования (ВВЭО) проблема контроля и технического диагностирования стоит особенно остро из-за большой ответственности выполняемых им функций. Успех ее решения во многом зависит от выбора контролируемых параметров, умения предсказать возможный момент отказа на основании анализа числовых критериев. При разработке методов текущего контроля наиболее перспективными считаются методы, основанные на возможности ранней диагностики. Однако их перечень в настоящее время крайне ограничен. Существенное влияние на эффективность методов контроля оказывает наличие возможности их технической реализации, широкого использования стандартных метрических средств, простоты обслуживания.

Таким образом, разработка универсальных и простых методов контроля и технического диагностирования ВВЭО под рабочим напряжением является весьма актуальной.

Диссертационная работа является развитием важных научных направлений теоретической электротехники и посвящена разработке методов контроля и технического диагностирования электротехнических устройств на примере высоковольтного оборудования.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов оценки технического состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам излучаемого им электромагнитного поля, позволяющего осуществлять текущий контроль и выявлять дефекты на ранней стадии их появления и развития.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач.

1. Разработка основных положений электромагнитного способа оценки технического состояния высоковольтного оборудования на основе регистрации и анализа спектров его собственного электромагнитного излучения (ЭМИ).
2. Разработка методики регистрации спектров ЭМИ и методических указаний по техническому диагностированию высоковольтного оборудования, находящегося под рабочим напряжением.
3. Разработка численных критериев оценки технического состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования на основе анализа спектров его собственного электромагнитного излучения.
4. Проведение натурных испытаний на электроэнергетических объектах с целью подтверждения правомерности основных положений электромагнитного способа ранней диагностики высоковольтного оборудования.
5. Разработка принципов информационно-технического обеспечения электромагнитного способа ранней диагностики ВВЭО.
6. Разработка принципов формирования архивов и базы данных спектров собственного ЭМИ ВВЭО.

**Методы исследования.** Основу методологии работы составляют положения теоретической электротехники и радиотехники, теории шумов, техники высоких напряжений, методы математической обработки результатов, методы цифровой обработки сигналов, методы создания архивов и баз данных, а также натурные эксперименты.

Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, использованы:

- фундаментальные положения теоретической электротехники, изложенные в трудах Л.Р. Неймана, К.С. Демирчяна, П.А. Бутырина, П.Н. Матханова;
- базовые положения техники высоких напряжений, изложенные в трудах М.В.Костенко, Г.Н. Александрова, Н.Н. Тиходеева;
- принципы диагностики высоковольтного электроэнергетического оборудования, построенные на анализе электромагнитных излучений, развиваемые в трудах Н.В. Киншта, М.А. Каца, Н.В. Коровкина;
- методы расчета электромагнитных полей с помощью теории аналоговых цепных схем, рассмотренные в трудах В.М. Юринова, А.И. Инкина;

- базовые положения теории антенн, изложенные в трудах Г.З. Айзенберга, Д.И. Воскресенского, Г.Н. Кочержевского;
- основы теории электромагнитных шумов, представленные в трудах Ван дер Зила, В.Л. Лосева,
- теория частичных разрядов, изложенная в трудах Г.И. Сканава, П.М. Сви, Г.С. Кучинского, А.Е. Монастырского;
- принципы новой технологии управления техническим состоянием электроэнергетических объектов, рассмотренные в трудах Н.Н. Тиходеева, О.В. Абрамова, Б.В. Ефимова.
- опыт комплексной диагностики высоковольтного оборудования, содержащийся в работах А.Г. Овсянникова, В.В. Соколова, Б.А. Алексеева, М.Е. Алпатова, А.И. Таджикибаева.

**Объектом исследования** является высоковольтное электротехническое оборудование различных классов напряжения как вводимое в работу (с целью паспортизации), так и находящееся в эксплуатации. Первоочередное внимание следует обращать на оборудование, отслужившее гарантийный срок и для которого рекомендуется учащенный контроль под рабочим напряжением. Тщательному контролю подлежат наиболее ответственные единицы электроэнергетического оборудования, такие, как силовые трансформаторы, трансформаторы тока и напряжения, реакторы.

**Предметом исследования** являются собственные электромагнитные излучения высоковольтного электроэнергетического оборудования, а именно, его спектральные характеристики, в том числе интегральные мощности квазигармонических электромагнитных колебаний в информативных частотных полосах энергетических спектров излучений.

**Научная новизна.** К основным научным результатам, которые получены лично автором, включены в диссертацию и представляются к защите, относятся следующие положения:

1. Базовые принципы контроля электротехнического оборудования на основе анализа спектров его собственного электромагнитного излучения.
2. Закономерности спектрального состава собственного электромагнитного излучения высоковольтного оборудования и анализ его излучающих свойств.
3. Методика определения информативных частотных диапазонов, в пределах которых можно эффективно проводить контроль высоковольтного оборудования под рабочим напряжением.
4. Методика регистрации спектров собственного электромагнитного излучения вблизи электротехнического оборудования и рекомендации по формированию мобильных и стационарных информационно-измерительных комплексов.

5. Базовая диагностическая информация о спектрах электромагнитного излучения при наличии в высоковольтном оборудовании дефектов термоэлектрического характера.
6. Методика оценки технического состояния высоковольтного оборудования под рабочим напряжением на основе анализа спектров собственного электромагнитного излучения.
7. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов распространения электромагнитных полей на территориях открытых электроэнергетических объектов, а также рекомендации по выбору частотных диапазонов и размещению измерительных комплексов.
8. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов распространения электромагнитных полей в закрытых распределительных устройствах.
9. Критерии оценки технического состояния, позволяющие осуществлять контроль действующего электротехнического оборудования на основании анализа различных характеристик спектров электромагнитного излучения.
10. Принципы формирования архива и базы данных спектров собственного электромагнитного излучения высоковольтного оборудования.
11. Результаты эффективного многолетнего электромагнитного контроля высоковольтного оборудования на подстанциях Дальнего Востока.

**Преимущества и практическая ценность** разработанного способа контроля ВВЭО определяются следующими его особенностями:

1. Контроль осуществляется дистанционно, под рабочим напряжением, без вмешательства в технологический процесс.
2. Собственное электромагнитное излучение передает информацию о состоянии оборудования непрерывно, его регистрацию можно осуществлять в любое время года.
3. Не требуется разрабатывать специальные устройства по измерению и анализу спектров.
4. Контроль оборудования осуществляется с обеспечением условий электробезопасности.
5. Незначительные финансовые затраты.
6. Дефект фиксируется на ранней стадии его появления и развития.
7. Чувствительность способа к дефектам значительно превышает чувствительность известных методов контроля.

Таким образом, полученные в диссертационной работе результаты дают основание рекомендовать к практическому применению способ оценки технического состояния электротехнического оборудования, позволяющий:

- осуществлять текущий контроль технического состояния высоковольтного оборудования, выявляя факт появления и развития дефектов на ранней стадии;
- проводить ранжирование однотипного оборудования под рабочим напряжением;
- оценивать степень опасности развития дефектов;
- повысить эффективность диагностики ВВЭО под рабочим напряжением, своевременно указывать на необходимость комплексного обследования;
- проводить паспортизацию оборудования перед вводом его в эксплуатацию.

**Достоверность результатов.** Изложенные в диссертационной работе научные положения, полученные результаты и выводы достоверны. Достоверность обеспечивается

- применением фундаментальных законов и методов теории электрических цепей, теории электромагнитного поля, теории антенн, методов вычислительной математики;
- сравнением результатов контроля с данными, полученными с помощью известных методов комплексной диагностики высоковольтного электроэнергетического оборудования;
- сравнением результатов расчета распределения электромагнитного поля на электроэнергетическом объекте с экспериментальными данными;
- широким обсуждением основных результатов работы на семинарах кафедры ТОЭ Дальневосточного государственного технического университета, лаборатории электрофизики и электроэнергетики института автоматики и процессов управления ДВО РАН, кафедры ТОЭ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кафедры ТОЭ Московского энергетического института, на всесоюзных, всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на шести Международных, а также семи Российских симпозиумах и конференциях. В том числе на IV, V, VI, VII Международных симпозиумах «Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология» (Санкт-Петербург 2001, 2003, 2005, 2007 гг.), Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости (Вроцлав, 2000), Международном симпозиуме «Евроэлектромагнетизм» (Магдебург, 2004), Международном симпозиуме «Прогресс в электромагнитных исследованиях» (Пиза, 2004), Международной конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность» (Санкт-Петербург, 2002), на I, II, III всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность исследование энергоресурсов» (Благовещенск, 2001, 2003, 2005), Международной конференции «Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России» (Санкт-Петербург, 2002).



**Публикации.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 34 печатных работах, в том числе в 20 статьях ( из них 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК), 13 научных докладах, 1 патенте.

**Личное участие автора в проведении исследований и полученных результатах**

На всех этапах выполнения научно-исследовательской работы и получения результатов, приведенных в диссертации, личное участие соискателя выразалось в разработке базовых излучающих моделей высоковольтного оборудования, постановке и решении задач излучения и распространения электромагнитного поля на реальном электроэнергетическом объекте, создании методики регистрации спектров электромагнитного излучения, разработке методики оценки технического состояния оборудования по спектрам излучаемого им электромагнитного поля, экспериментальном обследовании спектрального состава электромагнитного поля на действующих подстанциях «Дальневосточная», «Чугуевка-2», Порт Восточный, Приморская и других, разработке принципов формирования информационно-измерительных комплексов и баз данных спектров электромагнитного излучения.

**Реализация исследований и предложения об использовании.** Результаты диссертационной работы внедрены и нашли практическое использование на ряде электрических станций и подстанций. Разработанные научные положения, способы, методики, программы могут быть полезны специалистам, занимающихся эксплуатацией и диагностикой ВВЭО.

Кроме того, результаты диссертационной работы могут быть использованы при:

- пересмотре устаревшей и разработке новой нормативно-методической документации по вопросам диагностики;
- модернизации и замене применяемых технических средств и методов, а также расширению перечня параметров, контролируемых под рабочим напряжением;
- разработке типовых проектов автоматизированных систем мониторинга по единым техническим требованиям для всех видов высоковольтного оборудования;
- разработке средств и методик ведения единых баз данных, содержащих результаты диагностики на всех уровнях управления;
- паспортизации вводимого в строй оборудования.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 262 наименования и двух приложений. Основная часть работы изложена на 303 страницах машинописного текста, содержит 119 рисунков и 23 таблицы.

