

На правах рукописи

КОСЯКОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ 6-10 кВ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2006

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования "Уральский государственный университет путей сообщения" (УрГУПС).

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор
Сухогузов Александр Петрович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Аржанников Борис Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент
Осотов Вадим Никифорович

Ведущая организация – Государственное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет путей сообщения" (МГУПС – МИИТ)

Защита состоится "19" _____ мая _____ 2006 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 при Государственном учреждении высшего профессионального образования "Уральский государственный университет путей сообщения Федерального агентства железнодорожного транспорта Российской Федерации" по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. 283. Факс: (343) 245-31-88.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного университета путей сообщения.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации (в двух экземплярах), просим направлять в адрес Ученого совета УрГУПС.

Автореферат разослан "19" _____ апреля _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

АСАДЧЕНКО В. Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Качественная диагностика состояния электрической изоляции устройств электроснабжения железных дорог является важнейшей эксплуатационной задачей. Как показывают статистические данные об отказах устройств электроснабжения Свердловской железной дороги, до 60% от общего количества отказов являются отказами изоляции, при этом диагностировать предпробойное состояние изоляции удается не более чем в 30% случаев. Следовательно, возникает необходимость в разработке более совершенных методик контроля состояния изоляции устройств электроснабжения железных дорог.

В условиях рыночных отношений чрезвычайно важно совершенствовать методы контроля состояния изоляции с учетом экономической эффективности инновации. Некоторые современные эффективные методы исследования изоляции не нашли практического применения из-за высокой стоимости. Таким образом, возникает актуальная проблема разработки методики контроля состояния изоляции устройств электроснабжения железных дорог, обладающей достаточной технической и экономической эффективностью.

Цели и задачи исследования. Целью данной диссертационной работы является совершенствование системы диагностики изоляции устройств электроснабжения железных дорог 6-10 кВ. Задачи исследования:

- анализ эксплуатационных факторов, влияющих на состояние изоляции;
- разработка модели ионизационного процесса в изоляции, позволяющей определить ее состояние в зависимости от эксплуатационных факторов;
- разработка методики контроля частичных разрядов в изоляции;
- проведение опытных исследований в лабораторных и эксплуатационных условиях для оценки технической эффективности предложенной методики контроля изоляции;
- разработка, изготовление и опытная проверка простых и надежных устройств контроля частичных разрядов;
- обоснование экономической эффективности внедрения разработанных устройств контроля частичных разрядов при различных методах их эксплуатации различными эксплуатирующими организациями.

Методика исследований. Теоретической и методологической основой выполненной работы послужили труды российских и зарубежных ученых в области исследования частичных разрядов в изоляции. Использовалась статистическая методика имитационного моделирования процесса частичной ионизации изоляции. Опытные исследования проводились в соответствии с ГОСТ РФ, для обработки результатов экспериментов применялись методы математической статистики. Оценка экономического эффекта от предлагаемой инновации проводилась методом приведенных затрат с учетом вероятностей проведения управляющих воздействий и аварийных ситуаций.

На защиту выносятся следующие основные положения диссертации:

- анализ влияния эксплуатационных факторов на состояние изоляции;
- математическое моделирование процесса частичной ионизации изоляции устройств электроснабжения железных дорог 6-10 кВ;
- разработка методики контроля изоляции и опытного образца устройства контроля частичных разрядов;
- исследование влияния эксплуатационных факторов на процесс частичной ионизации изоляции устройств электроснабжения железных дорог;
- расчет экономической эффективности использования предлагаемой методики контроля состояния изоляции.

Научная новизна. Выполнена оценка зависимости отказов устройств электроснабжения от воздействующих эксплуатационных факторов на примере Свердловской железной дороги. Составлена уточненная математическая модель процесса частичной ионизации изоляции. Разработана новая методика контроля состояния изоляции, заключающаяся в измерении только опасного порогового уровня амплитуды частичных разрядов в процессе эксплуатации устройств электроснабжения. Выполнены опытные исследования частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения железных дорог, подверженных влиянию различных эксплуатационных факторов, в результате которых определены значения параметров частичных разрядов, соответствующих предпробойному состоянию изоляции. Определена зависимость экономических показателей эффективности инновации при различных методах технического обслуживания (периодическом и постоянном контроле состояния изоляции) и различном количестве эксплуатируемого оборудования.

Практическая ценность. При практическом использовании предлагаемого устройства контроля частичных разрядов можно достичь значительного технического и экономического эффекта. Расчет процесса частичной ионизации изоляции с использованием предлагаемой математической модели позволяет снизить затраты на натурные эксперименты, прогнозировать условия пробоя конкретного устройства электроснабжения, оценивать состояние изоляции, составлять рекомендации к эксплуатации устройства электроснабжения при изменении эксплуатационных факторов, решать другие практические задачи. При сравнении результатов опытных исследований конкретного устройства электроснабжения с выявленными типичными параметрами частичных разрядов возникает возможность диагностирования подверженности изоляции разнообразным эксплуатационным факторам, вследствие чего можно сделать вывод о необходимости того или иного управляющего воздействия (например, сушки).

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований включены в учебный процесс кафедры "Теоретические основы электротехники" УрГУПС и отделения электроснабжения транспорта Уральского техникума железнодорожного транспорта. Разработанное

устройство контроля частичных разрядов прошло испытания на Свердловской железной дороге.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были доложены и получили одобрение на следующих конференциях и семинарах: III, IV, V и VI Международной научно-технической конференции "Актуальные вопросы современной науки" (СамГТУ, г. Самара, 2002 г., 2003 г., 2004 г. и 2005 г.), X и XI Международной научно-технической конференции "Современные техника и технологии" (ТПУ, г. Томск, 2004 г. и 2005 г.), VIII и IX Международной научно-технической конференции "Komputerowe systemy wspomagania nauki, przemysłu i transportu" (Politechnika Radomska, г. Закопане, Польша, 2004 г. и 2005 г.), Международной научно-технической конференции "Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы" (УГТУ, г. Екатеринбург, 2003 г.), III Международной научно-технической конференции "Современные научно-технические проблемы транспорта" (УлГТУ, г. Ульяновск, 2005 г.), XVII Международной научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика" (УРО РАН, г. Екатеринбург, 2005 г.), Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы автомобильного, железнодорожного, трубопроводного транспорта в Уральском регионе" (ПГТУ, г. Пермь, 2005 г.), IX, X и XI Всероссийской научно-технической конференции "Молодежь Сибири – науке России" (КГТУ, г. Красноярск, 2003 г., 2004 г. и 2005 г.), Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта" (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2003 г.), Региональной научно-практической конференции "Новейшие достижения науки и техники на железнодорожном транспорте" (ЮУЖД, г. Челябинск, 2004 г.), IV и V Межвузовской научно-технической конференции "Молодые ученые – транспорту" (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2003 г. и 2004 г.), Второй научно-технической конференции молодых специалистов электроэнергетики (РАО "ЕЭС России", г. Москва, 2003 г.), заседании кафедры "Теоретические основы электротехники" Уральского государственного университета путей сообщения (г. Екатеринбург, 2006 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 2 патента на изобретения и 25 статей, из них 2 – в зарубежных изданиях, 4 – в центральной печати.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 88 наименований и приложений. Основной текст содержит 132 страницы, 49 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено актуальности выбранной темы исследования, показано ее значение в народном хозяйстве, сформулированы основные цели и задачи, составившие предмет исследования.

Первая глава посвящена анализу современных методов испытания электрической изоляции устройств электроснабжения железных дорог и условий ее работы при влиянии различных эксплуатационных факторов (на примере Свердловской железной дороги).

