

На правах рукописи



КОМОЛОВ Александр Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ
СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО ТОКУ УТЕЧКИ**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО СамГУПС, г. Самара).

Научный руководитель:

Руцкий Владимир Михайлович

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Лавринович Валерий Александрович,

доктор технических наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессор кафедры электроэнергетических систем

Овсянников Александр Георгиевич,

доктор технических наук, профессор, Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО Самарский государственный технический университет

Защита состоится 24 апреля 2013 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а.

Автореферат разослан «15» марта 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Наименее надежной составляющей системы тягового электроснабжения железных дорог (СТЭЖД) является контактная сеть (КС). Этот факт обуславливается тем, что элементы КС не имеют резерва, испытывают на себе различные климатические воздействия окружающей среды в широких диапазонах изменений, электрические воздействия и механические воздействия со стороны электроподвижного состава. В связи с этим абсолютное большинство (до 95 %) отказов СТЭЖД происходит на устройствах КС.

Одной из функциональных подсистем КС, особенно сильно зависящих от воздействий окружающей среды, является внешняя изоляция, включающая в себя воздушные промежутки и поверхность твердой изоляции в атмосферном воздухе.

Надежность работы внешней изоляции СТЭЖД обеспечивается, в первую очередь, обоснованными проектными решениями по выбору уровня электрической прочности изоляции и соответствующими эксплуатационными мероприятиями по его поддержанию.

Однако, как свидетельствует опыт эксплуатации, в ряде случаев проектные решения по выбору изоляции СТЭЖД не были достаточно обоснованы, и это привело к тому, что выбранные при проектировании и реализованные при строительстве уровни изоляции в настоящее время не соответствуют условиям эксплуатации.

Это является одной из причин того, что значительное (до 30 %) количество отказов КС происходит по причине нарушения работоспособного состояния изоляции. До 85 % отказов изоляторов приходится на участки, электрифицированные на переменном токе, при этом сами изоляторы в большинстве случаев не разрушаются и электрическая прочность внешней изоляции восстанавливается. Таким образом, первопричиной отказа в данном случае является либо изначально неверно выбранный уровень изоляции, либо изменение условий эксплуатации по сравнению с теми, которые были приняты при проектировании.

В связи с вышеизложенным можно сформулировать две задачи технической диагностики внешней изоляции:

1) выявление участков, на которых необходимо усиление изоляции (повышение электрической прочности путем увеличения длины пути утечки изоляционных конструкций, применения твердых гидрофобных покрытий, замены изоляционных конструкций из традиционных изоляционных материалов на полимерные изоляторы и др.);

2) оперативный контроль электрической прочности изоляции, направленный на своевременное проведение соответствующих профилактических мероприятий по приведению электрической прочности изоляции к уровню, соответствующему условиям эксплуатации (чистка изоляции, обмыв под напряжением и др.).

Однако существующие методы диагностики не позволяют решить эти задачи оперативно и в необходимом для достоверной диагностики объеме. Поэтому совершенствование диагностики внешней изоляции СТЭЖД является **актуальной** задачей.

Целью исследования является совершенствование диагностики системы тягового электроснабжения за счет разработки метода контроля технического состояния внешней изоляции по току утечки.

Идея исследования заключается в определении параметров тока утечки, позволяющих судить о потенциально опасном состоянии слоя загрязнения на поверхности тарельчатых изоляторов, и обосновании их применения для целей диагностики внешней изоляции контактной сети системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока.

Научные и практические задачи, решаемые для достижения поставленной цели исследования:

- разработка специальной экспериментальной установки для моделирования основных видов загрязнений и увлажнений, наблюдаемых в процессе эксплуатации внешней изоляции системы тягового электроснабжения;
- проведение экспериментальных исследований с целью регистрации значений тока утечки через загрязненные изоляторы при различных сочетаниях интенсивности увлажнения и максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения;
- определение статистических зависимостей параметров тока утечки внешней изоляции системы тягового электроснабжения от условий проведения эксперимента;
- разработка математической модели определения максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения при его увлажнении до насыщения по параметрам тока утечки;
- разработка методики определения соответствия электрической прочности внешней изоляции системы тягового электроснабжения условиям эксплуатации.

Объектом исследования является внешняя изоляция контактной сети системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока. **Предметом исследования** – параметры импульсного тока утечки, протекающего по внешней изоляции контактной сети при увлажнении ее поверхности в условиях эксплуатации.

Научная новизна работы

1. Разработана диагностическая модель изолятора в загрязненном и увлажненном состоянии, учитывающая влияние максимальной удельной поверхностной проводимости и водосодержания слоя загрязнения на величину тока утечки.
2. Экспериментально получены новые данные о токах утечки по загрязненной и увлажненной поверхности внешней изоляции системы тягового электроснабжения в широких пределах изменения степени загрязнения изоляции и интенсивности ее увлажнения.
3. Определены параметры разработанной диагностической модели на основании экспериментальных данных о токах утечки при различных сочетаниях степени загрязнения и интенсивности увлажнения внешней изоляции.

Практическая ценность работы

1. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для регистрации токов утечки предварительно загрязненных изоляторов в процессе увлажнения при воздействии высокого напряжения (до 100 кВ) промышленной частоты.

2. Разработан алгоритм, позволяющий по амплитудным значениям импульсов тока утечки определять удельную поверхностную проводимость слоя загрязнения внешней изоляции при его увлажнении до насыщения в условиях эксплуатации.

3. Разработана методика проверки электрической прочности внешней изоляции контактной сети системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока на соответствие условиям эксплуатации.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Регрессионная модель определения удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения при увлажнении до насыщения по параметрам импульсного тока утечки.

2. Алгоритм определения удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения при увлажнении до насыщения по параметрам импульсного тока утечки.

3. Методика проверки электрической прочности внешней изоляции системы тягового электроснабжения на соответствие условиям эксплуатации.

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечена соответствием характеристик используемого испытательного оборудования требованиям нормативных документов по проведению высоковольтных испытаний, применением поверенных средств измерения, повторяемостью измерений и их соответствием результатам, опубликованным в научной литературе.

Полученные в экспериментах характеристики тока утечки по загрязненной поверхности качественно и количественно согласуются с результатами других авторов, опубликованными ранее.

Методы исследований определялись характером каждой из поставленных задач и опирались на положения теории развития разряда в воздухе вдоль загрязненной и увлажненной поверхности. В процессе исследования были использованы методы постановки и планирования эксперимента, цифровой и статистической обработки данных, методы дисперсионного и регрессионного анализа, применялось программирование на языках Visual Basic и Object Pascal. Для построения графических зависимостей и диаграмм были использованы пакеты прикладных программ StatSoft Statistica, MathCAD, MATLAB Simulink.

Экспериментальные данные получены в лаборатории «Техника высоких напряжений» Самарского государственного университета путей сообщения в результате регистрации токов утечки по поверхности загрязненной и увлажненной изоляции.

Личный вклад соискателя заключается в решении задач исследования, разработке и обосновании положений, составляющих научную новизну и практическую значимость работы, разработке и изготовлении экспериментальной установки, в проведении анализа и обработки экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные материалы диссертации поэтапно докладывались, обсуждались и получили одобрение на XXXVIII научной конференции студентов и аспирантов (г. Самара, 2011 г.), Международной научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (г. Тольятти, 2009 г, ТГУ), на восьмом ежегодном научном

семинаре «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования» (г. Пермь, 2011 г.), научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации электрического транспорта» (г. Омск, 2011 г.), научно-практических семинарах кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» СамГУПС и кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» СамГТУ.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы в практике диагностирования электрической прочности высоковольтной изоляции и при составлении карт степеней загрязнения в ООО «ЭТС ИНТЕК-Сервис». Также результаты используются в учебном процессе и в научно-исследовательской работе СамГУПС.

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в 11 печатных работах общим объемом 3,9 п.л. (авторский вклад – 2,7 п.л.), в том числе – 8 статей, тезисы двух докладов и 1 патент на полезную модель; в том числе 3 статьи – в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных перечнем ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 149 страниц основного текста, 69 рисунков, 14 таблиц и 4 приложения на 40 страницах. Список использованных источников содержит 115 наименований. Общий объем работы – 189 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной проблемы диагностики внешней изоляции комплекса электроустановок тягового электроснабжения, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность результатов исследования, приведены положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации.

В первой главе проанализирована работа внешней изоляции КС СТЭЖД в условиях загрязнения и увлажнения при воздействии рабочего напряжения.

Исследования в этом направлении проводились в НИИПТ, ВЭИ, ОРГРЭС, МЭИ, СибНИИЭ, НГТУ. Изучению и решению вопросов проектирования и эксплуатации высоковольтной изоляции в условиях загрязненной атмосферы посвящены научные труды Александрова Г.Н., Мерхалева С.Д., Остапенко Е.И., Овсянникова А.Г., Руцкого В.М., Соломоника Е.А и других авторов.