## II. Основное содержание работы

### Введение

Во введении обоснована актуальность разработок способов контроля и технического диагностирования высоковольтного электроэнергетического оборудования под рабочим напряжением. Сформулирована цель работы, обозначены объект и предмет исследований, новизна защищаемых научных положений, определена практическая значимость и представлены сведения об апробации результатов.

### *Глава 1. Внешнее электромагнитное поле электроэнергетического оборудования как источник диагностической информации.*

Современный этап решения проблемы диагностики ВВЭО характеризуется тем, что при закреплённой в нормативно-технической документации системе диагностирования электрооборудования около 80% работ выполняется вхолостую, а полномасштабное диагностирование необходимо примерно для 30 % оборудования. Специалисты пришли к выводу, что рациональную систему диагностирования следует строить в виде многоступенчатой комплексной системы, причем методология диагностирования «стареющего» оборудования должна отличаться от методологии диагностирования нового. Практический интерес представляет также методика ранжирования оборудования по техническому состоянию. Кроме того, требуется продолжить поиск эффективных форм организации диагностирования силового электрооборудования с большим сроком службы, а также работы по совершенствованию методов и средств технического диагностирования, обращая внимание на сохранение преемственности традиционных методов и новых разработок.

В работе приведены сведения о различных типовых системах диагностики, применяемых в российских и зарубежных энергосистемах. Обсуждаются причины, заставляющие специалистов разрабатывать собственные системы контроля и технического диагностирования. Отмечено, что статистика аварийных ситуаций, а также отказов оборудования указывает на то, что наиболее частой причиной возникновения и развития дефектов являются электрические и термические явления, причем доля дефектов, связанных с электротермическими явлениями, составляет 70-80%. В настоящее время большинство энергосистем настойчиво ищут пути как можно более раннего выявления роста электротермической активности. Для этого используются самые современные методы и информационно-измерительные комплексы. За последние годы значительно возрос интерес к электромагнитным способам контроля, основанным на регистрации и обработке данных об электри-

ческих сигналах и электромагнитных излучениях, распространяющихся от оборудования, находящегося под рабочим напряжением. Мощное развитие информационно-измерительной и компьютерной техники позволяет постепенно преодолевать проблемы, связанные с качественной регистрацией сигналов, отстройкой от помех, обработкой и хранением больших объемов информации.

Электромагнитный способ, представленный в данной работе, основывается на анализе спектральных характеристик собственного электромагнитного излучения высоковольтного оборудования. В основе метода лежит связь между спектрами источников электромагнитных излучений и измеряемых напряжений, которую можно представить в матричной форме:  $\mathbf{K}(j\omega) \mathbf{E}(j\omega) = \mathbf{U}(j\omega)$ , где  $\mathbf{U}(j\omega)$  и  $\mathbf{E}(j\omega)$  – векторы спектров напряжений и источников соответственно,  $\mathbf{K}(j\omega)$  – матрица комплексных коэффициентов передачи. Основными преимуществами такого способа являются возможность оперативного контроля под рабочим напряжением, фиксация дефекта на ранней стадии его появления и развития, небольшие финансовые затраты при использовании стандартной аппаратуры.

В настоящее время все большее распространение получает следующая стратегия и тактика организации диагностирования оборудования. На первом этапе желательно выявить оборудование с признаками наличия дефектов. На втором, на основании целенаправленного комплекса испытаний и измерений уточняется характер дефекта, определяется возможность дальнейшей краткосрочной эксплуатации оборудования или объем неотложного ремонта. Целью третьего этапа является прогнозирование возможного развития дефекта для определения условий работы оборудования при наличии дефектов или составления программы ремонта для продления срока его службы. На четвертом этапе по результатам комплексного обследования (при необходимости) проводится капитальный ремонт оборудования для подтверждения и устранения дефектов. Рассматриваемый в данной работе метод электромагнитного контроля по спектрам собственного ЭМИ целесообразно применять вместе с другими методами мониторинга на первом и втором этапах диагностирования, а после его усовершенствования – на третьем этапе.

Оценка технического состояния ВВЭО по спектральным характеристикам излучаемого им электромагнитного поля предусматривает регистрацию и обработку спектров сигналов в определенном диапазоне частот с помощью оборудования, состоящего из стандартного высокочастотного измерительного прибора, направленной антенны общего пользования и компьютера с программным обеспечением.

Существенной особенностью разработанного способа является обоснованный выбор

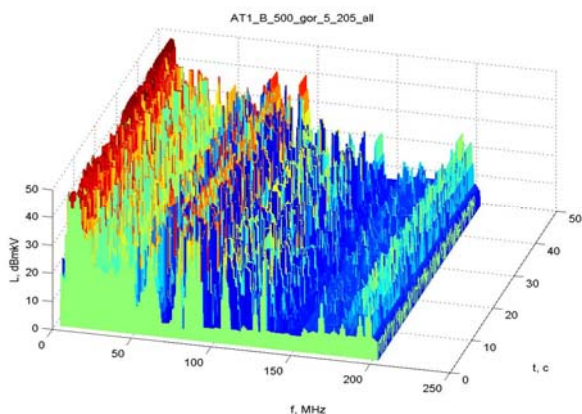


Рис. 1. Трехмерный спектр АТ

информативных частотных диапазонов, а также критериев оценки технического состояния. Спектральный состав собственного электромагнитного излучения вблизи каждого вида оборудования зависит от многих факторов, в первую очередь, от амплитудно-частотных характеристик излучения объектов, их связи с окружающим пространством, скоростей изменения сигналов. С помощью направленных

антенн и современной измерительной аппаратуры были выделены спектры сигналов, излучаемых конкретным видом оборудования. Компьютерная обработка результатов измерения позволяет представлять спектры двухмерном и трехмерном изображениях, вычислять минимальные, максимальные и средние значения, определять излучаемую мощность и т.д.

Например, на рис. 1 и 2 представлены трехмерное и двухмерное изображения спектров собственного электромагнитного излучения силового автотрансформатора (АТ).

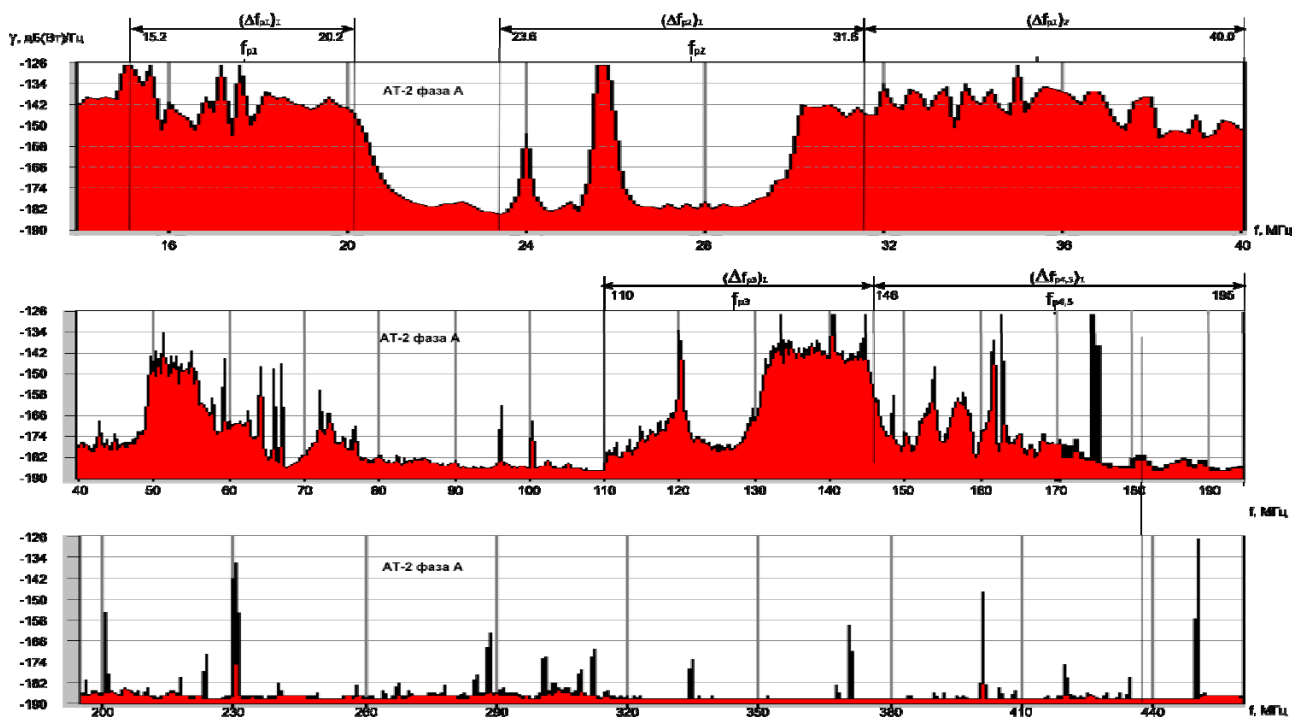


Рис. 2. Двухмерный спектр силового АТ.

Характерные всплески и провалы в интенсивности электромагнитного излучения, присущие каждому виду оборудования, связаны с параметрами излучающих элементов. Для обоснования выбора диапазонов частот, наиболее информативных с точки зрения контроля и технического диагностирования, были исследованы излучающие свойства высоковольтных установок. Для этого предложена излучающая модель высоковольтного оборудования, согласно которой наружные вертикальные части вводов, изолированные от заземленного металлического корпуса, рассматриваются как штыревые вибраторные антенны вертикальной поляризации с эквивалентными добротностями  $Q_{\text{ант}} \approx 3,5$ . Эти антенны излучают электромагнитные колебания на частотах, близких к значениям резонансных частот  $(f_{pi})_n = nc/(4h_i)$ , где  $i = 1, 2, 3$  - порядковый номер ввода,  $n = 1, 2, 3 \dots$  - числа натурального ряда, определяющие номера рассматриваемых резонансов излучений:  $c$  - скорость света в м/с,  $h_i$  - высота в м наружной вертикальной части провода  $i$ -го ввода, отсчитываемая от сечения входа данного провода через изолятор в заземленный металлический корпус оборудования.