Исследованиями в области совершенствования диагностики изоляции и, в частности, исследованием частичных разрядов занимались отечественные и зарубежные ученые Кучинский Г. С., Сви П. М., Голенко О. В., Джуварлы Ч. М., Абрамов В. Д., Хомяков М. В., Дурандин Г. Б., Дурандин М. Г., Сухогузов А. П., Бердников И. А., Кулаковский В. Б., Холодный С. Д., Кудратиллаев А. С., Авдеева А. А., Глебов И. А., Данилевич Я. Б., Казарновский Д. М., Тареев Б. М., Городецкий С. С., Лакерник Р. М., Архангельский К. С., Власов А. Н., Лысаковский Г. И., Вдовико В. П., Баженова Т. Ю., Зайцев К. А., Whitehead S., Schwab A. J., Vajda G., Sollergren B., Pratt F. C., Rushton F., Moore H. R., Shigeo F., Susumu M., Noriyasu G., Katsuo M., Toru Y., Masanori O., Leslie B. A., Brian G., Masaharu K., Koske B. и другие исследователи.

Особенностью изоляции устройств электроснабжения железных дорог является многообразие видов изоляционных покрытий, а также условий их работы. В большинстве случаев известные и широко применяемые методы испытаний изоляции используются для определения состояния разнообразной изоляции без учета ее условий работы.

Еще одной характерной особенностью всех испытаний, проводимых для устройств электроснабжения, является их периодичность, задаваемая разнообразными нормативами, согласно которым испытание изоляции следует производить периодически, через определенное время, в течение которого, как принято считать, изоляция может изменить свои характеристики и ее состояние ухудшится. Главным недостатком такого подхода является отсутствие постоянного контроля состояния изоляции, который бы позволил оценивать состояние изоляции в режиме реального времени. Периодичность испытаний способствует развитию дефектов изоляции, не выявляемых в процессе эксплуатации, что, в свою очередь, увеличивает вероятность отказов, аварий, отключений и усложняет и удорожает ремонт вышедшего из строя устройства.

Кроме того, современные методы контроля состояния изоляции являются весьма недостоверными, что подтверждается статистикой отказов (рис. 1). Поскольку отказ типа "отключение по невыясненной причине", как правило, является перемежающимся отказом изоляции, общее количество отказов изоляции составляет 60%. При этом не более 30% отказов диагностируется предварительно. Таким образом, проблема совершенствования диагностики изоляции является насущной, а современные методы диагностики следует считать недостаточно достоверными.

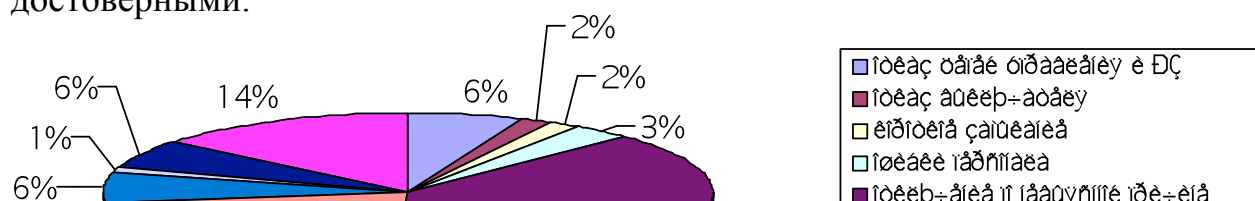


Рис. 1. Распределение видов отказов устройств электроснабжения

Как показали исследования, на территории Свердловской железной дороги встречаются участки с большим перепадом температур, повышенной влажностью и наличием загрязнений в воздухе (например, территория ЭЧ-4). По данным статистики, на таких участках происходит максимальное количество отказов изоляции устройств электроснабжения, однако, система диагностики изоляции едина по всей сети железных дорог России и эти особенности не учитывает.

Таким образом, возникает проблема разработки эффективных устройств контроля состояния изоляции как в процессе плановых периодических испытаний, так и при постоянном контроле (мониторинге) состояния изоляции. Данная проблема может быть решена с помощью перспективной методики контроля состояния изоляции – контроля частичных разрядов, чему и посвящена данная диссертационная работа.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процесса частичной ионизации изоляции устройств электроснабжения железных дорог. Разработана плоскостная математическая модель частичной ионизации изоляции, включающей дефекты, распределенные по ее сечению.

Для решения данной задачи была применена вероятностная (стохастическая) математическая модель, решаемая с использованием имитационного моделирования распределения дефектов в рассматриваемом сечении изоляции. В процессе имитационного моделирования частичной ионизации изоляции можно решать множество задач, важнейшей из которых является определение зависимости максимального кажущегося заряда частичных разрядов от испытательного напряжения, т.е. в данной главе описана модель испытания изоляции устройства электроснабжения повышенным напряжением промышленной частоты, дополненная исследованием частичных разрядов.

Сущность имитационного моделирования частичных разрядов состоит в получении вероятностного набора реализаций случайных функций $q(U)$ для конкретного устройства электроснабжения, т.е. получение набора статистических данных, исходя из которых можно вычислить математическое ожидание формы кривой $q(U)$, среднеквадратичное отклонение вышеупомянутой формы кривой $q(U)$ и другие характеристики частичных разрядов, например, напряжение зажигания частичных разрядов.

Исходными данными для решения поставленной задачи являются геометрические размеры исследуемого объекта, тип применяемой изоляции, состояние изоляции, определяемое количеством, формой и местом

расположения дефектов, зависимости напряжения пробоя от длины межэлектродного промежутка основного изолирующего материала и размера включения.

В процессе натурального эксперимента разрушение (полный пробой) изоляции нежелательно, ввиду относительно высокой стоимости устройства электроснабжения, поэтому стандарты ограничивают уровень испытательного напряжения. В процессе имитационного моделирования на ЭВМ подобных ограничений не существует, поэтому можно подробно рассматривать процесс ионизации изоляции вплоть до пробоя.

Таким образом, оценка формы кривой $q(U)$ для любого устройства электроснабжения будет проводиться по следующему алгоритму:

- 1) выбор расчётной плоскости сечения изоляционной конструкции;
- 2) расстановка включений (дефектов) в выбранной плоскости сечения изоляции;
- 3) расчёт мгновенных схем при различных уровнях приложенного напряжения, т.е. получение одной реализации $q(U)$;
- 4) повтор подпунктов 2-4, т.е. получение множества реализаций $q(U)$;
- 5) оценка статистических характеристик реализаций $q(U)$ – математического ожидания, дисперсии, среднеквадратичного отклонения и пр.

Рассмотрим модель частичной ионизации устройства электроснабжения на примере – условной развертке сечения высоковольтного кабеля радиусом r , минимальным расстоянием от поверхности токоведущей жилы до поверхности оболочки кабеля a . Рассмотрим сечение кабеля толщиной h .

Для расстановки дефектов в изоляции нам необходимо определить количество включений в выбранном сечении изоляции, размер включений и их расположение (координаты центра каждого включения). Эти исходные данные мы можем получить, зная законы распределения указанных параметров и разыгрывая конкретный параметр с использованием случайных чисел по методу Монте-Карло. Ряд равномерно распределенных случайных чисел удобно получить, используя рекуррентную формулу

$$X_{i+1} = aX_i + C \pmod{m}, \quad (1)$$

где a , m и C – неотрицательные целые числа.

Варьируя величины a , m , C и X_0 , можно получить необходимое количество некоррелирующих генераторов случайных чисел (для рассматриваемого примера – четыре).