В главе рассмотрена взаимосвязь электрической прочности изоляции и воздействующих на изоляцию КС в процессе эксплуатации напряжений (рис. 1).

Здесь 1 – электрическая прочность гирлянд сухих изоляторов при правильно выбранном уровне изоляции; 2 – снижение электрической прочности гирлянд изоляторов при увлажнении загрязненной поверхности при верно выбранном уровне изоляции; 3 – электрическая прочность гирлянд сухих изоляторов при неверно выбранном уровне изоляции; 4 – электрическая прочность гирлянд изоляторов при увлажнении загрязненной поверхности при неверно выбранном уровне изоляции.

Несоответствие электрической прочности изоляции КС условиям эксплуатации (рис. 1, график 4) на некоторых участках КС подтверждается опытом эксплуатации, который также проанализирован в главе.

Также были рассмотрены и проанализированы существующие способы и методы диагностирования электрической прочности внешней изоляции. В результате было установлено, что основным направлением диагностики внешней изоляции системы тягового электроснабжения является обнаружение изоляторов, полностью потерявших свою изолирующую способность в результате пробоя, т.е. разряда сквозь толщу диэлектрика. Актуальность этого направления диагностики в значительной степени снижается в связи с тенденцией замены фарфоровых изоляторов на стеклянные (самодиагностирующиеся). В то же время, диагностике изоляторов с электрической прочностью, сниженной вследствие загрязнения их поверхности, уделяется недостаточное внимание, хотя именно такие изоляторы могут в значительной мере снижать уровень надежности системы тягового электроснабжения.

Во второй главе описаны процессы, сопровождающие протекание тока утечки по поверхности внешней изоляции СТЭЖД, согласно теории образования поверхностных частичных разрядов на загрязненной и увлажненной изоляционной поверхности и разработана диагностическая модель изолятора в загрязненном и увлажненном состоянии.

В качестве критерия соответствия внешней изоляции СТЭЖД условиям эксплуатации с учетом статистического характера факторов, влияющих на работу внешней изоляции, рассмотрен коэффициент запаса электрической прочности k_z , то есть отношение минимального пятидесятипроцентного влагоразрядного напряжения изоляционной конструкции $U_{50\%вр\ min}$ к наибольшему рабочему фазному напряжению КС $U_{p\ max}$:

$$k_z = \frac{U_{50\%вр\ min}}{U_{p\ max}}, \quad (1)$$

где под минимальным пятидесятипроцентным влагоразрядным напряжением изоляционной конструкции понимается пятидесятипроцентное влагоразрядное напряжение при максимальном значении удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения, характерного для района расположения участка КС.

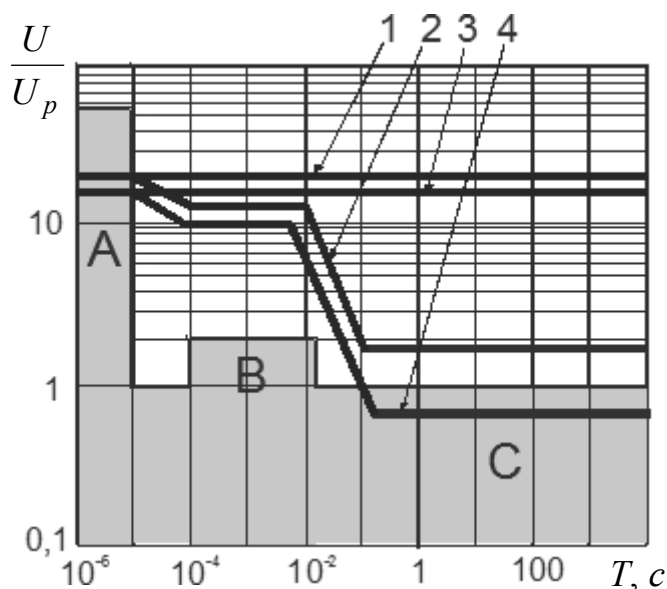


Рис. 1. Воздействующие на изоляцию КС напряжения и электрическая прочность изоляции: А — область воздействия перенапряжений при прямом ударе молнии в КС; В — область воздействия коммутационных перенапряжений; С — область воздействия рабочего напряжения

Показано, что коэффициент запаса, обеспечивающий оптимальную с технико-экономической точки зрения надежность эксплуатации внешней изоляции на уровне 1 допустимое отклонение по причине перекрытия загрязненной изоляции за 10 лет на 100 км эксплуатационной длины КС, зависит от числа гирлянд изоляторов на фидерном участке КС и числа опасных увлажнений $n_{оп\ увл}$ (рис. 2).

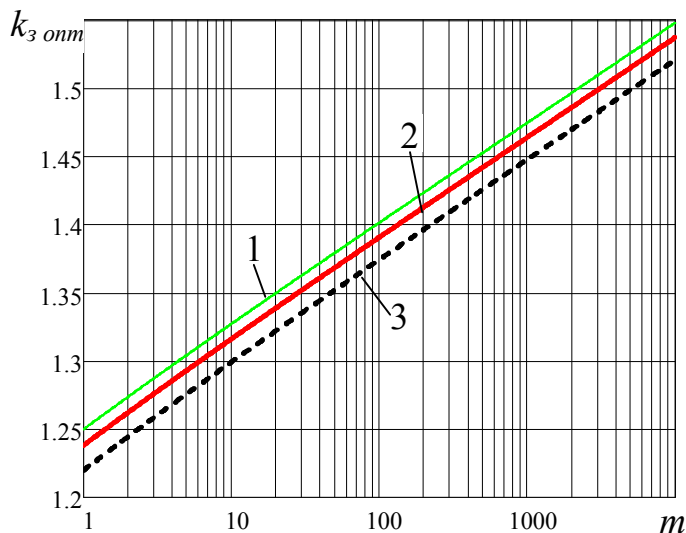


Рис. 2. Зависимость оптимального коэффициента запаса ($k_{3\text{ онм}}$) от числа изоляционных конструкций (m) при годовом числе опасных увлажнений:
 1 – $n_{оп\ увл} = 15$; 2 – $n_{оп\ увл} = 10$; 3 – $n_{оп\ увл} = 5$

Предложено определять коэффициент запаса электрической прочности через максимальную удельную поверхностную проводимость (МУПП) слоя загрязнения, т.е. проводимость слоя загрязнения при его увлажнении до насыщения. Для определения этой характеристики построена математическая модель влияния МУПП и водосодержания слоя загрязнения на удельную поверхностную проводимость слоя загрязнения.

Указанная модель позволила установить связь между МУПП и силой тока стабильно горящей частичной дуги при различных значениях водосодержания слоя загрязнения. Полученные зависимости приведены на рис. 3.

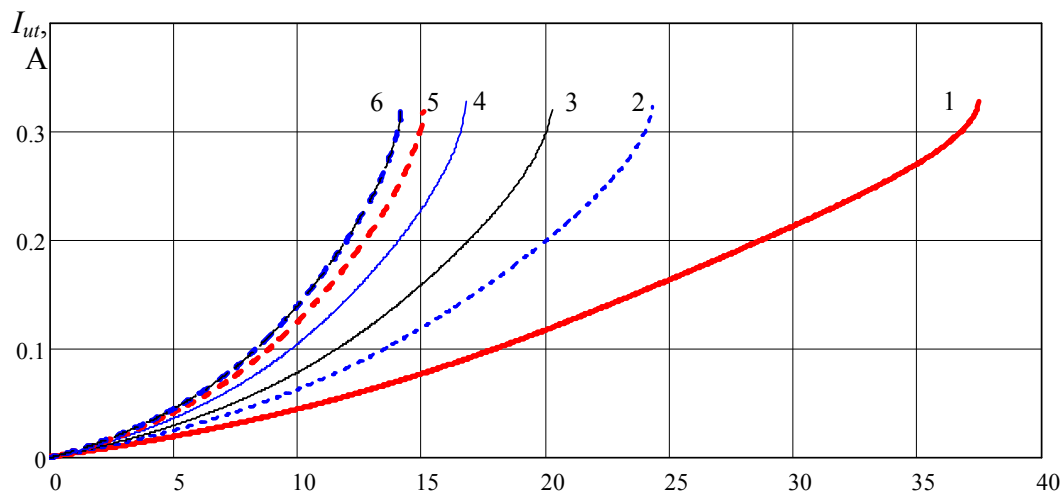


Рис.3. Зависимость тока утечки стабильно горящей частичной дуги от γ_r , мкСм/я загрязнения γ_r при: 1 – $\gamma_B = 0,5$ мг/см²; 2 – $\gamma_B = 1$ мг/см²; 3 – $\gamma_B = 1,5$ мг/см²; 4 – $\gamma_B = 2$ мг/см²; 5 – $\gamma_B = 2,5$ мг/см²; 6 – $\gamma_B = 3$ мг/см²

С использованием указанной зависимости построена диагностическая модель изолятора в загрязненном и увлажненном состоянии, позволяющая определять МУПП γ_r по силе тока стабильно горящей частичной дуги и водосодержанию слоя загрязнения γ_B .