Излучающие антенны вместе с изолированными частями проводов, расположенных внутри металлического корпуса оборудования, одновременно являются резонансными колебательными системами эквивалентных высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов квазигармонических колебаний, действующих на частотах, близких к резонансным частотам колебательных систем. При этом добротности колебательных систем, расположенных внутри металлического корпуса оборудования, могут существенно превосходить добротности излучающих антенн.

В роли возбуждающих токов рассматриваемых ВЧ и СВЧ генераторов квазигармонических колебаний в ВВЭО выступают токи полевой и тепловой ионизации, возникающие в дефектных областях наружных и внутренних частей оборудования, то есть токи искровых разрядов в наружной и внутренней изоляции, токи искрения в зажимных контактах и т.д. В искровых промежутках слабodefектного ВВЭО действуют, в основном, небольшие токи полевой ионизации. При длительной эксплуатации оборудование деградирует, полевая ионизация приобретает лавинный характер, токи растут, растет нагрев дефектных областей и вступает в действие тепловая ионизация, сначала умеренная, затем лавинная, приводящая в конечном итоге к тепловым пробоям. С ростом дефектностей увеличивается число колебательных систем. Появляются новые ВЧ и СВЧ колебательные системы, растут число и интенсивность пиков ВЧ и СВЧ квазигармонических колебаний в пределах информативных частотных полос излучений антенн  $(\Delta f_{pi})_n = (f_{pi})_n / Q_{in}$ , где  $Q_{in}$  - эквивалентная добротность  $i$ -ой антенны на резонансной частоте  $(f_{pi})_n$  (см. рис.2).

В работе для целей контроля использованы энергетические спектры излучений вертикальной поляризации. Выполнять аналогичное диагностирование по результатам измерений энергетических спектров излучений горизонтальной поляризации не представляется целесообразным, поскольку определить расчетным путем информативные частотные полосы излучений антенн горизонтальной поляризации затруднительно ввиду неопределенности сведений о горизонтальных участках наружных частей электрических проводов, их больших длин, а, следовательно, и низких значений резонансных частот излучающих систем.

Проведенный анализ состояния проблемы позволяет сформулировать цель и задачи диссертации. Цель настоящего исследования – разработка электромагнитных способов ранней диагностики электротехнического оборудования на основе анализа спектров его собственного электромагнитного излучения в информативных частотных диапазонах, определяемых размерами излучающих элементов конструкций. Способы должны быть нацелены на обеспечение возможности наиболее раннего выявления начала развития дефектов, связанных с электротермическими явлениями.

## ***Глава 2. Базовая диагностическая информация о дефектах высоковольтного оборудования.***

При формировании базовой диагностической информации о дефектах высоковольтного оборудования необходимо прежде всего решить вопрос о спектральном составе наиболее сильного внешнего источника электромагнитного излучения на электроэнергетических объектах – электромагнитного поля короны. Анализ известных результатов теоретических и экспериментальных исследований позволил сделать вывод, что энергетический вклад радиоизлучений от короны вблизи ЛЭП и на территории электроэнергетических объектов имеет существенное значение на частотах до десятков МГц. Длина фронта усредненного импульса короны колеблется в пределах от 70 до 250 нс, а среза - сотни нс. Эксперименты, проведенные различными авторами, показывают, что ослабление амплитуды частотного спектра коронных излучений на частоте 10 МГц по отношению к уровню на частоте 1 МГц составляет 30 и более дБ. Тот факт, что основная энергия спектра коронных излучений фиксируется на частотах ниже 10 МГц, объясняется формой и временными характеристиками коронных разрядов. Кроме того, коронные излучения происходят в основном в полосах частот, определяемых размерами отрезков линий передач, играющих роль антенных систем, размеры которых составляют десятки и сотни метров.

Данными, поясняющими факт превышения спектров собственного электромагнитного поля ВВЭО, находящегося под нагрузкой, над коронными излучениями на частотах

свыше 10 МГц служат результаты регистрации ЭМИ вблизи силового АТ, полученные автором на подстанции 500 кВ (рис. 3): а) - в режиме холостого хода, б) - под нагрузкой.

Далее в работе представлена базовая информация о спектральных характеристиках электромагнитных возмущений при дефектах термоэлектрического характера в изоляции и конструктивных элементах ВВЭО на основе данных о закономерностях физико-химических процессов и тесно связанной с ними теорией электромагнитных шумов.

Ионизационные процессы в искровых диэлектрических промежутках характеризуются сильно выраженной нелинейностью. Вследствие этого и в силу действия больших амплитуд напряжений промышленной частоты токи в проводах вводов имеют широкий энергетический спектр, простирающийся от инфранизких до сверхвысоких частот. В этом спектре присутствуют шумовые составляющие с равномерными, фликерными, генерационно-рекомбинационными спектрами, детерминированные компоненты с частотой сети  $f_c$  и ее высшими гармониками. Интенсивности детерминированных компонент на частотах свыше 1 МГц как правило ниже уровня лавинного шума с равномерным спектром. Появление и расширение дефектных областей неизбежно сопровождается ростом уровня лавинного шума.

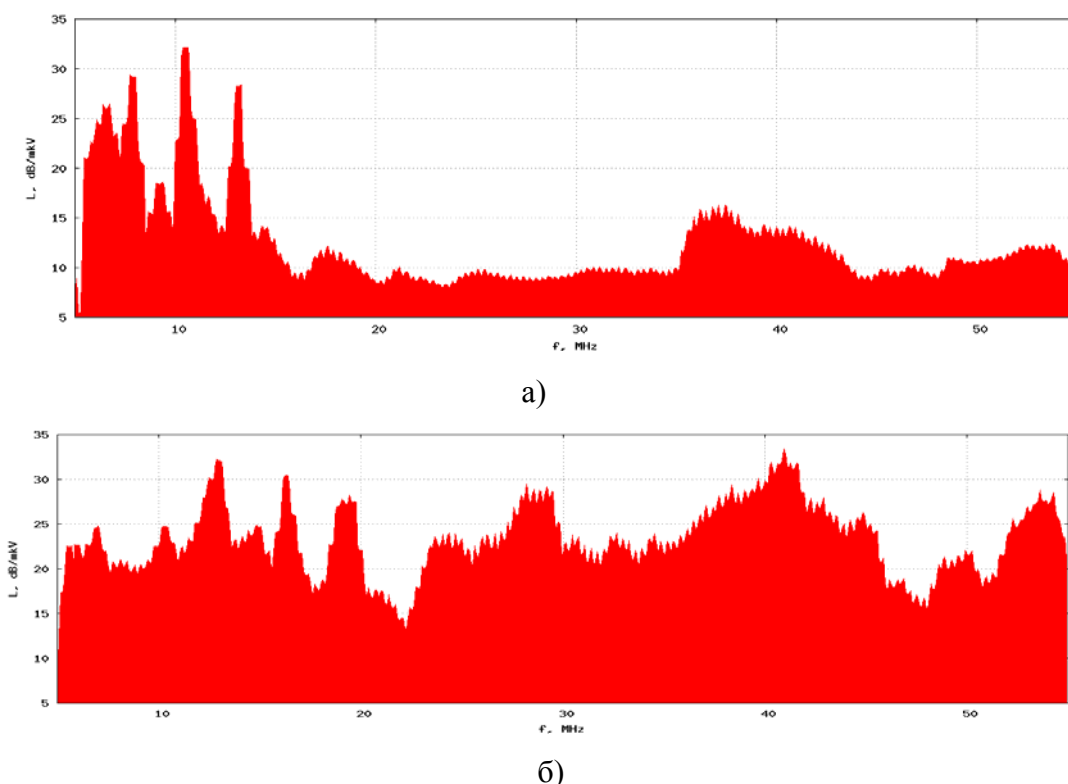


Рис. 3. Спектры вблизи силового АТ: а) – холостой ход, б) – под нагрузкой.

На рис. 4а изображен качественный вид перечисленных спектров. Лавинные шумы с равномерными спектрами, попадая в резонансные частотные полосы колебательных систем и антенн, излучаются в окружающее пространство в виде ВЧ и СВЧ квазигармоничес-

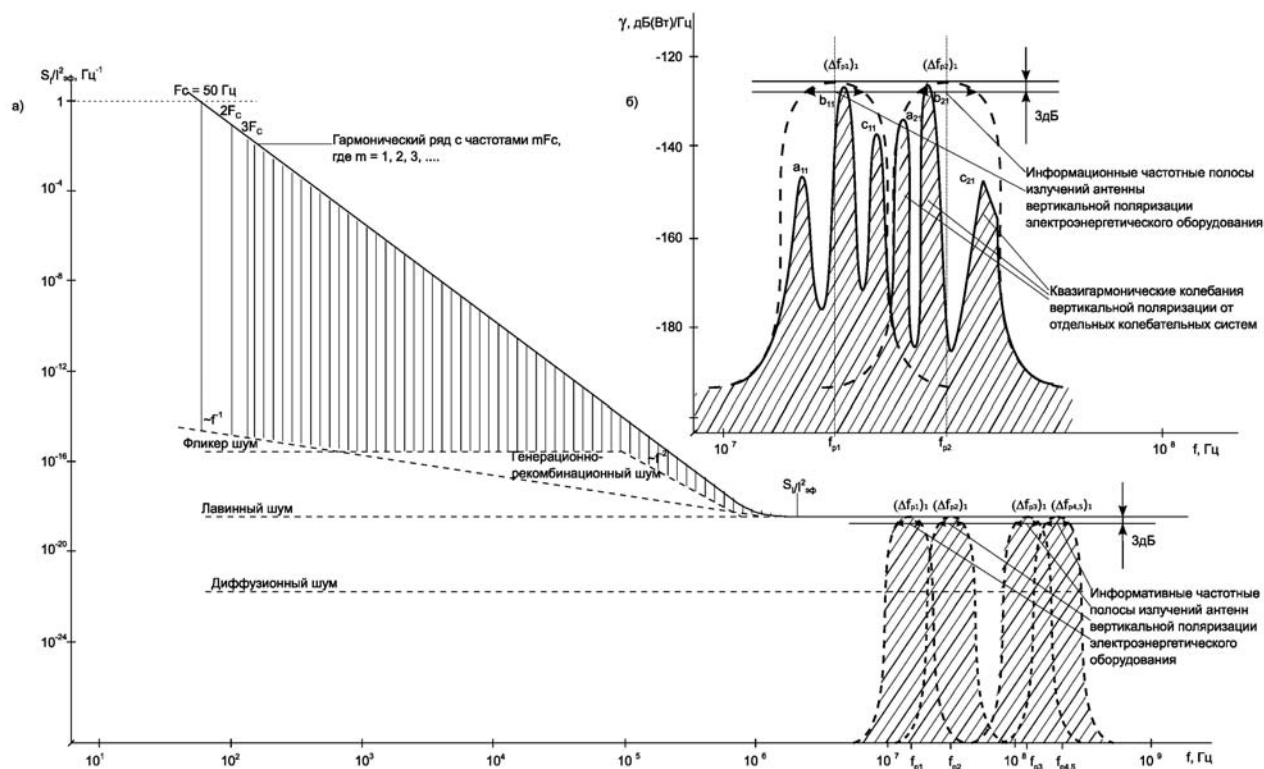


Рис. 4. Качественный вид спектров электромагнитных шумов.