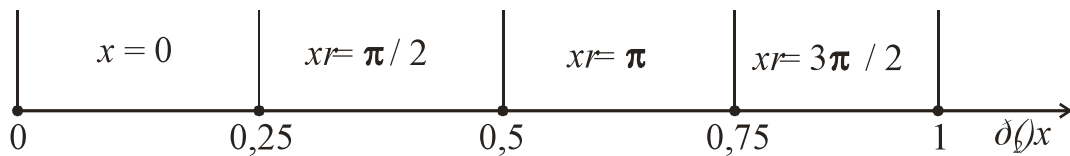
Для умеренно изношенной изоляции высоковольтного кабеля характерно экспоненциальное распределение количества дефектов $p_i(n)$, параметры которого зависят от эксплуатационных условий, соответствующая ось для розыгрыша случайной величины n приведена на рис. 2, при этом последняя построена таким образом, чтобы: $0 \leq p_i(0;1) \leq p_i(1)$; $p_i(1) \leq p_i(1;2) \leq p_i(1) + p_i(2)$; $p_i(1) + p_i(2) \leq p_i(2;3) \leq p_i(1) + p_i(2) + p_i(3)$ и т.д.



Рис. 2. Ось для розыгрыша случайной величины n

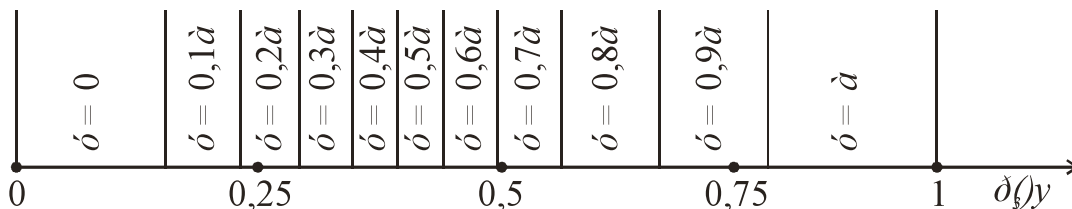
Используя первый генератор равномерно распределенной величины, получим случайное число. Пусть для данного примера для данной реализации $p_1(n) = 0,5$, тогда $n = 3$, т.е. в рассматриваемом сечении изоляции кабеля будет три включения.

Разыгранное количество включений необходимо распределить по сечению изоляции, т.е. определить их координаты. По оси координат Ox , расположенной перпендикулярно линиям электрического поля, вероятность возникновения дефекта в той или иной области $p_2(x)$ будет распределена равномерно. Соответствующая ось для розыгрыша случайной величины x приведена на рис. 3, при этом последняя построена упрощенном виде аналогично оси для розыгрыша случайной величины n .

Рис. 3. Ось для розыгрыша случайной величины x

Используя второй генератор случайной величины, получим три случайных числа, при этом количество случайных чисел x должно быть равно случайному числу $n = 3$. Пусть для данного примера для данной реализации $p_2(x_1) = 0,8$; $p_2(x_2) = 0,4$ и $p_2(x_3) = 0,3$. Тогда $x_1 = 3\pi r / 2$, а $x_2 = x_3 = \pi r / 2$.

По оси Oy , расположенной параллельно линиям электрического поля, вероятность возникновения дефекта в той или иной области $p_3(y)$ будет распределена согласно бета-распределению, поскольку вероятность возникновения дефектов в областях изоляции, прилежащих к электродам (жиле кабеля и заземленной оболочке кабеля), больше вероятности возникновения дефектов во внутренних слоях изоляции, соответствующая упрощенная ось для розыгрыша случайной величины y приведена на рис. 4. Параметры бета-распределения зависят также от эксплуатационных факторов.

Рис. 4. Ось для розыгрыша случайной величины y

Используя третий генератор случайной величины, получим 3 случайных числа, при этом количество случайных чисел y должно быть равно случайному числу $n = 3$. Пусть для данного примера для данной реализации $p_3(y_1) = 0,9$; $p_3(y_2) = 0,5$ и $p_3(y_3) = 0,2$. Тогда $y_1 = a$, $y_2 = 0,7a$ и $y_3 = 0,1a$.

Допустим, что для рассматриваемого примера в изоляции кабеля сечения включений имеют квадратную форму, тогда необходимо разыграть еще одну случайную величину d – сторону квадрата сечения включения. Практически для всех типов изоляции вероятность возникновения дефекта определенного размера $p_4(d)$ будет распределена согласно нормальному распределению, параметры которого также зависят от эксплуатационных условий, соответствующая ось для розыгрыша случайной величины y приведена в упрощенном виде на рис. 5, при этом последняя построена аналогично осям для розыгрыша случайных величин n , x и y .

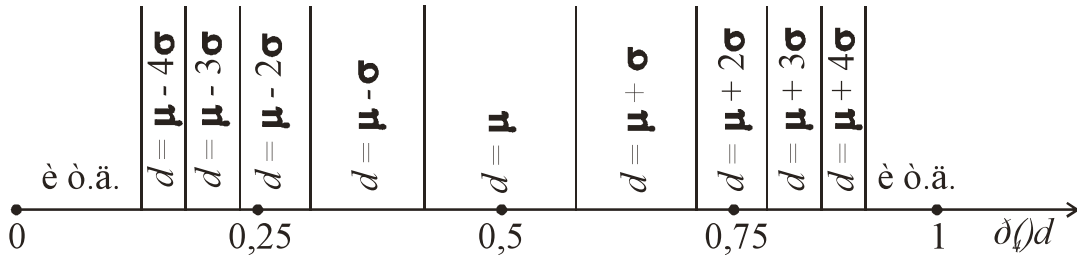


Рис. 5. Ось для розыгрыша случайной величины d

Используя четвертый генератор случайной величины, получим 3 случайных числа, при этом количество случайных чисел d должно быть равно случайному числу $n = 3$. Пусть для данного примера для данной реализации $p_4(d_1) = 0,3$; $p_4(d_2) = 0,5$ и $p_4(d_3) = 0,55$. Тогда $d_1 = \mu - \sigma$, а $d_2 = d_3 = \mu$.

На основе полученных случайных величин n , x , y и d составим расчетную схему сечения изоляционной конструкции (рис. 6), условно разделим ее на однородные области и присвоим каждой области соответствующий номер, что необходимо для расчета их емкостей.

При подаче на кабель испытательного напряжения $U^{(1)}$, не превышающего напряжения зажигания частичных разрядов, расчетную схему (рис. 6) можно представить в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 7).