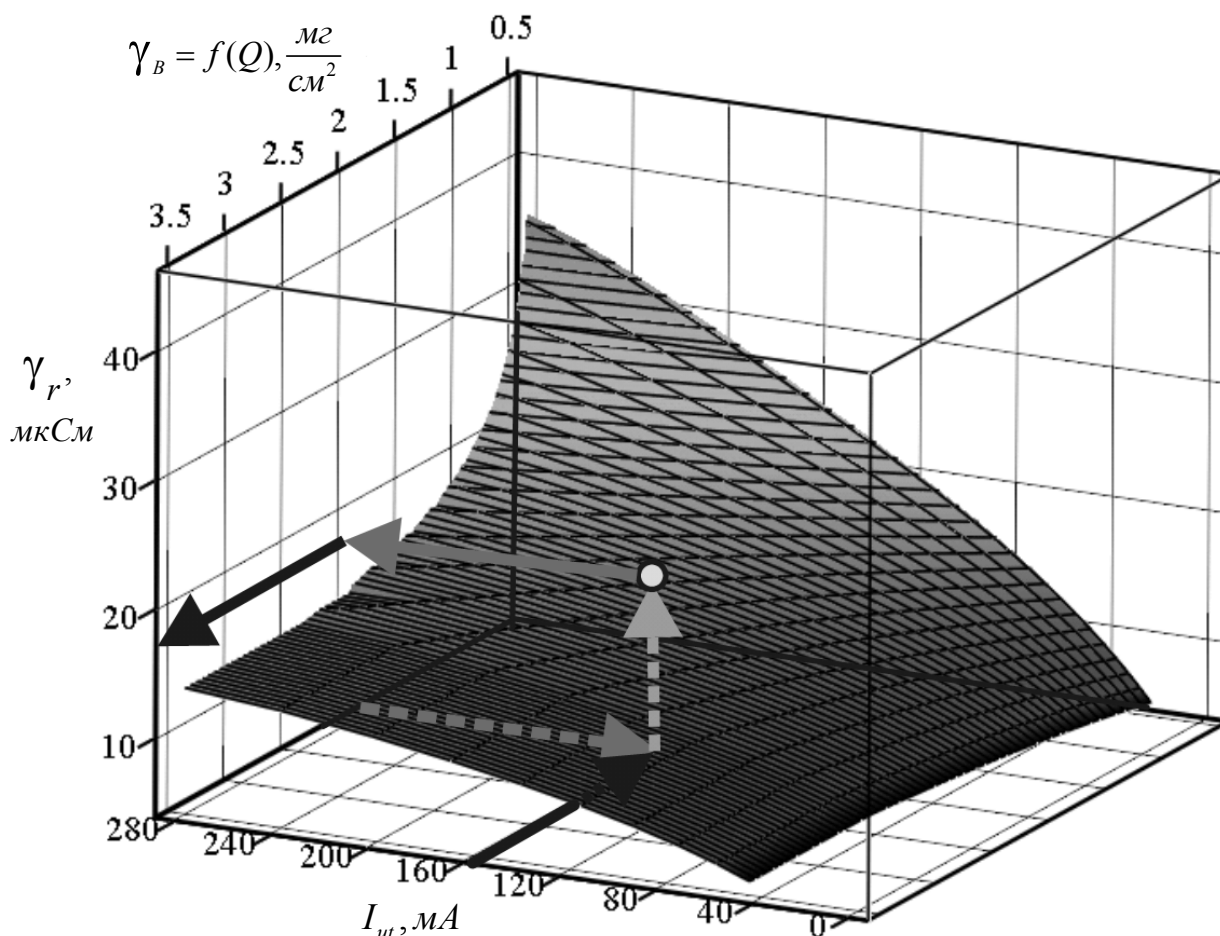


Рис. 4. Диагностическая модель изолятора в загрязненном и увлажненном состоянии

На основании полученных результатов сделан вывод о возможности определения МУПП γ_r слоя загрязнения по величине тока стабильно горящей частичной дуги и величине водосодержания γ_v слоя загрязнения, однако прямое измерение этих величин не представляется возможным.

Диагностическая модель была разработана в предположении о неизменности приложенного напряжения во времени. При синусоидальном напряжении на изоляторе основные процессы, происходящие на его поверхности, остаются теми же, однако время возникновения и существования поверхностного частичного разряда ограничивается тем интервалом времени, когда модуль мгновенного значения напряжения на изоляторе превышает напряжение зажигания дуги. Поэтому значения тока утечки, протекающего по поверхности изолятора при переменном напряжении, оказываются меньше вычисленных на основании модели.

С другой стороны, на токи утечки в процессе эксплуатации влияют многие другие случайные факторы, учесть которые в модели не представляется возможным. Поэтому необходимо проведение экспериментального уточнения параметров диагностической модели с целью выбора таких параметров тока утечки, которые максимально близко позволяли бы судить о МУПП слоя загрязнения (рис. 5).

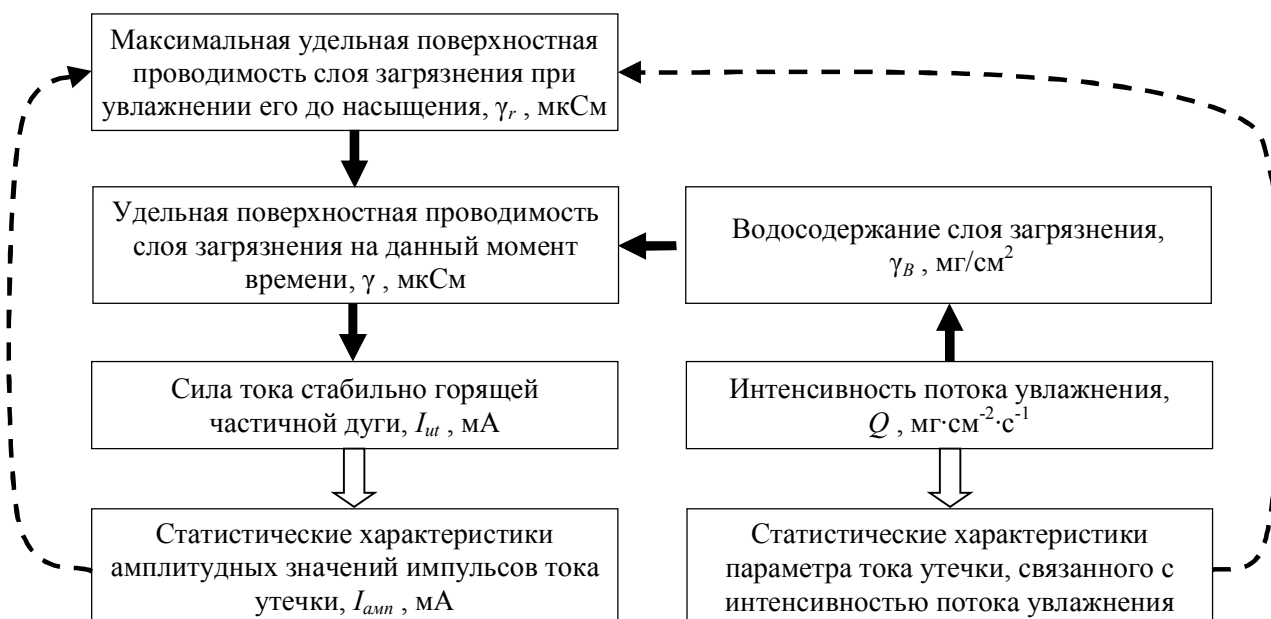
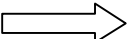


Рис. 5. Концепция развития диагностической модели изолятора в загрязненном и увлажненном состоянии

-  – прямая физическая связь между параметрами;
-  – вероятностная связь между параметрами;
-  – диагностическая связь между параметрами.

В третьей главе диссертационной работы приведены результаты разработки и описание приборного и методического обеспечения, требуемого для проведения высоковольтного эксперимента по измерению и регистрации токов утечки через поверхность загрязненной внешней изоляции системы тягового электроснабжения в сочетании с искусственными увлажнениями различной интенсивности при длительном приложении переменного напряжения промышленной частоты.