ких электромагнитных колебаний вертикальной поляризации (см. пики  $a_{11}$ ,  $b_{11}$ , ... на рис. 4б) с частотами, близкими к резонансным частотам колебательных систем ВВЭО оборудования, лежащим внутри информативных (в плане диагностирования) частотных полос излучений антенн. С ростом дефектностей интенсивность лавинных шумов возрастает и, следовательно, увеличиваются интенсивности в спектрах излучений и численность пиков в пределах каждой из информативных частотных полос. Самыми интенсивными и потому наиболее информативными в плане диагностирования будут пики в частотных полосах вблизи основных (первых) резонансных частот излучений антенн, поскольку излучающие способности штыревых вибраторных антенн на гармониках ухудшаются. Однако, в случае необходимости, диагностирование можно выполнять с помощью спектральных составляющих, соответствующих высшим гармоникам излучений антенн.

Наличие высоких напряжений и больших напряженностей электрического поля промышленной частоты накладывает особый отпечаток на физические процессы, происходящие в изоляции. Даже при нормальных условиях эксплуатации в изоляции ВВЭО наблюдаются частичные разряды (ЧР), имеющие крутой фронт (единицы нс) и малую длительность (десятки нс). Единичные импульсы тока ЧР имеют широкий спектр электромагнитных возмущений. Наличие пачек регулярных разнополярных импульсов ЧР при приложении синусоидального напряжения приводит к появлению промодулированных спектров вида:



$$F_{NTn}(j\omega) = 2 \cdot K_n(j\omega) \cdot F_0(j\omega) \cdot \sin\left(\frac{\omega TN}{2}\right) \cdot e^{-j\frac{\omega T}{2}(N-1)} \bigg/ \sin\left(\frac{\omega T}{2}\right),$$

где  $F_0(j\omega)$ ,  $K_n(j\omega)$  – комплексный спектр одного импульса и коэффициент полимодальности серии из  $n$  однополярных импульсов ЧР соответственно,  $T$  – период промышленной частоты,  $N$  – число рассматриваемых периодов.

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также компьютерного моделирования процессов формирования сигналов и спектров ЧР. Сделаны выводы о том, что сложные полимодальные спектры собственного ЭМИ ВВЭО отображают интенсивность и периодичность всех электромагнитных процессов в изоляции и узлах оборудования, в том числе частичных разрядов. Например, на рис. 5 качественно изображены импульсы ЧР и соответствующий им спектр, полученные с помощью компьютерного моделирования.

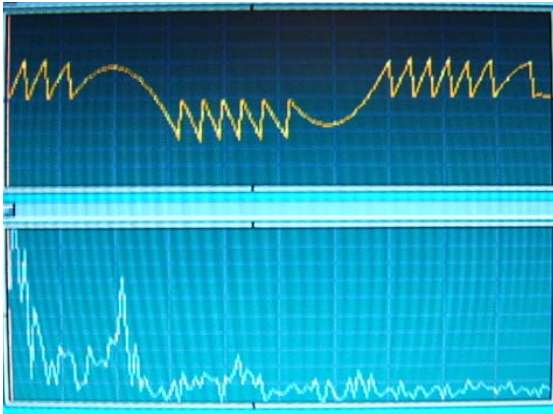


Рис. 5. Качественный вид спектра ЧР

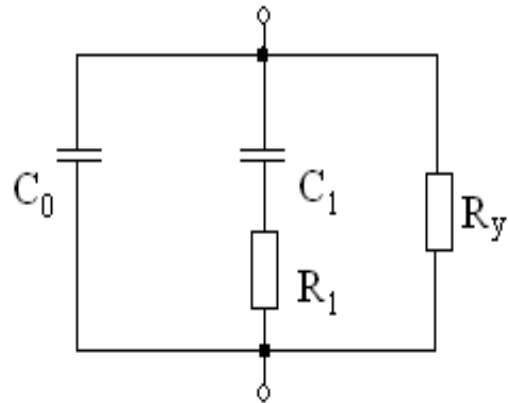


Рис. 6. Схема замещения  
несовершенного диэлектрика

Параметры используемой при этом схемы замещения несовершенного диэлектрика (рис. 6), определялись через время релаксации  $\tau$  ( $C_0 = C/\epsilon_r$ ,  $C_1 = C - C_0$ ,  $R_1 = \tau/C_1$ ), для вы-

числения которого в работе получено выражение  $\tau = \frac{tg\delta - tg\delta_{50}\omega_{50}/\omega}{\omega(\epsilon_r - 1)/\epsilon_r}$ , где  $tg\delta$  и  $tg\delta_{50}$  -

тангенсы угла потерь диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ , измеренные на частотах  $\omega$  и 50Гц.

Кроме того, расчеты на модели позволили сделать оценку степени увеличения тока во включении при его перемещении от центра исследуемой области диэлектрика к электродам, что также сопровождается ростом амплитуды спектра. Исследован процесс участия областей диэлектрика, прилегающих к включению, в формировании импульса ЧР. Экспериментальные данные, полученные при испытании бумажно-масляной изоляции, показав-

ли, что при переходе кажущегося заряда ЧР от начальных значений к критическим амплитуда спектральных линий возрастает на 10 и более дБ.

**Глава 3. Исследование процессов излучения и распространения электромагнитного поля как носителя диагностической информации.**

Разработка способов электромагнитного контроля ВВЭО требует решения вопросов не только о спектральном составе источников электромагнитных возмущений, определения информативных частотных диапазонов, но и проведения исследований процессов излучения и распространения поля на электроэнергетическом объекте. Это обусловлено тем, что характер распределения собственного электромагнитного поля вблизи оборудования в значительной степени влияет на выбор места размещения измерительной аппаратуры и частотных диапазонов, в пределах которых проводится диагностика. Кроме того, необходимо оценить степень влияния железобетонных и других конструкций как отражающих поверхностей на характер распределения поля.

В работе даны определения общей и диагностической электромагнитных обстановок, а также изложены принципы построения модели ВВЭО, используемой для формирования картины распределения электромагнитного поля. При построении модели излучающие элементы представляются в виде вибраторных антенн, расположенных в пространстве с учетом их геометрических размеров, взаимного расположения, наличия переизлучений, подставки, земли и т.д. В качестве примера на рис. 7 приведена излучающая модель силового автотрансформатора 500 кВ (на рисунке обозначены: 1,2,3 - вводы, 5,6,7 - спуски, 8 - бак), а на рис. 8 - рассчитанная с ее помощью диаграмма распределения излучаемого поля (сплошные линии).

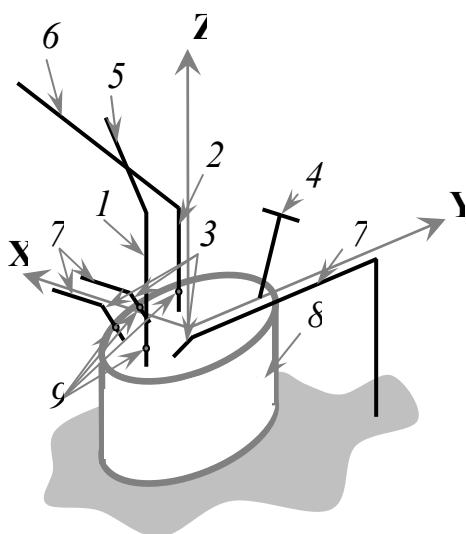


Рис. 7. Излучающая модель АТ 500 кВ

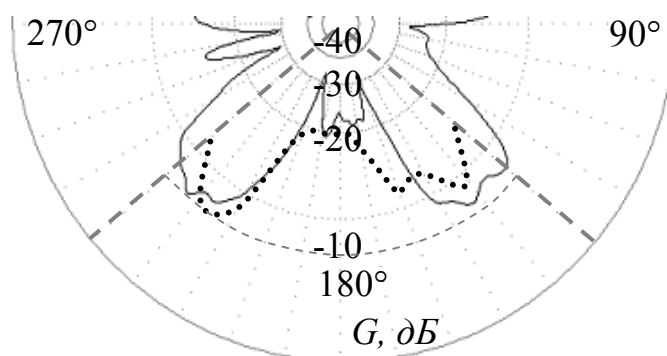


Рис. 8. Диаграмма распределения поля

Подобные диаграммы получены для всех информативных частотных полос данного АТ, что позволило выработать рекомендации по размещению измерительной аппаратуры в секторах, удовлетворяющих условиям максимума сигнала и электробезопасности.

Для расчета поля антенны с произвольно расположенным на ней источником использовалось распределение тока  $I(z)$ , определяемое из уравнения Поклингтона:

$$-j\omega\epsilon_0 E_z^{inc}(z) = \left[ \frac{d^2}{dz^2} + k^2 \right] \int_{\text{wire}} I(z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz', \text{ где расстояние } R \text{ определяется выражением:}$$

$R = \sqrt{(z - z')^2 + a^2}$ , а также его приближенных решений.

Поле, излученное вибраторной антенной в направлении, заданном углом наблюдения  $\theta_0$ , описывалось с помощью уравнения

$$r_0 E_\theta = \frac{jkZ_c \sin \theta_0}{4\pi} \int_0^\ell I(z) e^{jk(z-z_s) \cos \theta_0} dz = \\ = -\frac{kV_1 \sin \theta_0}{\Omega_0 \sin k\ell} \left[ \sin k(\ell - z_s) \int_0^{z_0} \sin kz e^{jk(z-z_s) \cos \theta_0} dz + \sin k(z_s) \int_{z_0}^\ell \sin k(\ell - z) e^{jk(z-z_s) \cos \theta_0} dz \right].$$

где  $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ ,  $Z_c$  – волновое сопротивление,  $V_1$  – источник напряжения,  $\ell$  – длина проводника,  $a$  – радиус провода,  $z = z_s$  координата точки расположения источника,  $r_0$  – координата точки наблюдения,  $h = \ell/2$ ,  $\Omega(z) \approx 2 \ln \frac{2h}{a} = 2 \ln \frac{\ell}{a} \equiv \Omega_0$ ,  $E$  – напряженность электрического поля.