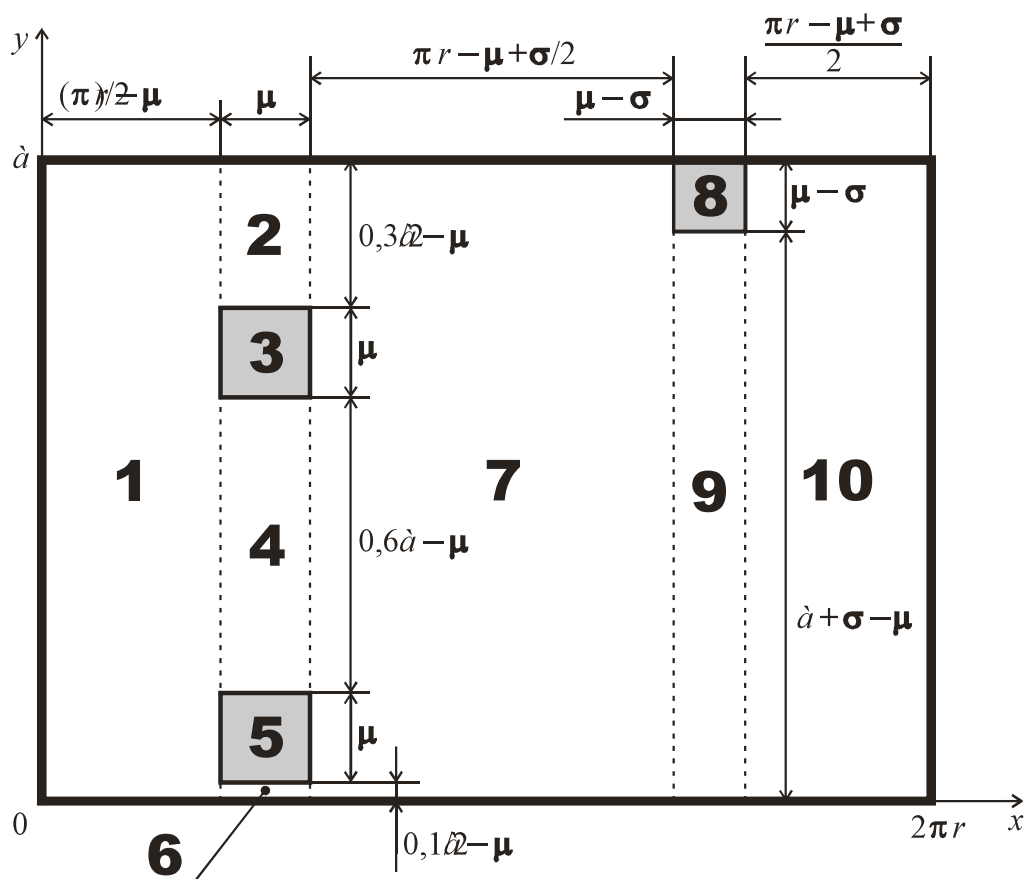


Рис. 6. Расчетная схема для рассматриваемой реализации

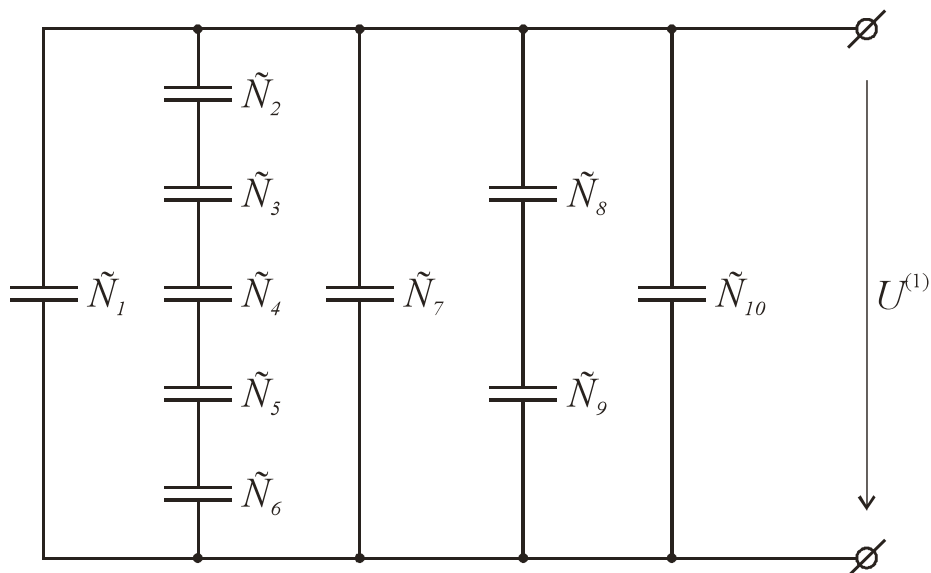


Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема замещения

Рассчитаем емкости, изображенные на рис. 7

$$\tilde{N}_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a h (\sqrt{r} \square \sqrt{a})}{2a}; \quad \tilde{N}_2 = \frac{2 \epsilon_0 \epsilon_a h \sqrt{a}}{0,6a \square \sqrt{a}}; \quad \tilde{N}_3 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a h \sqrt{a}}{\sqrt{a}} = \epsilon_0 \epsilon_a h;$$

$$\begin{aligned}\tilde{N}_4 &= \frac{0 \cdot \dot{a} h \sqrt{}}{0,6a \square \sqrt{}}; \tilde{N}_5 = \frac{0 \cdot \dot{a} h \sqrt{}}{\sqrt{}} = 0 \cdot \dot{a} h; \tilde{N}_6 = \frac{2 \cdot 0 \cdot \dot{a} h \sqrt{}}{0,2a \square \sqrt{}}; \\ \tilde{N}_7 &= \frac{0 \cdot \dot{a} h (2\sqrt{r} \square 2\sqrt{+})}{2a}; \tilde{N}_8 = \frac{0 \cdot \dot{a} h (\sqrt{\square})}{\sqrt{\square}} = 0 \cdot \dot{a} h; \\ \tilde{N}_9 &= \frac{0 \cdot \dot{a} h (\sqrt{\square})}{a + \square \sqrt{}}; \tilde{N}_{10} = \frac{0 \cdot \dot{a} h (\sqrt{r} \square \sqrt{+})}{2a}.\end{aligned}$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\varepsilon_{\bar{0}}$ и ε_e – диэлектрическая проницаемость среды (кабельной бумаги и воздуха).

Далее рассчитываем напряжения и напряженности на каждой емкости, и сравниваем их пробивными напряженностями электрического поля

$$U_1^{(1)} = U_7^{(1)} = U_{10}^{(1)} = U^{(1)};$$

$$U_2^{(1)} = \frac{U^{(1)} C_3 C_4 C_5 C_6}{C_3 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_5};$$

$$U_3^{(1)} = \frac{U^{(1)} C_2 C_4 C_5 C_6}{C_3 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_5};$$

$$U_4^{(1)} = \frac{U^{(1)} C_2 C_3 C_5 C_6}{C_3 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_5};$$

$$U_5^{(1)} = \frac{U^{(1)} C_2 C_3 C_4 C_6}{C_3 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_5};$$

$$U_6^{(1)} = \frac{U^{(1)} C_2 C_3 C_4 C_5}{C_3 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_5};$$

$$U_8^{(1)} = \frac{U^{(1)} \frac{1}{C_8}}{\frac{1}{C_8} + \frac{1}{C_9}} = \frac{U^{(1)} C_9}{C_8 + C_9}; \quad U_9^{(1)} = \frac{U^{(1)} \frac{1}{C_9}}{\frac{1}{C_8} + \frac{1}{C_9}} = \frac{U^{(1)} C_8}{C_8 + C_9};$$

$$E_1^{(1)} = \frac{U_1^{(1)}}{a} < E_1^{\text{пр}}; \quad E_2^{(1)} = \frac{U_2^{(1)}}{0,3a \square \sqrt{2}} < E_2^{\text{пр}}; \quad E_3^{(1)} = \frac{U_3^{(1)}}{\sqrt{}} < E_3^{\text{пр}};$$

$$E_4^{(1)} = \frac{U_4^{(1)}}{0,6a \square \sqrt{}} < E_4^{\text{пр}}; \quad E_5^{(1)} = \frac{U_5^{(1)}}{\sqrt{}} < E_5^{\text{пр}}; \quad E_6^{(1)} = \frac{U_6^{(1)}}{0,1a \square \sqrt{2}} < E_6^{\text{пр}};$$

$$E_7^{(1)} = \frac{U_7^{(1)}}{a} < E_7^{\ddot{\delta}} ; E_8^{(1)} = \frac{U_8^{(1)}}{\sqrt{\square}} < E_8^{\ddot{\delta}} ;$$

$$E_9^{(1)} = \frac{U_9^{(1)}}{\dot{a} \square \sqrt{+}} < E_9^{\ddot{\delta}} ; E_{10}^{(1)} = \frac{U_{10}^{(1)}}{a} < E_{10}^{\ddot{\delta}} .$$