Для выполнения поставленных задач требовалось разработать и изготовить экспериментальный комплекс, позволяющий моделировать условия эксплуатации изоляции в открытой атмосфере. В качестве объектов эксперимента были выбраны подвесные тарельчатые стеклянные изоляторы типа ПС120-Б, обладающие типичной конфигурацией для изоляторов нормального исполнения и нашедшие широкое применение в КС СТЭЖД.

Загрязнение изоляторов проводилось согласно ГОСТ 10390-86 «Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ. Методы испытаний внешней изоляции в загрязненном состоянии» методом предварительного загрязнения: изоляторы искусственно покрывались равномерным слоем загрязняющего вещества путем погружения изолятора в водную суспензию.

В качестве загрязняющего вещества использовалась суспензия, состоящая из 40 г каолина, 1000 г воды и различного количества поваренной соли в зависимости от требуемой степени загрязнения (СЗ). Удельная электрическая проводимость воды при температуре 20 °С составляла не более 400 мкСм·см⁻¹, что удовлетворяет требованиям ГОСТа (не более 500 мкСм·см⁻¹).

Суспензия, соответствующая требуемой для проведения эксперимента СЗ изоляции, использовалась для загрязнения партии изоляторов в количестве 30

штук. После полного высыхания поверхности изоляторов на двух случайно отобранных объектах производились измерения поверхностной плотности загрязнения, для чего с пяти частей изоляционной детали счищался слой загрязнения, определялась его масса и делилась на площадь очищенной поверхности. Полученные значения поверхностной плотности загрязнения отличались от среднего по изолятору значения не более, чем на 15 %, что свидетельствует о достаточно высокой степени равномерности нанесения загрязняющего вещества (стандартом допускается отклонение до 25 %).

При проведении испытаний методом предварительного загрязнения в качестве меры степени загрязнения используется удельная поверхностная электрическая проводимость, измеряемая на испытуемом или контрольном изоляторе, находящемся в одинаковых условиях с испытуемым.

Удельную поверхностную проводимость слоя загрязнения при его увлажнении до насыщения γ_r , мкСм, определяют по следующей формуле:

$$\gamma_r = \frac{K_\phi}{R}, \quad (2)$$

где R – сопротивление изолятора в состоянии увлажнения до насыщения, МОм;
 K_ϕ – коэффициент формы изолятора, зависящий только от его геометрических параметров.

Коэффициенты формы для всех типов изоляторов являются справочными данными; для исследуемого изолятора ПС120-Б $K_\phi = 0,8$.

Поверхностное сопротивление сильно зависит от содержания влаги в слое загрязнения и достигает своего наименьшего значения при его увлажнении до состояния насыщения. Увлажнение сверх этого предела вызывает разрушение слоя загрязнения и приводит к образованию капель на нижней поверхности изолятора, вместе с которыми вымываются проводящие примеси. В естественных условиях такой процесс наблюдается при дождях сильной интенсивности и носит название естественной очистки изоляции.

Для корректного проведения эксперимента было необходимо точно определять максимальную поверхностную проводимость слоя загрязнения, поэтому требовалось аккуратно увлажнять поверхность изолятора и непрерывно измерять его сопротивление. Измерение сопротивления осуществлялось с помощью мегомметра на 2500 В в пределах от 20 до 200 кОм. Зафиксированное минимальное значение сопротивления указывало на достижение состояния насыщения, после этого увлажнение прекращалось. Подобные измерения проводились на каждом исследуемом изоляторе для сокращения возможной дисперсии значений удельной поверхностной проводимости.

Для создания условий эксперимента, наиболее полно соответствующих условиям эксплуатации, был проведен анализ наиболее опасных с точки зрения снижения изолирующей способности видов увлажнения, каковыми являются плотные туманы и морозящие дожди. Выявлено, что из этих двух видов более опасными являются плотные адвективные туманы, так как они обеспечивают более равномерное и всестороннее увлажнение поверхности изоляторов, включая ее нижнюю часть.

Известно, что для адвективных туманов характерный размер капель составляет от 5 до 30 мкм с модальным значением 11,5 мкм, причем вероятность появления капель с размером менее 8 и более 20 мкм составляет менее 10 %. Также известно, что в увлажнении туманами поверхности изоляторов решающую роль играет механизм инерционного осаждения капель влаги, который проявляется в случае движения тумана относительно изолятора, т.е. при наличии ветра. Учитывая, что адвективные туманы наиболее часто сопровождаются ветром скоростью от 0,5 до 5 м/с, принято считать, что именно они являются наиболее неблагоприятным видом увлажнения для загрязненной изоляции.

Таким образом, для моделирования увлажнения, схожего по характеристикам с природными туманами, необходимо создать поток мелкодисперсной влаги с удельной проводимостью не более $200 \text{ мкСм} \cdot \text{см}^{-1}$ и размером капель в пределах 8-20 мкм, движущийся со скоростью в пределах от 0,5 до 5 м/с.

Требуемым характеристикам соответствует поток увлажненного воздуха, создаваемый дисковыми увлажнителями воздуха. Распыление воды до мельчайших капель в них происходит за счет центробежных сил на краях быстро вращающегося диска. Создающийся аэрозоль с помощью встроенного вентилятора направляется через сопло в окружающий воздух. Заявленный производителем размер капель составляет 8–15 мкм, скорость потока увлажнения варьируется в пределах от 1 до 2 м/с. Поэтому можно считать, что при подаче в такой увлажнитель дистиллированной воды с проводимостью ниже $200 \text{ мкСм} \cdot \text{см}^{-1}$, поток увлажнения на его выходе соответствует мощным природным адвективным туманам, сопровождаемым скоростью ветра 1–2 м/с.

Для изменения интенсивности увлажнения осуществлялось ограничение выходящего из сопла факела и тем самым снижалось количество влаги, поступающее на поверхность гирлянды. Таким образом были реализованы четыре различных интенсивности поступления влаги на изоляционную поверхность испытуемых изоляторов.

Далее были рассмотрены требования, предъявляемые к источнику напряжения для проведения испытаний. Согласно ГОСТ 10390–86, источник переменного напряжения (испытательный трансформатор вместе с регулирующим устройством) следует выбирать так, чтобы эффективное значение тока короткого замыкания не менее чем в 10 раз превышало наибольшее значение амплитуды импульсов тока утечки по испытуемому изолятору, возникающих в процессе испытаний и не приводящих к перекрытию изолятора.

При испытании напряжением 27,5 кВ гирлянды из четырех изоляторов с максимальной удельной поверхностной проводимостью 28 мкСм, характерной для 3 СЗ, в сочетании с самым неблагоприятным режимом увлажнения максимальное амплитудное значение тока утечки составляло 102 мА. Поэтому для выполнения вышеуказанного требования достаточно, чтобы эффективное значение тока короткого замыкания источника напряжения превышало 1 А.

Под такие требования подходит источник на базе испытательного однофазного трансформатора ИОМ-100/25 с максимальным напряжением высокой стороны 100 кВ и мощностью 25 кВА. Регулировка напряжения осуществлялась на низкой стороне испытательного трансформатора посредством однофаз-

ного лабораторного автотрансформатора TDGC-30 мощностью 30 кВА с пределом регулирования напряжения от 0 до 250 В. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 6.

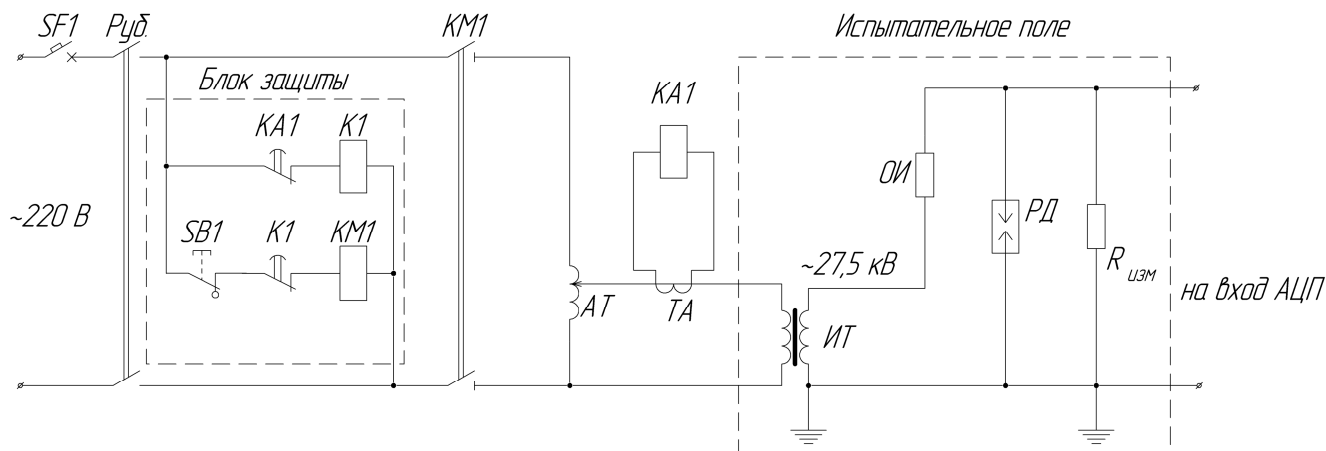


Рис. 6. Принципиальная схема электрической части лабораторного стенда:
SF1 – автоматический выключатель, $I_{\text{ном}} = 160$ А; *SB1* – кнопка «СТОП»; *КМ1* – контактор;
ТА1 – трансформатор тока, $K_m = 30$; *КА1* – электромагнитное токовое реле РТ-81; *К1* – промежуточное реле; *АТ* – однофазный автотрансформатор TDGC-30; *ИТ* – испытательный трансформатор ИОМ-100/25; *ОИ* – объект испытаний (гирлянда изоляторов); *РД* – разрядник; $R_{\text{изм}}$ – измерительное сопротивление.