В случае необходимости учета присутствия других тел, в том числе земли, расчет проводился с помощью метода зеркальных отображений. При рассмотрении условий излучения от высоковольтных вводов, расположенных на ВВЭО, необходимо учитывать тот факт, что излучение от каждой антенны происходит в присутствии других антенн (высоковольтных вводов). В результате получается система, состоящая из активных и пассивных антенн.

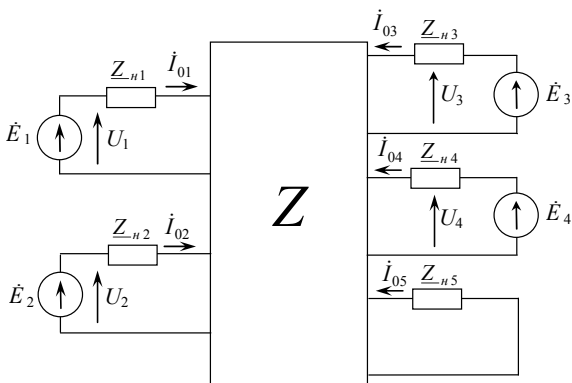


Рис. 9. Эквивалентный четырехполюсник.

Для определения токов и напряжений на входах вибраторов антенная система представляется в виде эквивалентного четырехполюсника, характеризуемого матрицей сопротивлений  $Z$ . Для нахождения взаимных и собственных сопротивлений вибраторов используется метод наведенных ЭДС. Например, на рис.9 изображен четырехполюсник, эквивалентирующий антенную систему из пяти вводов для силового автотрансформатора 500 кВ.

Результаты расчетов распределения поля, проведенных с помощью программного продукта MMANA, достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными (обозначены точками на рис. 8). Исследования показали, что диаграммы направленности ВВЭО на частотах свыше 200 МГц имеют заметную изрезанность. Наиболее достоверные для целей диагностики данные можно получить, проводя обследования на частотах в диапазоне 10 – 200 МГц. В работе даны рекомендации по определению границы между ближней и дальней зонами для АТ различных классов напряжения. Определено, что минимальное расстояние, на котором следует располагать измерительную антенну вблизи АТ, при проведении обследований в дальней зоне, должно составлять не менее 8 метров.

Расчет распространения электромагнитных полей сквозь многослойные среды, которые имеют место на электроэнергетических объектах, удобно проводить с помощью теории аналоговых цепных схем. Для многослойных систем, в том случае, когда решение возможно методом разделения переменных, решение находится методами теории электрических цепей на основании общих уравнений четырехполюсников. Такая процедура позволяет сразу написать в окончательном виде решение для произвольного слоя на основании выражений для параметров аналоговых цепных схем и источников пространственных гармоник соответствующих составляющих напряженностей поля.

В диссертации изложены общие принципы построения аналоговых цепных схем для расчета двухмерных и трехмерных электромагнитных полей в различных системах координат. Введя аналоговые функции  $e_n$  и  $h_n$  вместо составляющих поля, уравнения поля в операторной форме приводятся к виду:

$$-\partial e_n(p)/\partial x = \varphi_{1n}(p, x)h_n(p) + \psi_{1n}(p, x), \quad -\partial h_n(p)/\partial x = \varphi_{2n}(p, x)e_n(p) + \psi_{2n}(p, x),$$

где  $x$  – координата, нормальная к границам раздела сред.

Общие решения вышеприведенной системы имеют вид:

$$e_n(p) = C_{1n}F_{1n}(p, x) + C_{2n}\Phi_{1n}(p, x) + f_{1n}(p, x),$$

$$h_n(p) = C_{1n}F_{2n}(p, x) + C_{2n}\Phi_{2n}(p, x) + f_{2n}(p, x),$$

где первые два слагаемых – общие, а последние слагаемые – частные решения той же системы. Для произвольного слоя все величины на ближайшей к началу координат границе раздела обозначим индексом 1, а на второй – индексом 2. После определения постоянных  $C_{1n}$  и  $C_{2n}$  записываются уравнения, связывающие граничные значения аналоговых функций:

$e_{n1}(p) = A_n e_{n2}(p) + B_n h_{n2}(p) + e_{n0}(p)$ ,  $h_{n1}(p) = C_n e_{n2}(p) + D_n h_{n2}(p) + h_{n0}(p)$ , где

$$A_n = \frac{1}{\Delta_n} (F_{22n} \Phi_{11n} - F_{11n} \Phi_{22n}), \quad B_n = \frac{1}{\Delta_n} (F_{11n} \Phi_{12n} - F_{12n} \Phi_{11n}),$$

$$C_n = \frac{1}{\Delta_n} (F_{22n} \Phi_{21n} - F_{21n} \Phi_{22n}), \quad D_n = \frac{1}{\Delta_n} (F_{21n} \Phi_{12n} - F_{21n} \Phi_{12n}),$$

$$\Delta_n = F_{22n} \Phi_{12n} - F_{12n} \Phi_{22n},$$

$$e_{n0}(p) = f_{11n} - B_n f_{22n} - A_n f_{12n}, \quad h_{n0}(p) = f_{21n} - D_n f_{22n} - C_n f_{12n}.$$

Здесь введены обозначения:  $F_{1n}(p, x_1) = F_{11n}$ ,  $F_{1n}(p, x_2) = F_{12n}$ , и т. д. Система уравнений для аналоговых функций подобна уравнениям активного четырёхполюсника, который может быть заменён пассивным с вынесенными источниками напряжения  $e_n$  или источниками тока  $h_n$ . Величины этих источников определяются из режимов холостого хода и короткого замыкания:

$$e_{10n}(p) = e_{n0}(p) - \frac{A_n}{C_n} h_{n0}(p) = f_{11n} + \frac{f_{22n}}{C_n} - \frac{A_n}{C_n} f_{21n}, \quad e_{20n}(p) = -\frac{h_{n0}(p)}{C_n} f_{12n} - \frac{f_{21n}}{C_n} + \frac{D_n}{C_n} f_{22n},$$

$$h_{10n}(p) = h_{n0}(p) - \frac{D_n}{B_n} e_{n0}(p) = f_{22n} - \frac{f_{11n}}{B_n} + \frac{A_n}{B_n} f_{12n},$$

$$h_{20n}(p) = -\frac{e_{n0}(p)}{B_n} = f_{21n} + \frac{f_{12n}}{B_n} - \frac{D_n}{B_n} f_{11n}.$$

В работе приведена цепная модель для случая, когда возбудителем электромагнитного поля является катушка конечных размеров (рис. 10а). Для составляющих поля  $H_{pn}$  и  $E_{qn}$  аналоговая цепная схема имеет вид, изображенный на рис. 10б. С ее помощью в работе получено выражение для передаточной функции от составляющей поля в катушке  $H_{pn}^0$  к границе пятого слоя  $H_{pn5}$ :

$$\frac{H_{pn5}}{H_{pn}^0} = \frac{1}{A + D + CZ_{Bn0} + BZ_{Bn0}^{-1}},$$

где  $A, B, C, D$  – параметры эквивалентного четырёхполюсника,  $Z_{Bn0}$  – волновое сопротивление двухполюсника.

В диссертации приведены также аналоговые цепные схемы для расчета распространения поля через многослойные среды в виде железобетонных конструкций в декартовой системе координат. По результатам расчетов и экспериментальных исследований сделан вывод о возможности проведения диагностики ВВЭО, отделенного от места расположения регистрирующей аппаратуры многослойными средами.

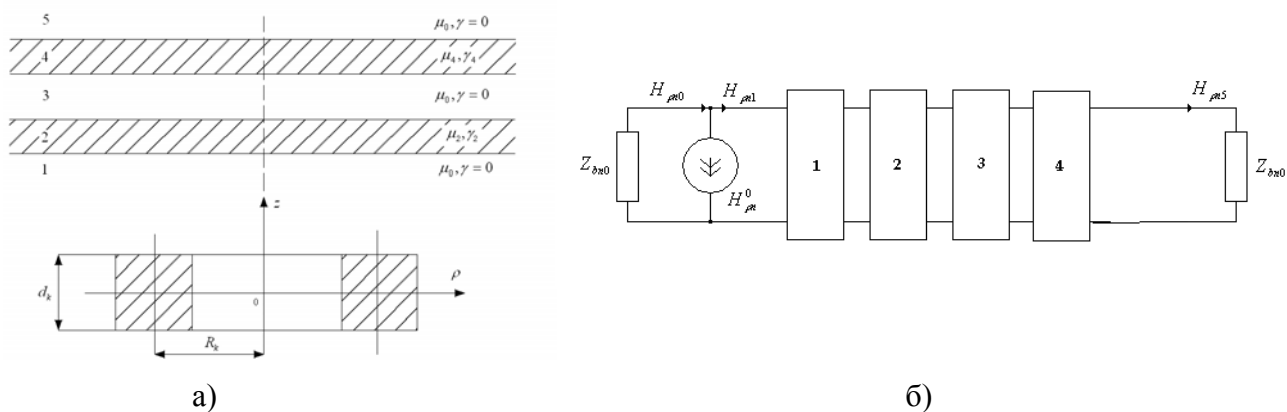


Рис. 10. а) катушка вблизи многослойной среды, б) аналоговая цепная схема

#### **Глава 4. Методики проведения контроля технического состояния оборудования по спектральным характеристикам электромагнитного поля.**

Для того, чтобы электромагнитный способ оценки технического состояния ВВЭО под рабочим напряжением на основе анализа спектров собственного электромагнитного излучения стал реальностью, необходимо накопить значительный экспериментальный материал, преодолеть трудности в понимании и описании физики электротермических процессов, создать информационную структуру по хранению и обработке результатов измерений спектров, выработать критерии оценки состояния оборудования, разработать методики контроля и т.д. Многие из перечисленных вопросов нашли свое отражение в данной работе. Экспериментальный материал, накопленный в результате обследования широкого круга высоковольтного оборудования (автотрансформаторов, трансформаторов тока и напряжения, ОПН, блочных трансформаторов и т.д.), лег в основу методики регистрации спектров электромагнитного излучения и методических указаний по оценке технического состояния ВВЭО, приведенных в данной главе.