Рассчитаем заряды параллельно соединенных элементов и групп последовательно соединенных элементов (рис. 7)

$$q_1^{(1)} = U^{(1)} C_1 ; q_7^{(1)} = U^{(1)} C_7 ; q_{10}^{(1)} = U^{(1)} C_{10} ;$$

$$\begin{aligned} q_2^{(1)} = q_3^{(1)} = q_4^{(1)} = q_5^{(1)} = q_6^{(1)} &= \frac{U^{(1)}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} + \frac{1}{C_6}} = \\ &= \frac{U^{(1)} C_2 C_3 C_4 C_5 C_6}{C_3 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_4 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_5 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_6 + C_2 C_3 C_4 C_5} ; \\ q_8^{(1)} = q_9^{(1)} &= \frac{U^{(1)}}{\frac{1}{C_8} + \frac{1}{C_9}} = \frac{U^{(1)} \tilde{N}_8 \tilde{N}_9}{\tilde{N}_9 + \tilde{N}_8} . \end{aligned}$$

Рассчитаем полный заряд в выбранном сечении изоляции

$$q^{(1)} = q_1^{(1)} + q_2^{(1)} + q_7^{(1)} + q_8^{(1)} + q_{10}^{(1)} .$$

Поскольку при приложенном напряжении $U^{(1)}$ полной или частичной ионизации изоляции не наблюдается, заряд частичных разрядов $q_{\times D}^{(1)} = 0$.

Пусть при некотором напряжении $U^{(2)} > U^{(1)}$ по результатам расчетов выяснится, например, что $E_8^{(2)} > E_8^{\ddot{\delta}}$ и происходит пробой (частичный разряд) емкости включения C_8 . При этом в схеме замещения (рис. 7) емкость включения C_8 оказывается зашунтированной.

При приложении напряжения $U^{(2)}$ пропорционально ему изменятся напряжения, напряженности и заряды на элементах $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ и C_{10} . Напряжения, напряженность и заряд на элементе C_8 будут равны нулю, а напряжение, напряженность и заряд на элементе C_9 будут выражены следующим образом

$$U_9^{(2)} = U^{(2)} ; E_9^{(2)} = \frac{U_9^{(2)}}{\dot{a} \square \sqrt{+}} < E_9^{\ddot{\delta}} ; q_9^{(2)} = U^{(2)} C_9 .$$

Полный заряд при приложенном напряжении $U^{(2)}$ также изменится

$$q^{(2)} = q_1^{(2)} + q_2^{(2)} + q_7^{(2)} + q_9^{(2)} + q_{10}^{(2)} .$$

Таким образом, заряд частичных разрядов при приложенном напряжении $U^{(2)}$ можно выразить следующим образом

$$q_{\times D}^{(2)} = q^{(1)} \square q^{(2)}.$$

Далее расчеты проводятся аналогично, т.е. для каждого последующего уровня прикладываемого напряжения, большего чем предыдущий, проводят следующие расчеты:

- 1) рассчитывают напряжения на каждом элементе электрической схемы замещения;
- 2) рассчитывают напряженности электрического поля в каждом элементе и сравнивают их с пробивными напряженностями;
- 3) в случае превышения напряженностью электрического поля в каком-либо элементе схемы замещения составляют новую электрическую схему замещения, из которой пробитый элемент исключают (закорачивают);
- 4) повторяют решения по пунктам 1-3;
- 5) рассчитывают полный заряд и заряд частичных разрядов.

Получив множество полученных реализаций кривых $q_{\text{ЧР}}(U)$, рассчитываем математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение параметров кривой $q_{\text{ЧР}}(U)$, зная которые, можно определить напряжение зажигания частичных разрядов, предпробойные значения заряда частичных разрядов и испытательного напряжения.

Третья глава посвящена разработке схем контроля частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения железных дорог.

Разработанное устройство контроля частичных разрядов (опытный образец) изображено на рис. 8 и предназначено для использования как при высоковольтных периодических испытаниях, так и при номинальном напряжении электроустановки 6-10 кВ в режиме мониторинга состояния изоляции.



Рис. 8. Внешний вид устройства контроля частичных разрядов

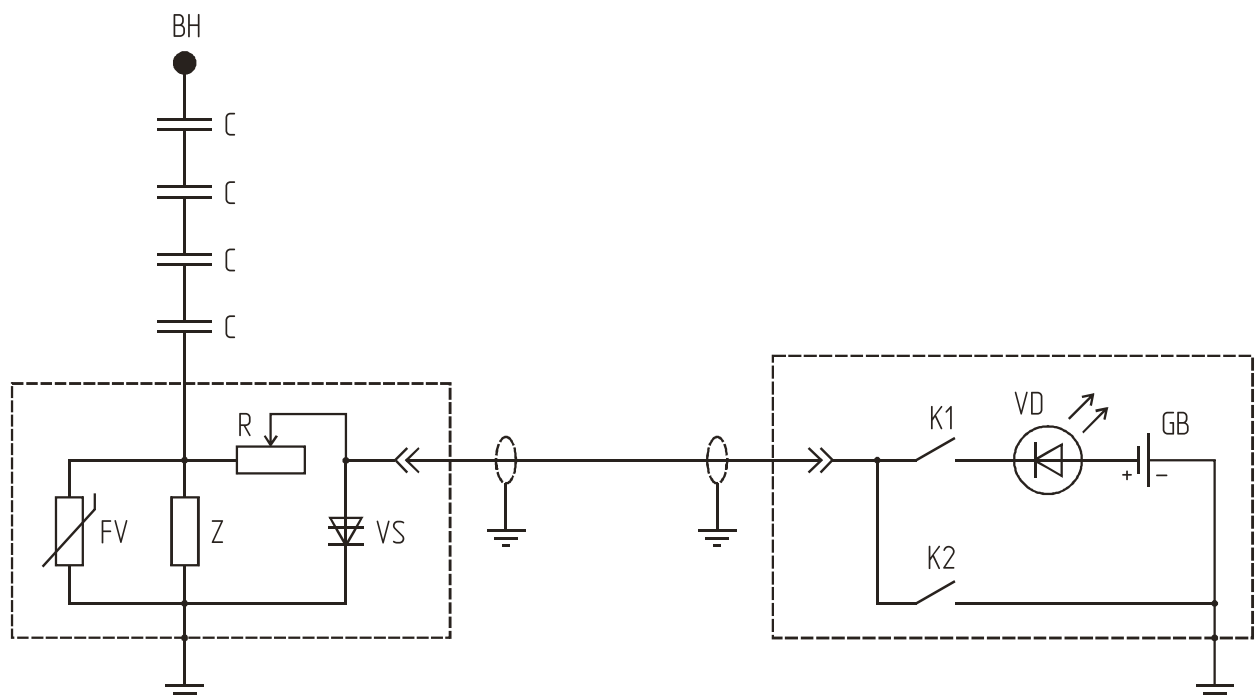


Рис. 9. Принципиальная схема устройства контроля частичных разрядов

Электрическая принципиальная схема устройства контроля частичных разрядов изображена на рис. 9. Данное устройство состоит из четырех

последовательно соединенных конденсаторов C , датчика частичных разрядов Z , ограничителя перенапряжений FV , динистора VS , резистора переменного R , клеммы для подключения заземления, светодиода VD , элемента GB , переключателя $K1$, кнопки $K2$ и коаксиального кабеля с заземленной оболочкой, соединяющего высоковольтный блок и пульт управления.