Для обеспечения защиты трансформаторов от протекания токов, превышающих номинальные значения, была установлена токовая защита на базе реле РТ-81, включенного через трансформатор тока в цепь вторичной обмотки автотрансформатора. При достижении током в измерительной цепи уставки срабатывания питание стенда прекращается.

По результатам расчетов эффективное значение тока короткого замыкания для указанной установки составило 1,25 А. Следовательно, такой источник переменного напряжения позволяет осуществлять испытания изоляции с амплитудами токов утечки в предразрядном режиме до 125 мА.

Для измерения тока утечки через испытуемую гирлянду изоляторов был использован измерительный шунт, включенный последовательно с ней в высоковольтную цепь. Для обеспечения безопасности параллельно измерительному шунту были включены два разрядника на напряжение 50 В. Падение напряжения на зажимах шунта прямо пропорционально протекающему через цепь «испытательный трансформатор-гирлянда-шунт» току, который при малом значении сопротивления шунта (40 Ом) можно принять равным току утечки.

Таким образом, задача сводится к необходимости обеспечить измерение и регистрацию в цифровом виде падения напряжения на измерительном сопротивлении. Максимальное значение падения напряжения определяется максимальным значением тока утечки и при указанной величине 125 мА составляет 5 В.

В соответствии с предъявленными требованиями было выбрано аналого-цифровое устройство S-Recorder Е российского производства, позволяющее измерять и сохранять в файл на персональном компьютере падение напряжения в пределах ± 10 В с частотой дискретизации до 100 кГц. Такая частота позволяет получить довольно подробную картину изменения токов утечки под воздействием си-

нусоидального напряжения и фиксировать моменты резкого изменения тока утечки при образовании на изоляторах поверхностных частичных разрядов (ПЧР).

В качестве границ уровней первого фактора выбраны значения, рекомендованные ПУЭ в качестве минимальных для градации по степеням загрязнения, а именно: для 1-й СЗ – 5 мкСм, для 2-й – 10 мкСм, для 3-й СЗ – 20 мкСм, для 4-й – 30 мкСм. В качестве уровней второго фактора использованы измеренные значения интенсивности увлажнения при четырех различных режимах работы дискового увлажнителя.

В четвертой главе приведены результаты регистрации токов утечки, представлены результаты статистической обработки и регрессионного анализа экспериментальных данных.

Измерение и регистрация токов утечки проводились в течение одного часа с начала увлажнения. Как правило, первые 20–30 минут (в зависимости от интенсивности увлажнения) разрядные процессы на поверхности изоляторов проявлялись прерывисто, неустойчиво. Предполагается, что это связано с процессом насыщения слоя загрязнения влагой.

После завершения этого процесса на гирляндах образовывались поверхностные частичные разряды, акустические сигналы которых были хорошо слышны, а свечение разрядов наблюдалось невооруженным глазом при солнечном свете. На экране компьютера появление разрядов сопровождалось резкими, скачкообразными изменениями значений тока утечки на участке синусоиды, приблизительно соответствующем максимальной амплитуде приложенного напряжения (рис. 7).

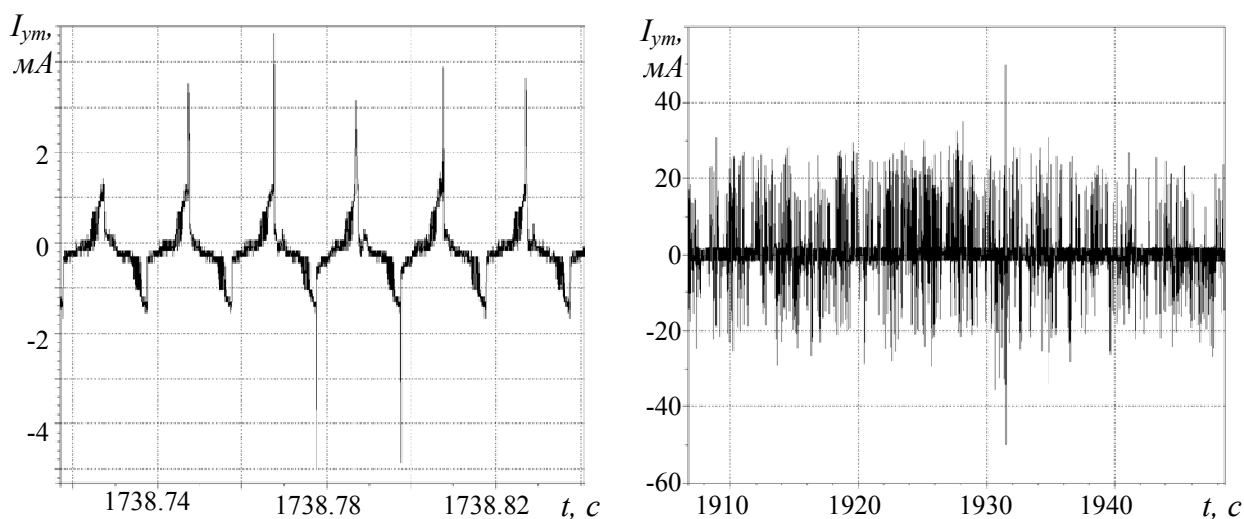


Рис. 7. Участки осциллограмм тока утечки гирлянды из 4-х изоляторов ПС120-Б, $\gamma_r = 14$ мкСм (соответствует второй СЗ), $Q = 0,005$ мг·с⁻¹·см⁻² длительностью: а) 120 мс; б) 40 с

Для обработки данных было решено использовать пакет прикладных программ Statistica, т.к. он позволяет надежно совершать импорт данных из файлов больших размеров, и в дальнейшем осуществлять их фильтрацию, сортировку и статистическую обработку.

В главе описан алгоритм обработки экспериментальных данных для повышения их информативности. В качестве примера его использования на рис. 8 представлены первичные данные о мгновенных значениях тока утечки,