Одним из важнейших этапов в процессе подготовки к проведению обследования является выбор частотных диапазонов, в которых целесообразно проводить регистрацию спектров. Для этого согласно разработанным методическим указаниям определяются расчетные значения частот основных (первых) резонансов излучающих антенн вертикальной поляризации  $(f_{pi})_1$ , состоящих из наружных вертикальных частей вводов:  $(f_{pi})_1 = c / (4 h_i)$ . Следует учитывать, что величина  $h_i$  уменьшается на значение размера выступающей над поверхностью бака части последней уравнивающей обкладки ввода.

Далее определяются расчетные значения ширины наиболее информативных частотных полос излучения  $(\Delta f_{pi})_1$ :  $(\Delta f_{pi})_1 = (f_{pi})_1 / Q_{in \max}$ , где  $(Q_{in})_{\max}$  - максимальное значение эквивалентных добротностей излучающих антенн, обычно равное  $(Q_{in})_{\max} \approx 3,5$ . При необ-

ходимости определяются информативные частотные полосы, соответствующие высшим гармоникам от основных резонансов излучающих антенн.

Другие важные положения, отраженные в методических указаниях – учет широкополосного и квазигармонического характера излучений при формировании требований к селективности измерительного приемника, рекомендации по выбору основных характеристик регистрирующей аппаратуры, таких как чувствительность, динамический диапазон, ширина полосы пропускания, а также расположения антенных устройств вблизи высоковольтного оборудования. Относительная статистическая ошибка измерений спектральных плотностей излучений  $\beta$  в исследуемых частотных диапазонах составляет:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\tau \cdot \Delta f}} \leq 0,1, \text{ где } \tau - \text{ время усреднения, } \Delta f - \text{ селективность приемника.}$$

Изложенные рекомендации дополнены в данной главе примером расчета информативных частотных диапазонов для силового оборудования 500 кВ. В качестве примера в таблице приведены сведения об информативных частотных диапазонах для основных (первых) резонансных частот пяти вводов автотрансформатора.

Таблица.

Информативные частотные диапазоны силового автотрансформатора 500 кВ

Номер ввода	Ширина частотной полосы, МГц	Границы частотной полосы, МГц	Частота основного резонанса, МГц
Ввод 1, 500кВ	$(\Delta f_{p1})_1 = 5$	от 15,2 до 20,2	$(f_{p1})_1 = 17,7$
Ввод 2, 220 кВ	$(\Delta f_{p2})_1 = 8$	от 23,6 до 31,6	$(f_{p2})_1 = 27,6$
Ввод 3, земля	$(\Delta f_{p3})_1 = 36$	от 110 до 146	$(f_{p3})_1 = 120$
Вводы 4-5, 11 кВ	$(\Delta f_{p4,5})_1 = 49$	от 146 до 195	$(f_{p4,5})_1 = 170$

Методика оценки технического состояния базируется на подсчете интегральной мощности спектров собственного электромагнитного излучения высоковольтного оборудования в выделенных информативных частотных полосах, которая может определяться различными способами. Например, по формуле  $P_{\text{инт}} = \int_{f_{\text{мин}}}^{f_{\text{макс}}} S^2(f) df$ , где  $P_{\text{инт}}$  – интегральная мощность излучения оборудования в полосе частот  $f_{\text{мин}} \leq f \leq f_{\text{макс}}$ ,  $S(f)$  – плотность интегральной мощности излучения,

Следующий способ вычисления  $P_{\text{инт}}$  базируется на подсчете числа пиков излучений с интенсивностями, равными или выше граничного уровня  $\gamma_{\text{гп}}$ . В работе даны рекоменда-

ции по выбору граничного уровня  $\gamma_{igr}$  для каждой информативной частотной полосы, позволяющего получить три-четыре градации развития дефектов.

Для сравнительной оценки состояния оборудования в работе введено понятие коэффициента интегральной мощности  $K_{ni}$ , определяемого отношением интегральных мощностей излучения для каждой  $n$ -ой информативной частотной полосы как отношение интегральной мощности  $i$ -го контролируемого оборудования к интегральной мощности эталонного.

Эффективные значения коэффициента интегральной мощности  $K_{эф(дБ)}$  для каждой единицы оборудования, выраженные в дБ, вычисляются как сумма коэффициентов интегральной мощности во всех рассматриваемых информативных частотных полосах:  $K_{эф(дБ)} = \sum_{n=1}^{n=m} K_{ni(дБ)}$ , где  $m$  – число информативных частотных полос, используемых для контроля оборудования. Заключение о степени дефектности ВВЭО делается на основании рассчитанных значений  $K_{эф(дБ)}$ : если значения  $K_{эф(дБ)}$  лежат в пределах от 1 до 3 дБ, то считается, что оборудование имеет слабую дефектность; от 3 до 8 дБ – умеренную дефектность; от 8 и выше – сильную дефектность.

Периодичность контроля ВВЭО с помощью предлагаемого способа определяется динамикой развития электротермических явлений и их интенсивностью. Решение о необходимости расширенных или комплексных исследований в каждом случае принимается индивидуально. Возможности использования разработанного электромагнитного способа в комплексной системе диагностики ВВЭО представляются достаточно широкими. Он может использоваться как для непрерывного контроля, так и в режимах интервальных и периодических испытаний.

### ***Глава 5. Критерии контроля электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам электромагнитного поля.***

В России накоплен большой опыт комплексных обследований высоковольтного оборудования, на основании которого сделан вывод о том, что отдельно взятые диагностические параметры, даже при наличии дефекта, могут не выходить за границы предельно-допустимых значений, что не позволяет проводить отбраковку оборудования и рекомендовать проведение ремонта. В то же время анализ совокупности диагностических факторов может дать объективную картину состояния оборудования и своевременно выявить развивающиеся дефекты.

Способ контроля по спектрам электромагнитного излучения органично вписывается в существующую систему комплексных испытаний ВВЭО, экспертных систем и может эф-



эффективно использоваться для контрольных обследований. Это позволит своевременно выявлять по результатам обследования факты появления грубых дефектов, ставить вопрос об увеличении глубины обследований и необходимости внеплановых испытаний. В дальнейшем, по мере накопления статистических данных и совершенствования методики контроля, указывать на вид и место расположения дефекта, в сочетании с другими методами существенно повысить надежность диагностической информации, осуществлять паспортизацию высоковольтного оборудования перед вводом его в эксплуатацию.

Оценка состояния оборудования может основываться на различных критериях, которые отражают классификационные свойства спектров, такие как амплитуда, энергия спектра, частотный диапазон, изменчивость спектра, полимодальность, количество пиков в конкретном частотном диапазоне, количество пиков, превышающих граничный уровень, форма пиков, размах спектральных линий в конкретных характерных точках и т.д..

В диссертации разработаны и использованы критерии, основанные на анализе изменения уровня (амплитуды) излучения во всем измеренном диапазоне и вычислении интегральной мощности излучения. В данной главе представлены три примера контроля технического состояния силовых трансформаторов 500 кВ на основе анализа спектров собственного ЭМИ.

В первом примере показано практическое применение критерия, основанного на анализе изменения уровня излучения в измеренном диапазоне частот. С помощью этого критерия проведена оценка стабильности работы блочного трансформатора 500 кВ. Сопоставлялись данные регистрации спектров, полученные в результате учащенного контроля в течение одного месяца. На основе анализа графиков спектров был сделан вывод о том, что отличие в уровнях огибающих спектров у различных фаз составляло от 3 до 6 дБ во всех измеренных диапазонах. Кроме того, в некоторых диапазонах было отмечено снижение уровней излучения. По итогам обследования сделаны выводы о стабильности работы трансформатора и даны рекомендации о возможности продолжения его эксплуатации до истечения плановых межремонтных сроков, несмотря на наличие противоречивых данных регламентных испытаний.

Во втором примере приведены результаты четырехлетнего обследования шести автотрансформаторов 500 кВ, один из которых впоследствии оказался аварийным за счет пробоя внутренней изоляции. Эффективный коэффициент интегральной мощности дефектного автотрансформатора за период контроля возрос от 2 дБ до 10,3 дБ, а амплитуда спектра на 20 и более дБ. Обследование, проведенное для восстановленного после аварии автотрансформатора, зафиксировало  $K_{эф(дБ)}$  на уровне 0,3 дБ. В работе сделан вывод о том,

что превышение эффективным коэффициентом интегральной мощности значения 10 дБ свидетельствует о наличии серьезных отклонений и развитии дефекта.

В третьем примере подробно описывается процедура оценки технического состояния по результатам подсчета числа превышений пиками граничного уровня. На основании анализа спектров, подобных тем, что изображены на рис.2, сформулированы критерии для определения градаций дефектностей по отдельным вводам и критерии для определения аналогичных градаций полных дефектностей исследуемых автотрансформаторов. Слабая дефектность соответствует наличию в информативной частотной полосе не более двух пиков с интенсивностями, равными или выше граничного уровня, умеренная дефектность - от трех до четырех пиков, сильная дефектность - пять и более пиков. Сформулированы также критерии для оценки степени дефектности оборудования в целом на основании данных о степени дефектности, полученных для отдельных вводов. Сопоставление результатов оценки технического состояния АТ по подсчету числа пиков с данными хроматографического анализа газов (ХАРГ) позволило получить конкретные данные о соотношении степени дефектности обследуемого оборудования по результатам электромагнитного контроля с его реальным состоянием. Например, автотрансформатор, выявленный по результатам анализа спектров как сильнодефектный, имел концентрации некоторых газов (этана, этилена) близкие к граничным значениям. Эти концентрации в 20-40 раз превышали соответствующие концентрации газов для автотрансформатора, определенного как слабodefектный. В целом результаты оценки технического состояния АТ на основе подсчета интегральной мощности излучения хорошо согласуются с данными ХАРГ.

Таким образом, приведенные в диссертационной работе результаты обследований ВВЭО позволяют сделать вывод о возможности раннего обнаружения роста электротермических процессов в изоляции оборудования путем анализа спектров его собственного электромагнитного излучения. Накопление экспериментального материала, его обобщение, сравнение с результатами других испытаний поможет постепенно расширить и углубить возможности электромагнитного способа.