Металлические корпуса пульта управления и высоковольтного блока подключаются к заземлению исследуемой электроустановки (к заземлению распределительного устройства тяговой подстанции или к заземлению высоковольтной испытательной установки), экранируют измерительную схему во избежание влияния внешних помех и обеспечивают безопасность эксплуатации устройства для обслуживающего персонала.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. При правильно собранной схеме испытаний и включенном переключателе $K1$ светодиод VD тускло светится, так как напряжение элемента GB оказывается приложенным к последовательно соединенной цепочке элементов VD - $K1$ -кабель- R - Z -заземление, которая имеет сравнительно высокое сопротивление.

При подаче высокого напряжения промышленной частоты 50 Гц на шины высокого напряжения на датчике частичных разрядов Z появляется напряжение в масштабе, определяемом соотношением активных и реактивных сопротивлений элементов C , Z , R , VS и FV . Подстройкой сопротивления переменного резистора R можно регулировать напряжение на датчике частичных разрядов Z (чувствительность устройства контроля частичных разрядов).

При появлении в изоляции устройства электроснабжения опасного уровня максимального кажущегося заряда частичных разрядов на датчике возникает импульсное напряжение соответствующей амплитуды, при котором сопротивление динистора VS становится примерно равным нулю. В этом случае постоянный ток течет по цепи GB - VD - $K1$ -кабель- VS -заземление, обладающей низким сопротивлением, и светодиод VD загорается ярко.

При снятии высокого напряжения светодиод VD будет гореть также ярко, показывая, что в изоляции возникал опасный уровень частичных разрядов. Данное явление объясняется протеканием постоянного тока по динистору VS , который поддерживает его в открытом состоянии. Для его закрытия и приведения устройства контроля частичных разрядов в исходное состояние необходимо нажать на кнопку $K2$, которая шунтирует динистор VS , восстановив его исходное сопротивление.

В случае возникновения перенапряжения на шинах высокого напряжения или перекрытия (пробоя) конденсаторов C на датчике частичных разрядов Z может появиться высокое напряжение. Для предотвращения такой аварийной ситуации параллельно датчику частичных разрядов Z подключен ограничитель перенапряжений FV . При возникновении на ограничителе перенапряжений FV напряжения 100 В его сопротивление резко падает и волна перенапряжения срезается.

Таким образом, данное устройство является полуавтоматическим: контроль частичных разрядов осуществляется автоматически, но для

приведения устройства контроля частичных разрядов в исходное состояние необходимо присутствие оператора. В принципе, при минимальной переделке схемы возможно подключение данного устройства к цепям телесигнализации и телеуправления тяговой подстанции.

Четвертая глава посвящена исследованию эксплуатационных воздействий на характеристики частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения железных дорог. Опытные исследования проводились в лабораториях УрГУПС и Дорожной электротехнической лаборатории Свердловской железной дороги.

Объектами испытаний были силовые трансформаторы ТМ-180/6, ТМ-63/6, ТМ-63/10, трансформаторы напряжения ОМ-0,4/6, ОМ-1,25/6, ОЛ-1,25/6, ОЛ-1,25/10, ОМ-1,25/10, ОМ-0,64/10, ОМП-4/6, опорные изоляторы с номинальным напряжением 6 кВ и ошиновка распреустройства 6 кВ. Испытания изоляции проводились при различных воздействующих эксплуатационных факторов – при изменении относительной влажности воздуха, при наличии или отсутствии поверхностного увлажнения и загрязнения полупроводящей пылью, а также при комбинации этих факторов. Для реализации поставленных задач была построена специальная климатическая установка.

В процессе испытаний оценивались кулон-вольтовые характеристики частичных разрядов, напряжение зажигания и погасания частичных разрядов. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 21023-75, при этом схема испытаний дополнительно включала разработанное устройство контроля частичных разрядов.

В ходе испытаний была выявлена высокая техническая эффективность предлагаемого устройства контроля частичных разрядов, выявлена высокая чувствительность характеристик частичных разрядов к воздействующим эксплуатационным факторам, определен единый для изоляции устройств электроснабжения железных дорог пороговый уровень амплитуды заряда частичных разрядов (100 нКл), при регистрации которого наблюдается предпробойное состояние изоляции.

Типичные кулон-вольтовые характеристики частичных разрядов в различных устройствах электроснабжения приведены на рис. 10. По этим характеристикам можно судить о том, что данный трансформатор ТМ-180/6 не пригоден к эксплуатации, поскольку уровень частичных разрядов превысил значение 100 нКл, а изоляция трансформатора ОЛ-1,25/10 находится в хорошем состоянии, поскольку уровень частичных разрядов в ней низок.

При изменении воздействующих эксплуатационных факторов по характеристикам частичных разрядов можно определить наиболее благоприятные условия для эксплуатации электрооборудования. Например, как следует из рис. 11, наиболее благоприятным условием для эксплуатации трансформатора ОМ-0,4/6 является относительная влажность воздуха $\varphi = 70\%$.