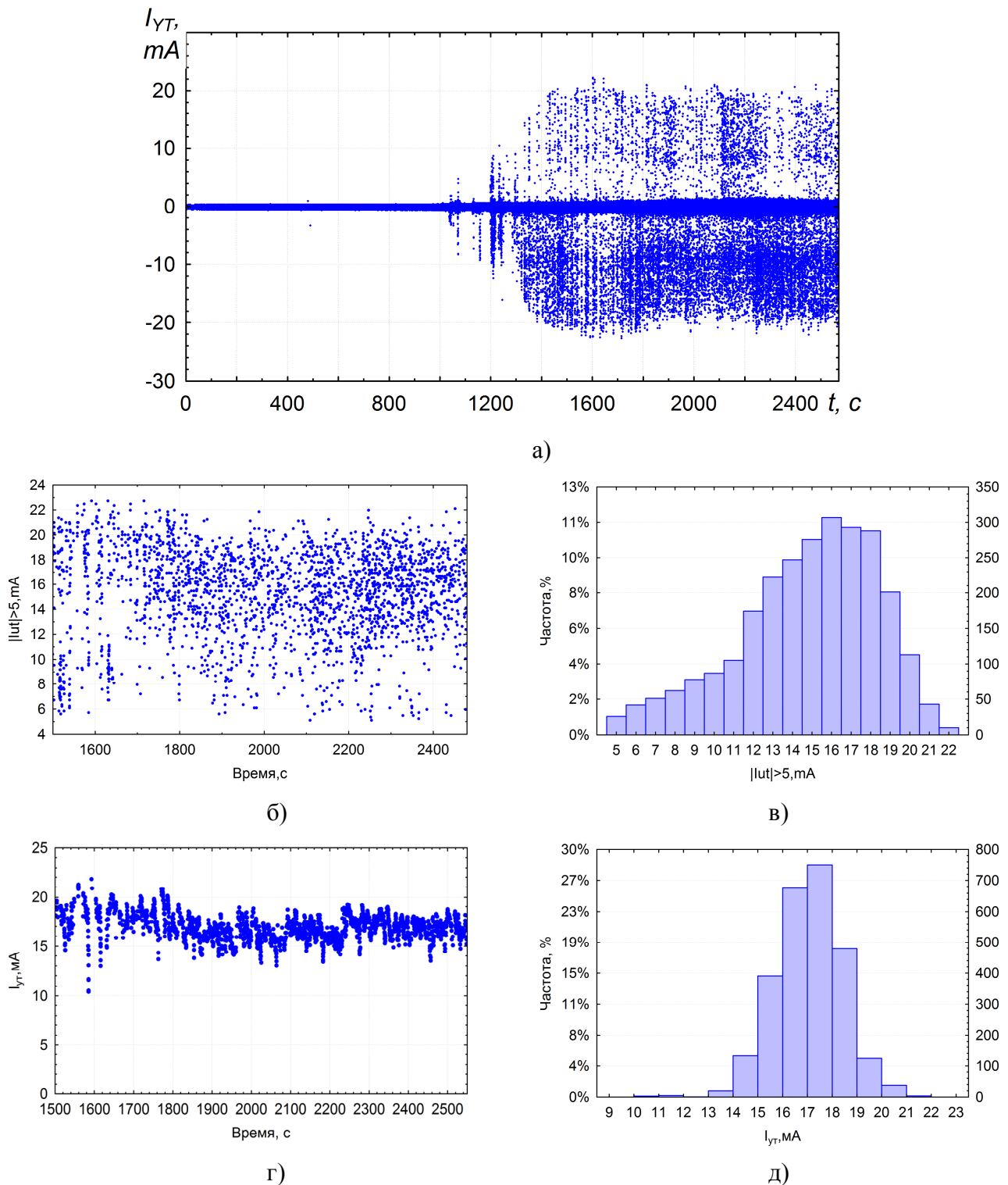


Рис. 8. Значения тока утечки при испытании 4-х изоляторов ПС120-Б напряжением 27,5 кВ при $\gamma_r = 14$ мкСм, $Q = 0,0022$ мг·с⁻¹·см⁻²: а – осциллограмма тока утечки, зарегистрированная АЦП; б, в – результаты первичной обработки осциллограммы; г, д – результаты, полученные с использованием алгоритма при $m = 50$, $\Delta t = 10$ с

зарегистрированные АЦП (а), амплитудные значения импульсов, выделенные на значимых участках, и гистограмма их распределения (б, в) и результат обработки с использованием алгоритма (г, д).

Как видно из представленных рисунков, вычисленные характеристики более стабильны с течением времени испытаний, чем просто значения тока

утечки или значения всех амплитуд тока утечки. Полученные в результате расчета данные представляют собой одну из возможных оценок максимальных амплитуд тока утечки при увлажнении загрязненной изоляции.

Однако сравнение вычисленных средних значений максимальных амплитуд для различных уровней фактора «СЗ» дает понять, что наличие одного такого параметра не позволяет надежно определять удельную поверхностную проводимость слоя загрязнения, т.к. при различных интенсивностях увлажнения максимальные амплитуды могут изменяться в больших пределах (рис. 9).

При использовании только этого параметра невозможно определить, какое именно сочетание внешних факторов испытывает в данный момент поверхность изоляции: малая величина удельной проводимости слоя загрязнения при большой интенсивности увлажнения или же большая удельная проводимость слоя загрязнения при умеренной интенсивности увлажнения. И если в первом случае неверная оценка степени загрязнения ведет к ошибке первого рода («ложная тревога»), то во втором случае имеется опасность появления ошибки второго рода («пропуск дефекта»), что сразу снижает ценность проведения подобной диагностики. Поэтому для надежного разделения таких состояний необходимо определить дополнительный диагностический параметр.

С этой целью были рассмотрены несколько других параметров тока утечки, которые могут характеризовать не только степень загрязнения изоляции, но и интенсивность увлажнения, а значит – позволяют отделить друг от друга значения амплитуд токов утечки, соответствующие разным режимам увлажнения.

В процессе дальнейшего анализа было установлено, что интервалы времени между возникновением импульсов тока повышенной величины (т.е. превышающих некоторое граничное значение) достаточно хорошо описываются распределением Вейбулла. Результаты вычислений показали, что если в качестве такой границы взять среднее двухсекундное значение амплитуд тока утечки, то значения критерия согласия Холлендера – Прошана будут соответствовать 95 % вероятности принятия гипотезы о верности распределения.

Поэтому для оценки интенсивности появления импульсов тока повышенной величины был использован параметр λ_0 распределения Вейбулла – Гнеденко, вычисляемый по следующей формуле:

$$\lambda_0 = \tilde{a}^{-\tilde{b}}, \quad (3)$$

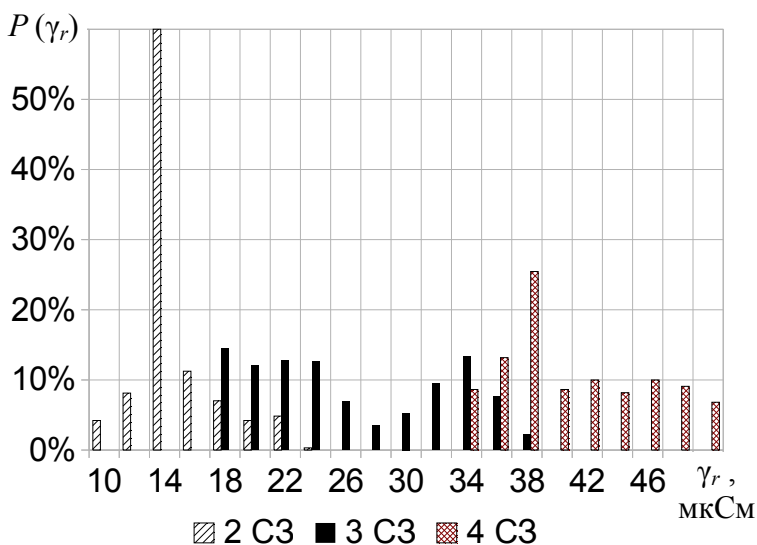


Рис. 9. Гистограммы повторяемости среднего значения 50 максимальных по модулю амплитуд тока утечки, наблюдаемых за 10 секунд, при различных степенях загрязнения

где $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ – оценки параметров распределения, вычисленные методом максимального правдоподобия.

Определение значений найденных параметров проводилось для 120-секундных интервалов диагностики. Усредненные значения параметров, вычисленные по токам утечки при максимальной удельной поверхностной проводимости 18 мкСм, представлены на рис. 10. Зависимость диагностируемой величины от выявленных параметров представлена в виде точек на рис. 11.

На рис. 11 также представлено графическое изображение регрессионной зависимости диагностируемой величины максимальной удельной поверхностной проводимости от диагностических параметров, которое в аналитическом виде имеет вид:

$$\gamma_r = 0,0071M^2 - 0,0632\lambda^2 - 0,0297M\lambda + 0,2633M + 3,0299\lambda + 4,9038, \quad (4)$$

где γ_r – максимальная удельная поверхностная проводимость, мкСм;

M – среднее значение первого диагностического параметра (усредненное значение $m = 50$ максимальных амплитудных значений тока утечки за $\Delta t_{амп} = 10$ с) за время $\Delta t_{диагн} = 120$ с, мА;

λ – второй диагностический параметр (параметр λ распределения Вейбулла для интервалов следования импульсов тока утечки, превышающих среднее двухсекундное значение амплитуды тока утечки, вычисленный за время $\Delta t_{диагн} = 120$ с).