## ***Глава 6. Контроль действующего электроэнергетического оборудования. Информационно-техническое обеспечение.***

В данной главе представлены результаты двухлетнего контроля ВВЭО на одной из введенных в строй подстанций 500 кВ Приморского края. Обследования проводились с целью раннего предупреждения о появлении и развитии дефектов, а также проверки адекватности результатов электромагнитного контроля данным регламентных испытаний.

Первичный контроль электромагнитной обстановки на территории подстанции был проведен до ввода ее в эксплуатацию, что позволило выявить внешние источники электромагнитных излучений. Измерение интегральных мощностей излучения проводился в эквивалентных для однотипного оборудования условиях, что позволило выбрать из общего числа контролируемого оборудования одно в качестве эталонного. Вычисление коэффициента интегральной мощности относительно эталонного оборудования позволяет дать оценку состояния оборудования и заключение о степени развития дефектов. Например, на рис.11 приведены графики изменения коэффициентов интегральной мощности  $K_1 = P_A / P_B$  и  $K_2 = P_C / P_B$ , выраженных в относительных единицах, для трех однотипных АТ (фазы А, В, С). Данные получены за время эксплуатации ВВЭО с декабря 2005 года по июнь 2007 года. Значения  $K$ , лежащие в пределах от 1,1 до 1,4, указывают на относительно стабильную ситуацию для изоляции АТ и отсутствие значительных дефектов.

Непрерывный, периодический или интервальный контроль ВВЭО рассматриваемым способом позволяет получить информацию о тенденциях в развитии дефектов подобно тому, как это делается с помощью ХАРГ в масле. Автотрансформаторы, введенные в эксплуатацию в 2005 году, находились под учащенным контролем газов в масле. Сопоставление результатов оценки технического состояния АТ по этим двум методам показывает, что

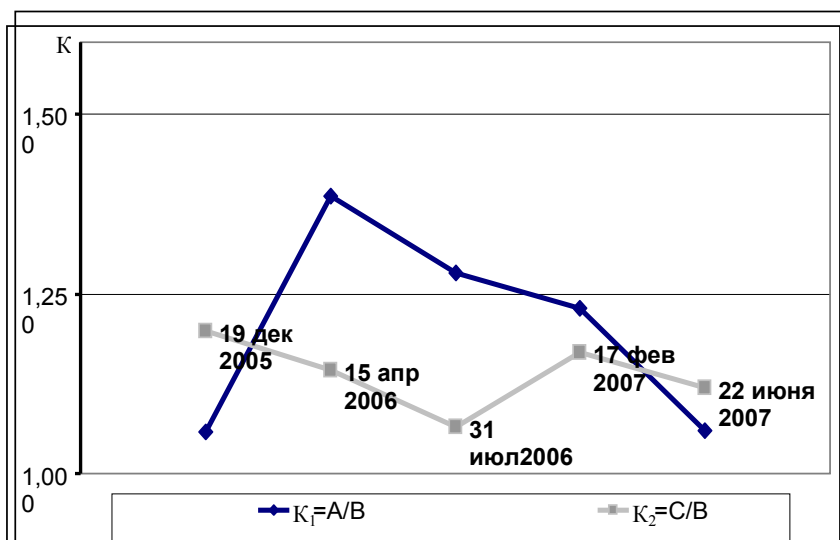


Рис. 11. Графики изменения коэффициента  $K$

Результаты ХАРГ подтверждают этот вывод и показывают, что у фазы В отсутствуют частичные разряды с высокой плотностью энергии и термические дефекты. Если для фазы С по результатам ХАРГ в декабре 2005 г. ставился диагноз о возможности наличия разрядов малой мощности с затрагиванием твердой части изоляции, то к июлю 2006г. показатели состояния изоляции улучшились после проведения профилактических мероприятий.

рост уровней разрядных явлений и локальных температур, выявляемый с помощью ХАРГ, сопровождается повышением интегральной мощности излучения.

Например, фаза В имеет самый низкий уровень дефектности и поэтому выбрана в качестве эталон-

Соответственно этим данным уменьшились и значения коэффициента  $K_2$  в апреле и июле 2006 г. Для фазы А результаты ХАРГ указывали на развитие разрядных явлений от ЧР с низкой плотностью энергии до разрядов малой мощности с непрерывным искрением в масле с затрагиванием твердой части изоляции. В соответствии с этими данными, в течение почти всего рассматриваемого периода  $K_1 > K_2$ . Таким образом, даже незначительные изменения в разрядной активности и температурных режимах в изоляции АТ находят свое отражение в повышении или понижении интегральной мощности излучения. Накопленный материал позволил сделать выводы об адекватности результатов контроля по спектральным характеристикам и данных регламентных испытаний, выработать рекомендации по контролю действующего оборудования и формированию информационно-измерительных комплексов и базы данных о спектрах электромагнитного излучения.

По результатам обследований на различных подстанциях Дальнего Востока собран большой материал по спектрам собственного электромагнитного излучения силового высоковольтного оборудования, который оформлен в виде архива данных. Накопленный опыт позволил сформировать технические требования, предъявляемые к информационно-измерительным комплексам (ИИК), обеспечивающим регистрацию, запись и обработку информации о спектрах по следующим основным позициям:

- рабочий диапазон частот, чувствительность, динамический диапазон, абсолютная погрешность, ширина диаграммы направленности антенны, разрешающая способность по частоте, обеспечивающие регистрацию ЭМИ;
- разрешение, время преобразования, частота дискретизации, динамический диапазон АЦП, объем памяти накопителей информации;
- вид программного обеспечения, конфигурация аппаратных ресурсов, объем памяти для организации базы данных.

В диссертации приведены варианты различных конфигураций мобильных и стационарных ИИК, создаваемых на базе стандартной, серийно выпускаемой аппаратуры. Различия между предлагаемыми вариантами заключаются в количественном составе, скорости регистрации и обработки, точности, стоимости. Стоимость самой простой конфигурации мобильного ИИК составляет 60 тысяч руб.

В работе перечислен состав архивного материала, полученного в период с 1999 по 2007 годы в результате регистрации спектров ЭМИ ВВЭО на следующих электроэнергетических объектах: подстанциях Приморская, Дальневосточная, Чугуевка-2, Угольная, Морская Приморского края, станциях ЛУТЭК, Зейская.

Дальнейшая обработка архивной информации о спектрах с целью оценки технического состояния ВВЭО может быть выполнена тогда, когда эти данные хорошо структурирова-

ны, непротиворечивы, неизбыточны и целостны, т.е сформированы в виде базы данных. В процесс разработки и создания базы данных рекомендуется включать следующие этапы: формирование списка входной и выходной информации, спецификация требований, выбор структуры и модели базы данных, определение программных пакетов и аппаратной части для функционирования базы данных, создание интерфейса и порядка взаимодействия с системой базы данных, разработка принципов ее развития. В диссертации разработаны и приведены принципы формирования базы данных спектров ЭМИ ВВЭО, которые обеспечивают ее многофункциональное использование: для хранения информации о спектрах собственного ЭМИ ВВЭО., для предварительной оценки технического состояния ВВЭО в различные периоды его работы, для функционирования в составе информационно-аналитической системы (ИАС), причем база данных спектров ЭМИ должна органично вписаться в известные системы комплексной диагностики.

### **Заключение**

В работе предложен, обоснован и реализован оригинальный подход к решению актуальной задачи создания методов контроля и оценки текущего состояния электротехнического оборудования с использованием новых достижений в области информационно-измерительной техники. Наиболее существенные результаты работы.

1. Разработаны базовые принципы контроля электротехнического оборудования на основе анализа спектров его собственного электромагнитного излучения. Эти принципы сформированы на основе полученных автором экспериментальных данных и теоретических оценок спектрального состава электромагнитного излучения вблизи высоковольтного электроэнергетического оборудования. Установлено, что спектры ЭМИ индивидуальны для каждого типа оборудования в определенных частотных диапазонах.
2. Впервые дано описание излучающих свойств высоковольтного оборудования. С помощью теории вибраторных антенн определены информативные частотные диапазоны, в пределах которых можно эффективно осуществлять контроль оборудования, находящегося под рабочим напряжением. На основе предложенных критериев разработана методика оценки технического состояния высоковольтного оборудования под рабочим напряжением. Показано, что с помощью данной методики возможно осуществление паспортизации и контроля текущего состояния оборудования, ранжирование однотипного оборудования, а также выявление дефектов на ранней стадии их появления и развития. По результатам исследований получен патент РФ.
3. Изучены спектры электромагнитных возмущений при появлении и развитии в изоляции высоковольтного оборудования дефектов термоэлектрического характера. Показано, что значительная часть этих дефектов сопровождается электромагнитными возмущениями в

широком диапазоне частот, которые, попадая в резонансные частотные полосы внутренних колебательных систем высоковольтного оборудования, излучаются в окружающее пространство в основном в пределах информативных частотных полос.

4. Разработана методика регистрации спектров электромагнитного излучения с использованием серийно выпускаемого информационно-измерительного оборудования, а также даны рекомендации по формированию мобильных и стационарных информационно-измерительных комплексов. Экспериментальные образцы контрольно-измерительных комплексов успешно апробированы на электрических станциях и подстанциях Дальнего Востока и Сибири.

5. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований процессов распространения электромагнитных полей на территориях ряда электроэнергетических объектов Дальнего Востока. С помощью разработанных излучающих моделей высоковольтного оборудования рассчитаны и построены диаграммы распределения электромагнитного поля на открытых распределительных устройствах, позволяющие выработать рекомендации по выбору частотных диапазонов и размещению измерительных комплексов для большинства электроэнергетических объектов высоких классов напряжения.

6. На основе решения задачи расчета распространения электромагнитного поля через многослойные среды в закрытых распределительных устройствах показана целесообразность использования теории аналоговых цепных схем. Установлено, что электромагнитный контроль возможно осуществлять и при наличии многослойных перегородок.

7. Предложены критерии оценки технического состояния, позволяющие осуществлять контроль действующего электротехнического оборудования на основании анализа таких характеристик спектров электромагнитного излучения, как изменение уровня излучения, значение величины интегральной мощности излучения, количество превышений отдельными пиками спектра граничного уровня.

8. С помощью разработанных методик осуществлен эффективный многолетний электромагнитный контроль высоковольтного оборудования на подстанциях Приморского края, результаты которого позволяют рекомендовать электромагнитный способ для практического использования.