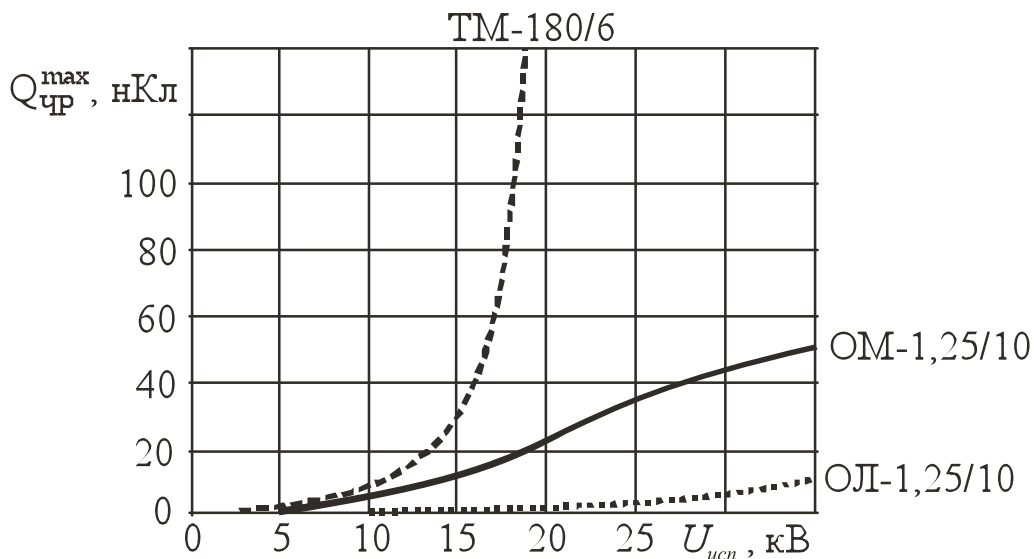


Рис. 10. Типичные характеристики частичных разрядов

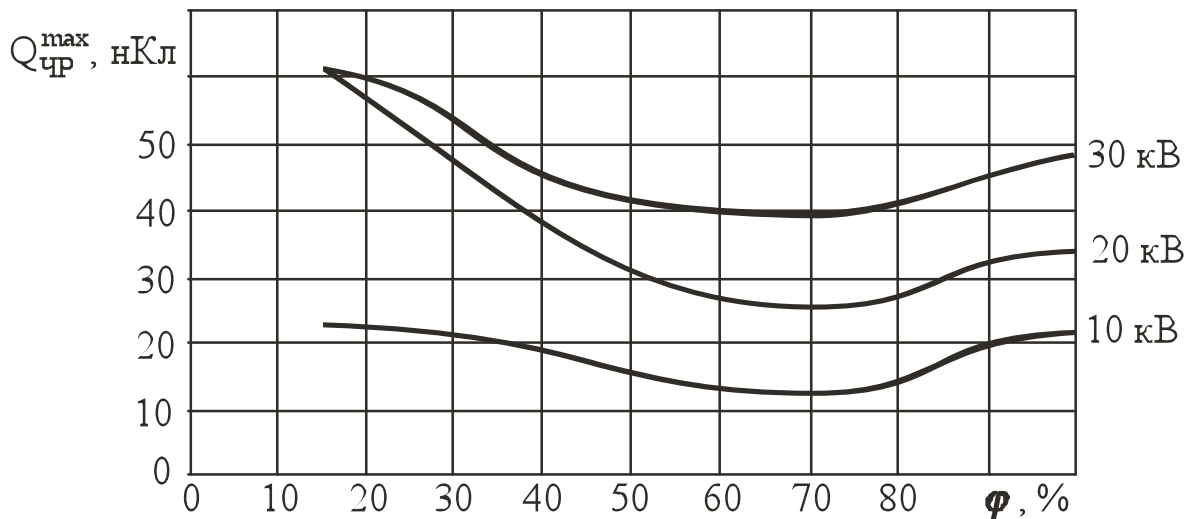


Рис. 11. Характеристики частичных разрядов в изоляции OM-0,4/6

Пятая глава посвящена расчету экономической эффективности от использования устройства контроля частичных разрядов. Расчет проведен методом приведенных затрат на примере комплектной трансформаторной подстанции (КТП) и распределительного устройства (РУ) тяговой подстанции (номинальное напряжение 6-10 кВ) при различных методах контроля состояния изоляции – периодическом и постоянном (мониторинге) и различном количестве эксплуатируемых устройств электроснабжения.

В результате расчетов было определено, что примерная стоимость устройства контроля частичных разрядов составляет 1293 руб.

Годовые эксплуатационные расходы рассчитывались по формуле

$$\dot{Y} = \frac{1}{p_1} \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\dot{O}_{iañ}} \dot{I}_1 + \frac{\delta_2}{p_1} \frac{\sum_{k=1}^m a_k \delta_k H_k}{\dot{O}_{iañ}} \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\dot{O}_{iañ}}, \quad (2)$$

где H_I – норма времени на испытание изоляции оборудования, мин.;

n – количество исполнителей;

Z_i – среднемесячная заработная плата i -ого исполнителя, руб.;
 p_1 – коэффициент, учитывающий эффективность профилактических испытаний (доля невыявленных дефектов изоляции);
 p_2 – вероятность пробоя изоляции всего РУ или КТП;
 p_k – вероятность пробоя k -ого типа устройства, подключенного к РУ;
 H_k – норма времени на ремонт k -ого типа устройства, мин.;
 m – количество типов устройств, подключенных к РУ;
 a_k – количество устройств k -ого типа.

Тогда экономия годовых эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}$ будет являться разностью годовых эксплуатационных расходов при традиционном методе эксплуатации и при внедрении устройства контроля частичных разрядов.

Также были рассчитаны такие экономические показатели, как срок окупаемости, чистый доход и чистый дисконтированный доход

$$t_o = \frac{n K}{m \dot{Y}}, \quad (3)$$

$$\times \ddot{A} = \sum_{t=0}^7 (m \dot{Y} - n K_t), \quad (4)$$

$$\times \ddot{A} \ddot{A} = \sum_{t=0}^7 \frac{m \dot{Y} - n K_t}{(1 + \dot{A} + Z)^t}, \quad (5)$$

где n – количество применяемых устройств контроля частичных разрядов;

m – количество обслуживаемых электроустановок;

K – суммарные капитальные затраты в течение 8 лет (нормативного срока окупаемости) на одно устройство контроля частичных разрядов, руб.;

K_t – капитальные затраты в t -ом году, руб.;

E – действующая ставка рефинансирования Центробанка РФ;

Z – рисковая поправка.

Расчеты по формулам (2-5) сведем в таблицу 1.

Таблица 1

Расчет экономических показателей при периодическом контроле

Кол-во обслуж. устройств		1	10	100	1000
КТП	$\Delta \mathcal{E}$, руб.	314	3144	31437	314370
	t_o , лет	4,34	0,43	0,04	0,004
	ЧД, руб.	1150	23785	250131	2513595
	ЧДД, руб.	250	14506	157063	1582640
РУ-6,10 кВ	$\Delta \mathcal{E}$, руб.	343	3430	34295	342950
	t_o , лет	3,98	0,4	0,04	0,004
	ЧД, руб.	1379	26071	272995	2742235
	ЧДД, руб.	394	15946	171464	1726642

Из экономических расчетов следует, что применение мониторинга частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения убыточно (слишком большой срок окупаемости) при единичном изготовлении устройства контроля частичных разрядов и его применении на подстанциях без телеуправления, в противном случае мониторинг состояния изоляции экономически обоснован. Совершенствование как типа обслуживания тяговых подстанций, так и самого устройства контроля частичных разрядов также должно улучшить экономические показатели эффективности исследования частичных разрядов в устройствах электроснабжения железных дорог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В результате анализа статистических данных об отказах устройств электроснабжения железных дорог было выявлено, что причиной 60% всех отказов является отказ изоляции, при этом отмечено, что диагностируется современными методами контроля состояния изоляции не более 30% дефектов, что подтверждает актуальность разработки методики контроля состояния изоляции устройств электроснабжения железных дорог.

2. В результате анализа воздействующих на состояние изоляции факторов было выявлено их значительное влияние на состояние изоляции. Отмечено, что интенсивность отказов изоляции на разных участках Свердловской железной дороги может отличаться в 2-4 раза.

3. Предложенная математическая модель учитывает все влияющие на изоляцию факторы и позволяет снизить затраты на натурные эксперименты, рассчитать все параметры частичных разрядов и напряжение пробоя изоляции, способствует экономии изоляционных материалов в процессе изготовления новых изоляционных конструкций, определяет возможность эксплуатации конкретного устройства электроснабжения при изменении воздействующих факторов и позволяет решать множество других практических задач.

4. Разработан метод контроля опасного порогового уровня частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения железных дорог и предложено несколько вариантов датчиков частичных разрядов.

Разработано полуавтоматическое устройство контроля порогового уровня частичных разрядов, отличительными признаками которого является простота изготовления и эксплуатации, эффективность и небольшая стоимость. Техническая эффективность устройства контроля частичных разрядов подтверждена в ходе испытаний в высоковольтных лабораториях УрГУПС и Дорожной электротехнической лаборатории Свердловской железной дороги.

5. Выявлена зависимость формы кривых кулон-вольтовых характеристик от эксплуатационных воздействующих факторов для различных устройств электроснабжения – по кривой кулон-вольтовой характеристики можно определить степень увлажнения изоляции, наличие или отсутствие поверхностных загрязнений и общее состояние изоляционной конструкции. Определен пороговый уровень амплитуды частичных разрядов, при превышении которого наблюдается предпробойное состояние изоляции, для исследованных устройств электроснабжения железных дорог (силовых трансформаторов, трансформаторов напряжения, опорных изоляторов, ошиновки распреустройства) при амплитуде частичных разрядов 100 нКл наблюдалось предпробойное состояние.