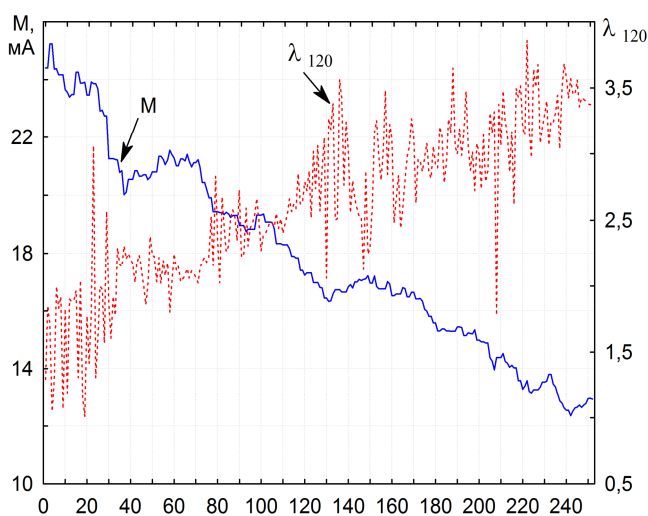


Рис. 10. Значения диагностических параметров, вычисленные по токам утечки при $\gamma_r = 18$ мкСм

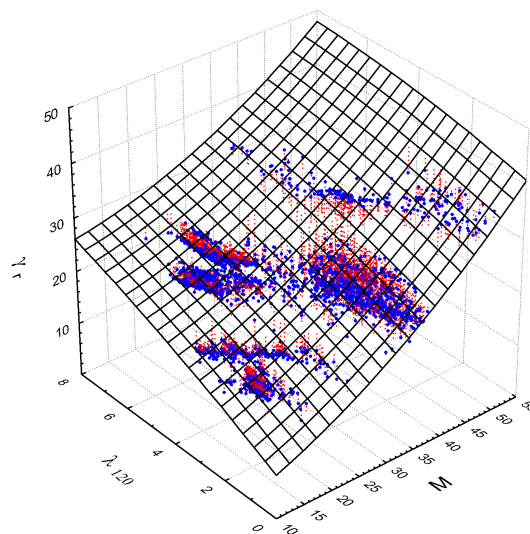


Рис. 11. Зависимость γ_r от диагностических параметров

Использование этой формулы позволяет по вычисленным характеристикам импульсного тока утечки определить максимальную удельную поверхностную проводимость, которая характеризует степень загрязнения изоляции и определяет электрическую прочность внешней изоляции в условиях загрязнения.

Кроме того, были получены другие регрессионные модели зависимости максимальной удельной поверхностной проводимости от других факторов и их совокупностей. Однако приведенная выше модель позволяет наиболее достоверно оценивать электрическую прочность внешней изоляции, что было уста-

новлено в результате сравнения адекватности и коэффициентов детерминации полученных моделей.

По результатам четвертой главы разработан алгоритм определения максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения на основе амплитудных значений тока утечки, представленный на рис. 12.

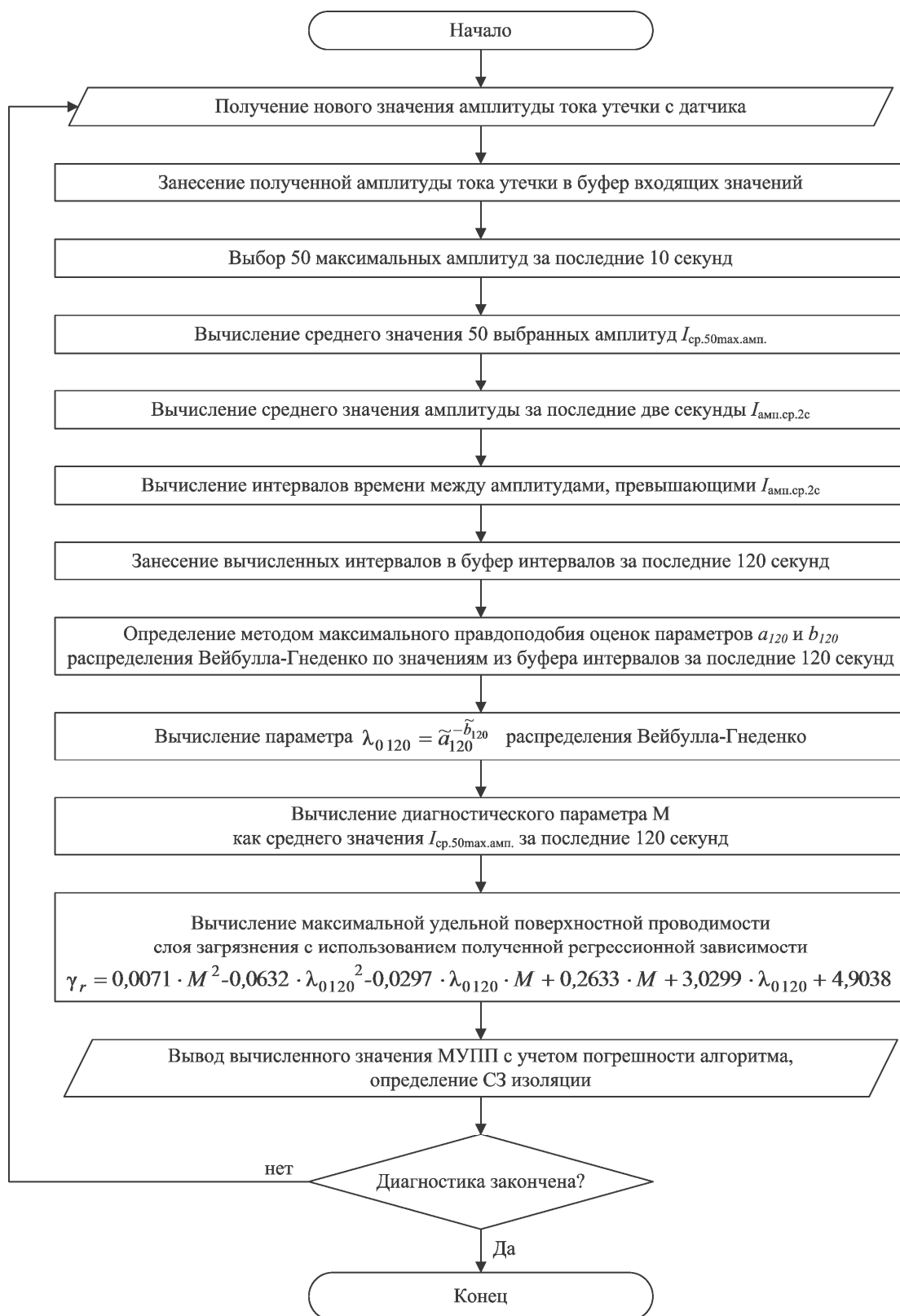


Рис. 12. Алгоритм определения максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения по амплитудным значениям импульсного тока утечки

Пятая глава посвящена разработке методики проверки фактической электрической прочности внешней изоляции контактной сети на соответствие условиям эксплуатации. В качестве критерия используется определенный в главе 1 коэффициент запаса электрической прочности. Для описания разработанной методики на рис. 13 приведена ее блок-схема.

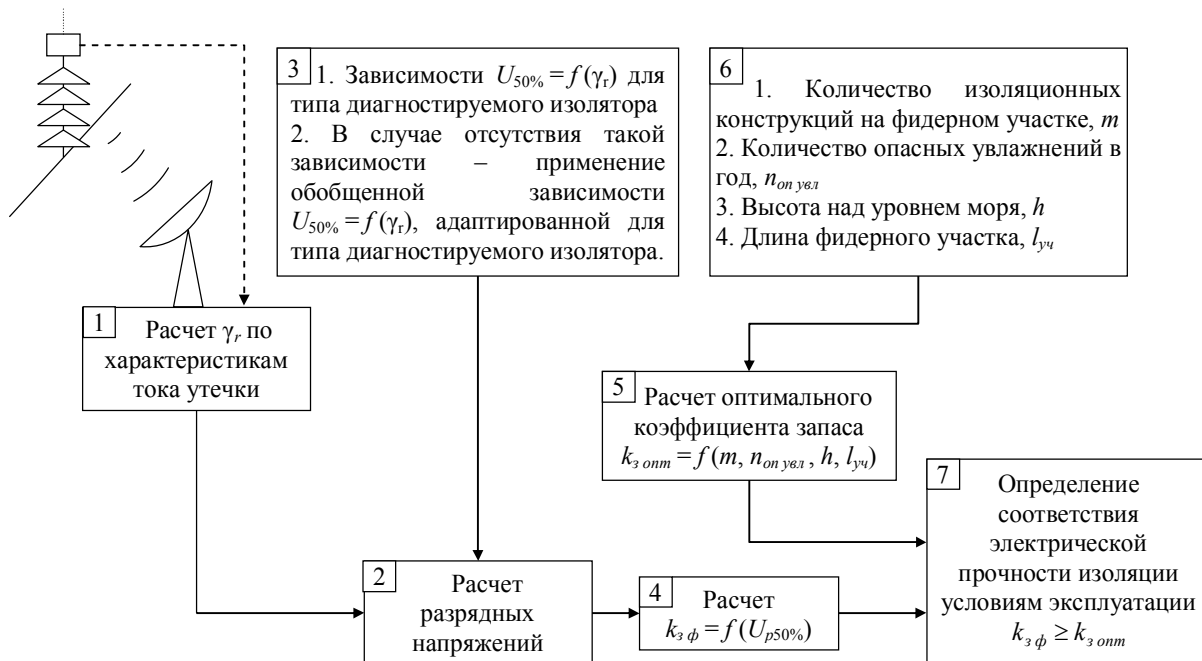


Рис. 13. Блок-схема методики проверки электрической прочности внешней изоляции контактной сети переменного тока на соответствие условиям эксплуатации

В блоке 1 выполняется расчет максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения по диагностическим параметрам тока утечки с использованием вышеупомянутого алгоритма по рис. 12.