9. Впервые создан архив спектров собственного электромагнитного излучения высоковольтного оборудования на электроэнергетических объектах Дальнего Востока. Разработаны принципы формирования информационной базы данных для реализации электромагнитного способа контроля.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. *Юринов, В.М.* Применение аналоговых цепных схем для расчета многослойных экранов / В.М. Юринов, Н.В. Силин // Энергетика и транспорт. – 1977. – №2. – С. 84 – 90. (перечень ВАКа).
2. *Силин, Н.В.* Схема замещения для анализа сигналов от частичных разрядов / Н.В. Силин, М.А. Кац, А.А. Хазанов // Изв. Вузов России, Радиоэлектроника. – 2005. – №2. – С. 60 – 64. (перечень ВАКа).
3. *Силин, Н.В.* Моделирование процессов развития сигналов от частичных разрядов / Н.В. Силин, М.А. Кац, А.А. Хазанов // Изв. Вузов России, Радиоэлектроника. – 2005. – №4. – С. 28 – 31. (перечень ВАКа).
4. *Силин, Н.В.* Электромагнитный способ оценки технического состояния высоковольтного оборудования / Н.В. Силин // Промышленная энергетика. – 2006. – №1. – С. 8 - 11. (перечень ВАКа).
5. *Киншт, Н.В.* О способе контроля высоковольтного оборудования на основе анализа спектров его собственного электромагнитного излучения / Н.В. Киншт, В.Л. Лосев, Н.В. Силин, А.Б. Попович // Промышленная энергетика. - 2007. - №4. - С. 24 - 29. (перечень ВАКа).
6. *Силин, Н.В.* Контроль состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам его электромагнитного излучения / Н.В. Силин // Энергетика. - 2008. - №3. - С. 86 - 91. (перечень ВАКа).
7. *Силин, Н.В.* Электромагнитный контроль электроэнергетического оборудования / Н.В. Силин, Н.В. Коровкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. - №4. – С. 186 - 192 (перечень ВАКа).
8. *Антонов, А.А.* Диагностическая модель энергетических объектов транспорта на основе излучаемого электромагнитного поля / А.А. Антонов, Н.В. Силин, В.В. Клоков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. - №1. – С. 296 – 299. (перечень ВАКа).
9. *Kinsht, N.V.* Application of electromagnetic radiation of high-voltage for diagnostics of its technical state / N.V. Kinsht, M.A. Katz, N.V. Silin, O.V. Preobragenskaya, Y.B. Petropavlovsky // The papers of Int. Symp. on EMC, Wroclaw, June, 2000. - P. 36-39.
10. *Киншт, Н.В.* Диагностика электроэнергетического оборудования / Н.В. Киншт, М.А. Кац, Н.В. Силин // Труды первого инвест. Конгресса, г. Владивосток, 2000. – С. 159 –163.
11. *Kinsht, N.V.* Diagnostics of high-voltage equipment. Logical aspects / N.V. Kinsht, N.V. Silin, O.V. Preobrazhenskaya, N.N. Petrun'ko, A.B. Popovich // Pacific Science Review. – 2001. - Vol. 3. – P. 5-8.

12. *Силин, Н.В.* Использование широкополосных приемников серии AR для регистрации электромагнитных сигналов от частичных разрядов / Н.В. Силин, В.П. Говорухин, Ю.Б. Петропавловский, В.А. Клыковский // Актуальные проблемы диагностирования высоковольтного электроэнергетического оборудования: В сб. статей ИАПУ ДВО РАН. – 2001. – вып. 33. – С. 49 – 53.
13. *Силин, Н.В.* Динамика развития сигналов от частичных разрядов в конденсаторной бумаге / Н.В. Силин, Ю.Б. Петропавловский // Актуальные проблемы диагностирования высоковольтного электроэнергетического оборудования: В сб. статей ИАПУ ДВО РАН. – 2001. – вып. 33. – С. 54 – 57.
14. *Силин, Н.В.* Исследование сигналов от частичных разрядов в высоковольтной изоляции / Н.В. Силин, Ю.Б. Петропавловский // Актуальные проблемы диагностирования высоковольтного электроэнергетического оборудования: В сб. статей ИАПУ ДВО РАН. – 2001. – вып. 33. – С. 58 – 60.
15. *Силин, Н.В.* Системы диагностики маслонаполненного электроэнергетического оборудования / Н.В. Силин, Ю.Б. Петропавловский // Актуальные проблемы диагностирования высоковольтного электроэнергетического оборудования: В сб. статей ИАПУ ДВО РАН. – 2001. – вып. 33. – С. 60 – 65.
16. *Силин, Н.В.* Обзор физических представлений о частичных разрядах в высоковольтной изоляции / Н.В. Силин, М.А. Кац // Актуальные проблемы диагностирования высоковольтного электроэнергетического оборудования: В сб. статей ИАПУ ДВО РАН. - 2001. – вып. 33. – С. 24 – 35.
17. *Киншт, Н.В.* О спектральном составе сигналов вблизи высоковольтного оборудования / Н.В. Киншт, Н.В. Силин, Д.Д. Загоскин // Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность: Сб. докл. 7- ой межд. конф. по ЭМС / ВИТУ. - С.Петербург, 2002. – С. 136 –140.
18. *Киншт, Н.В.* Электромагнитная диагностика высоковольтного оборудования / Н.В. Киншт, Н.В. Силин, Д.Д. Загоскин // Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России: Труды межд. Научно-практической конференции/ СПбГПУ. - С.Петербург, 2002. - С. 230-231.
19. *Силин, Н.В.* Выбор антенны для регистрации электромагнитного излучения от высоковольтного оборудования / Н.В. Силин, М.Ю. Белушкин, В.В. Клоков // Энергетика: управление, качество и эффективность исследования энергоресурсов: Сб. докл. III всероссийской научно-техн. конф. с межд. участием / АГТУ. - Благовещенск, 2003. – С.452–455.
20. *Силин, Н.В.* Представление данных, полученных при изменении спектров сигналов от высоковольтного оборудования / Н.В. Силин, А.Б. Попович, Н.Н. Петрунько // Энергети-



ка: управление, качество и эффективность исследование энергоресурсов: Сб. докл. III все-российской научно-технической конференции с межд. участием / АГТУ. - Благовещенск, 2003. – С. 455–460.

21. *Силин, Н.В.* Высоковольтный силовой трансформатор как источник собственных электромагнитных излучений / Н.В. Силин, М.Ю. Белушкин, В.В. Клоков, В.А. Катанаев // Сборник трудов V международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2003. - С. 55–57.

22. *Силин, Н.В.* Применение аналоговых цепных схем для анализа распространения электромагнитного излучения от частичных разрядов / Н.В. Силин, В.В. Клоков // Транспортное дело России. – 2004. – № 3. – С. 98 –100.

23. *Силин, Н.В.* Оценка диагностической электромагнитной обстановки на энергетических объектах / Н.В. Силин, В.В. Клоков // Транспортное дело России. – 2004. – № 2. – С. 38 – 40.

24. *Силин, Н.В.* Исследование распределения электромагнитного поля вблизи высоковольтного трансформатора // Труды Дальн. гос. техн. ун-та, Владивосток: Изд-во ДВГТУ. – 2004. – вып. 136. – С. 196–200.

25. *Belushkin, M.Y.* Estimation of electromagnetic environment near the high-voltage power autotransformers / M.Y. Belushkin, V.V. Klokov, N.V. Silin, V.A. Katanaev, A.B. Popovich // Progress in Electromagnetics: The papers of Int. Research Symp., Pisa, Italy, March 28-31. - 2004. - P. 839-842.

26. *Silin, N.V.* Experience of the general estimation of a power transformers technical condition on the basis of own electromagnetic radiation spectrum analysis / N.V. Silin, M.Y. Belushkin, V.A. Katanaev, A.B. Popovich // Euro Electromagnetics: The papers of Int. Symp., Magdeburg, Germany, June 8-12. - 2004. - P. 109-111

27. *Силин, Н.В.* Схемные модели изоляции для изучения спектров электромагнитного излучения от частичных разрядов // Труды Дальн. гос. техн. ун-та, Владивосток: Изд-во ДВГТУ. – 2005.– вып. 137. – С. 225 – 230.

28. *Киншт, Н.В.* Анализ электромагнитного излучения силового автотрансформатора/ Н.В. Киншт, В.Л. Лосев, Н.В. Силин, М.Ю. Белушкин, А.Б. Попович // Сборник трудов VI международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2005. - С.124–129.

29. *Силин, Н.В.* Оценка стабильности работы высоковольтного оборудования на основе анализа его собственного электромагнитного излучения // Энергетика: управление, каче-

ство и эффективность исследования энергоресурсов: Сб. докл. III всероссийской научно-техн. конф. с межд. участием / АГТУ. - Благовещенск, 2005. - С. 402 – 406.

30. *Силин, Н.В.* Электромагнитный контроль состояния обмоток силового трансформатора / Н.В. Силин, В.В. Клоков, М.Ю. Белушкин, А.Б. Попович, Е.А. Конкин // Транспортное дело России. – 2006. – №1. - С. 153 – 154.

31. *Силин, Н.В.* Информационная база данных для электромагнитной диагностики высоковольтного оборудования / Н.В. Силин, Е.А. Конкин, А.Б. Попович // Транспортное дело России. – 2006. – №1. - С. 154 -156.

32. *Силин, Н.В.* Анализ электромагнитного излучения силового автотрансформатора/ Н.В. Силин, В.В. Клоков В.В. Р.А. Гречанюк // Сборник трудов VII международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2007. - С. 114–117.

33. *Пат. на изобрет. Российская федерация.* Способ контроля технического состояния электроэнергетического оборудования / Киншт Н.В., Лосев В.Л., Силин Н.В., Попович А.Б., Петрунько Н.Н.; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН. - № 2006111647/28(01664) от 10.04.2006.

34. *Силин, Н.В.* К вопросу о выборе частотного диапазона для электромагнитного контроля ВВЭО / Н.В. Силин, В.В. Клоков В.В., А.А. Антонов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Сб. докл. Всероссийской научно-практической конференции с межд. участием, Иркутск, 2008. – С. 55–60.

Николай Витальевич Силин

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗЛУЧАЕМОГО ИМ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Автореферат

Подписано в печать 31.03.2009 Формат 60x84/16

Усл. печ. л. 2,1 Уч.-изд. л 1,97

Тираж 100 экз. Заказ 064

---

Отпечатано в Типографии ДВГТУ

690990, Владивосток, ул. Пушкинская, 10