Также были определены зависимости напряжений зажигания и погасания частичных разрядов от внешних эксплуатационных воздействующих факторов.

6. Определена экономическая эффективность предлагаемого устройства контроля частичных разрядов методом приведенных затрат для различного количества исследуемых устройств электроснабжения и различных методов эксплуатации устройства – при плановых периодических высоковольтных испытаниях и в процессе нормальной эксплуатации (мониторинг состояния изоляции). Например, при периодическом контроле состояния изоляции ста комплектных трансформаторных подстанций с номинальным напряжением 6-10 кВ срок окупаемости устройства контроля частичных разрядов составляет 0,5 месяца, годовая экономия эксплуатационных затрат 31437 руб., чистый доход 250131 руб., чистый дисконтированный доход 157063 руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

1. Косяков А. А. Частичные разряды в изоляции электрических машин // Актуальные проблемы современной науки: Сб. научн. трудов, части 17-21 / СамГТУ. – Самара. – 2002. – С. 24.

2. Косяков А. А. Исследование частичных разрядов в изоляции трансформаторов напряжения // Молодые ученые – транспорту: Сб. науч. трудов / УрГУПС. – Екатеринбург. – 2003. – С. 15-23.

3. Косяков А. А. Исследование частичных разрядов в ошиновке распределительного устройства 6 кВ // Актуальные проблемы современной науки: Сб. науч. трудов, части 12-16 / СамГТУ. – Самара. – 2003. – С. 53-56.
4. Kosakov A. A. Partial Discharges in Voltage Transformers Insulation // Modern Techniques and technologies: Proceedings / TPU. – Tomsk. – 2004. – P. 17-20.
5. Косяков А. А. Анализ параметров частичных разрядов и оценка их применимости для определения состояния изоляции устройств электроснабжения железных дорог // Молодые ученые – транспорту: Сб. науч. трудов, том 1 / УрГУПС. – Екатеринбург. – 2004. – С. 30-44.
6. Косяков А. А. Модель ионизационного процесса в изоляции // Молодые ученые – транспорту: Сб. науч. трудов, том 1 / УрГУПС. – Екатеринбург. – 2004. – С. 24-29.
7. Косяков А. А. Оценка технической эффективности применяемых методов контроля изоляции устройств электроснабжения железнодорожного транспорта // Молодежь Сибири – науке России: Сб. науч. трудов / ГУЦМиЗ, КРО НС "Интеграция", СИБУП. – Красноярск. – 2004. – С. 248-251.
8. Косяков А. А. Характеристика эксплуатационных воздействий на электрическую изоляцию устройств электроснабжения железных дорог // Актуальные проблемы современной науки: Сб. науч. трудов, часть 22 / СамГТУ. – Самара. – 2004. – С. 23-26.
9. Косяков А. А. Актуальность исследования частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения железных дорог на примере Свердловской железной дороги // Новейшие достижения науки и техники на железнодорожном транспорте: Сб. науч. трудов, часть 1 / ЮУЖД. – Челябинск. – 2004. – С. 58-61.
10. Косяков А. А. Техническая эффективность контроля порогового уровня частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения железных дорог // Неразрушающий контроль и диагностика: Сб. науч. трудов / УГТУ-УПИ. – Екатеринбург. – 2005. – С. 302.
11. Косяков А. А. Разработка схем контроля электрических параметров частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения железных дорог // Молодежь Сибири – науке России: Сб. науч. трудов / КРО НС "Интеграция". – Красноярск. – 2005. – С. 354-359.
12. Косяков А. А. Анализ химических изменений изоляционных сред как метод контроля частичных разрядов // Актуальные проблемы современной науки: Сб. науч. трудов / СамГТУ. – Самара. – 2004. – С. 22-24.
13. Косяков А. А. Контроль порогового уровня частичных разрядов в изоляции устройств электроснабжения железных дорог // Современные научно-технические проблемы транспорта: Сб. науч. трудов / УлГТУ. – Ульяновск. – 2005. – С. 13-16.
14. Косяков А. А. Экономическая эффективность эксплуатации устройства контроля частичных разрядов при высоковольтных испытаниях устройств 6-10 кВ // Актуальные проблемы автомобильного,

железнодорожного, трубопроводного транспорта в Уральском регионе: Сб. научн. трудов / ПТГУ. – Пермь. – 2005. – С. 201-207.

15. Патент РФ № 2266548, МПК G01R 31/12, Устройство контроля порогового уровня частичных разрядов. Косяков А. А. Оpubл. 20.12.2005 БИ №35.

16. Патент РФ №2262765, МПК H01H 9/50, G01R 31/00, Устройство для измерения частичных разрядов. Сухогузов А. П., Косяков А. А. Оpubл. 20.10.2005 БИ №29.

17. Kosakov A. A. Partial Discharges Research in Power Supplying Devices of Railway Transport // Prace Naukowe. – 2004. – Transport NR 2 (20). – S. 275-280.

18. Kosakov A. A. Partial Discharges Control Device // Prace Naukowe. – 2005. – Transport NR 3(23). – S. 277-282.

19. Сухогузов А. П., Косяков А. А. Имитационное моделирование частичной ионизации изоляции высоковольтного электрооборудования // Транспорт Урала. – 2006. – № 1. – С. 20-27.

20. Сухогузов А. П., Пятецкий И. А., Косяков А. А., Бунзя А. А. Совершенствование системы диагностики изоляции устройств электроснабжения железных дорог // Транспорт Урала. – 2004. – №3. – С. 44-51.

21. Сухогузов А. П., Косяков А. А. Исследование частичных разрядов в изоляции электрических машин // Вестник УГТУ-УПИ. – 2003. – №5(25), часть 1. – С. 363-371.

22. Сухогузов А. П., Косяков А. А. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах // Молодежь Сибири – науке России: Сб. науч. трудов, часть 2 / СИБУП, КРО НС "Интеграция". – Красноярск. – 2003. – С. 254-255.

23. Сухогузов А. П., Косяков А. А. Частичные разряды в изоляции трансформаторов напряжения // Сб. науч. трудов / НЦ ЭНАС. – М. – 2003. – С. 168-171.

24. Косяков А. А., Бунзя А. А. Диагностика изоляции устройств электроснабжения железных дорог по характеристикам частичных разрядов при плановых периодических высоковольтных испытаниях // Молодые ученые – транспорту: Сб. науч. трудов, том 2 / УрГУПС. – Екатеринбург. – 2005. – С. 37-42.

25. Сухогузов А. П., Косяков А. А., Бунзя А. А. Влияние влажности воздуха на напряжение зажигания частичных разрядов в изоляции устройств 6-10 кВ // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. трудов, том 1 / УрГУПС. – Екатеринбург. – 2003. – С. 271-276.

26. Сухогузов А. П., Косяков А. А., Бунзя А. А. Влияние влажности воздуха на амплитудные характеристики частичных разрядов в изоляции трансформаторов напряжения // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. трудов, том 1 / УрГУПС. – Екатеринбург. – 2003. – С. 276-287.

27. Фролов Н. О., Косяков А. А. Совершенствование структуры изоляции якорных проводников тяговых электродвигателей локомотивов //

Современные техника и технологии: Сб. науч. трудов / ТПУ. – Томск. – 2005.
– Т.1. – С. 234-236.

КОСЯКОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ 6-10 кВ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Лицензия на издательскую деятельность ИД 03581 от 19.12.2000

Сдано в набор

Подписано к печати

Формат бумаги 60·84 1/16

Объем 1,44 п.л.

Заказ

Тираж 100 экз.

Типография УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66