В блоке 2 вычисляется 50 %-ое разрядное напряжение изоляционной конструкции $U_{50\%вр}$ по полученной величине γ_r и разрядным характеристикам, известным для диагностируемого изолятора и содержащимся в модуле исходных данных (блок 3). В настоящее время такие характеристики получены для наиболее широко распространенных типов подвесных тарельчатых изоляторов и представляют собой зависимость от максимальной проводимости слоя загрязнения либо разрядных градиентов, либо непосредственно разрядных напряжений.

В блоке 4 производится расчет фактического коэффициента запаса диагностируемой изоляционной конструкции по (1), где в качестве наибольшего рабочего напряжения в КС принимается значение 29 кВ.

В блоке 5 производится расчет оптимального коэффициента запаса для диагностируемого фидерного участка контактной сети исходя из длины фидерного участка $l_{уч}$, числа m изоляционных конструкций, работающих параллельно, годового числа опасных увлажнений $n_{оп.увл.}$ и высоты местности над уровнем моря h , от которой зависит атмосферное давление p . Для нахождения зависимости коэффициента запаса от всех этих параметров используется следующая формула:

$$k_{з\,онм} = \frac{1}{1 - F_n^{обp}\left(\frac{0,001 \cdot l_y}{n_{он\,увл} \cdot m}\right) \cdot C_r} \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)^{0,5}, \quad (5)$$

где $F_n^{обp}$ – обратная функция нормального распределения;

C_r – коэффициент вариации разрядных напряжений;

p_0 – атмосферное давление на уровне моря, кПа.

В блоке 7 производится сравнение фактического коэффициента запаса, рассчитанного в блоке 4 на основании параметров тока утечки, с оптимальным $k_{з\,онм}$, рассчитанным в блоке 5.

В случае если фактический коэффициент запаса электрической прочности меньше, чем оптимальный ($k_{з\,ф} < k_{з\,онм}$), делается вывод о необходимости проведения профилактических мероприятий по восстановлению электрической прочности поверхности изоляции путем обмыва, очистки, обработки гидрофобными покрытиями или любым другим способом.

При $k_{з\,ф} > k_{з\,онм}$ делается вывод о достаточной электрической прочности установленной изоляции, производится дальнейшее наблюдение за параметрами тока утечки.

На основании описанной блок-схемы разработана методика проверки электрической прочности внешней изоляции КС переменного тока на соответствие условиям эксплуатации.

Также в пятой главе приведены результаты оценки адекватности разработанной методики на основании высоковольтных испытаний гирлянд изоляторов ПС120-Б, загрязненных в естественных условиях эксплуатации контактной сети железных дорог. Измерения токов утечки при разных интенсивностях увлажнения производилось на описанной выше экспериментальной установке; определение 50 %-ных влагоразрядных напряжений производилось на базе испытательного трансформатора ИОМ 300/300 при увлажнении слоя загрязнения до насыщения методом «вверх-вниз».

Значения максимальной удельной поверхностной проводимости, вычисленные с использованием разработанного алгоритма (рис. 12) на основании параметров тока утечки, и значения 50 %-ного разрядного напряжения, определенные в соответствии с разработанной методикой (рис. 13), отличались от непосредственно измеренных значений этих величин для всех испытуемых гирлянд не более чем 37,5 % и 20 % соответственно. В случае применения усредненных значений вычисленных величин (за интервал не более 10 минут) относительные погрешности снижаются до 10 % для обеих величин.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана диагностическая модель изолятора в загрязненном и увлажненном состоянии, учитывающая влияние максимальной удельной поверхностной проводимости и водосодержания слоя загрязнения на величину тока утечки. На основе модели сделан вывод о необходимости проведения дополнительных экспериментальных исследований.

2. Разработанная лабораторная установка позволила моделировать увлажнение, близкие по характеристикам к природным туманам с интенсивностью увлажнения в интервале от 0,0016 до 0,007 мг·с⁻¹·см⁻². При таком увлажнении загрязненных изоляторов, находящихся под напряжением 27,5 кВ, на их поверхности наблюдались поверхностные частичные разряды. Режим интенсивного возникновения ПЧР был стабильным и наблюдался в течение продолжительного времени (до 1 часа).

3. В результате регистрации токов утечки через загрязненные изоляторы были получены данные о мгновенных значениях тока утечки при различных сочетаниях интенсивности увлажнения и максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения.

4. В результате проведенного анализа и статистической обработки полученных экспериментальных данных была построена регрессионная модель, позволяющая вычислять удельную поверхностную проводимость слоя загрязнения по комплексу параметров тока утечки. В данный комплекс входят такие параметры, как среднее значение амплитуды импульсов тока утечки, вычисленное по 50 наибольшим по модулю значениям амплитуды тока утечки за 10-секундный интервал измерения; параметр λ_0 распределения Вейбулла-Гнеденко для интервалов между импульсами тока утечки, превышающими среднее двухсекундное значение амплитуды тока утечки. Разработанный алгоритм определения максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения по комплексу диагностических параметров тока утечки позволяет при доверительной вероятности 0,95 обеспечить погрешность не более 13,2 %.

5. Разработана методика, которая позволяет определять соответствие фактической электрической прочности внешней изоляции КС условиям ее эксплуатации по критерию коэффициента запаса электрической прочности на основании алгоритма определения максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения.

6. В ходе проведения контрольных испытаний разработанной методики на изоляторах, загрязненных в естественных условиях контактной сети железных дорог, было установлено, что погрешность методики не превышает 37,5 % при измерении параметров тока утечки за интервал 120 с; при увеличении длительности диагностики до 10 минут максимальная погрешность определения максимальной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения снижается до 10 %.

Список работ, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертации

1. Комолов А. А. О возможности применения информации о токе утечки через поверхность загрязненной и увлажненной изоляции для целей диагностики ее электрической прочности / А. А. Комолов, В. М. Руцкий // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 2. – С. 60–65.

2. Комолов А. А. Проблемы эксплуатации высоковольтной изоляции в условиях загрязненной атмосферы / А. А. Комолов, С. В. Коркина, В. М. Руцкий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Тематический выпуск. – 2010. – № 1. – С. 482–484.

3. Комолов А. А. Расчет потерь электроэнергии в электрических сетях из-за токов утечки / А. А. Комолов, С. В. Коркина, В. М. Руцкий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Тематический выпуск. – 2010. – № 1. – С. 485–488.

Статьи в сборниках научных работ и материалах конференций, патенты

4. Комолов А. А. Метод экспресс-оценки электрической прочности высоковольтной изоляции наружных электроустановок, работающих в условиях загрязненной атмосферы / А. А. Комолов, В. М. Руцкий // Вестник СамГУПС. – 2009. – Вып. 1 – С. 75–81.

5. Комолов А. А. Электрическая прочность высоковольтных изоляторов для проектируемых линий эстакадного транспорта / А. А. Комолов, В. М. Руцкий // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса : межвуз. сб. науч. статей. – Самара : Самар.гос.техн.ун-т, 2009. – С. 131–133.

6. Комолов А. А. Исследование зависимости электрической прочности высоковольтных изоляторов от их геометрических параметров / А. А. Комолов, В. М. Руцкий // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Тольятти : ТГУ, 2009. – С. 258–262.

7. Комолов А. А. Возможность определения степени загрязнения подвесных тарельчатых изоляторов по характеристикам токов утечки в загрязненном и увлажненном состоянии / А. А. Комолов // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации ... электрического транспорта: сб. науч. статей с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – С. 151–160.

8. Комолов А. А. Проведение высоковольтного эксперимента по регистрации тока утечки через загрязненную и увлажненную поверхность внешней изоляции / А. А. Комолов // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура : материалы науч.-техн. конф. ... УрГУПС: в 2 т. / Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург, 2011. – Вып. 97(180), т. 1. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 312–317.

9. Комолов А. А. Экспресс-оценка электрической прочности высоковольтных изоляторов / А. А. Комолов // Сб. материалов XXXVI науч. конф. студентов и аспирантов. – Вып. 9. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – С. 55–56.

10. Комолов А. А. Отработка метода диагностики загрязненной поверхности внешней изоляции с использованием ЭОД «Филин-6» / А. А. Комолов // Сб. материалов XXXVII науч. конф. студентов и аспирантов. – Вып. 10. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – С. 37–38.

11. Пат. 107368 Рос. Федерация : МПК G 01 R 31/02. Система мониторинга состояния изоляции / Комолов А. А., Руцкий В. М. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Самарский государственный университет путей сообщения». – № 103768 ; заявл. 21.03.2011 ; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22. – 1 с. : 1 ил.