

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ В ИЗОЛЯЦИИ

*Трудно искать черную кошку
в темной комнате особенно
когда ее там нет*

Сидельников Л.Г.

ООО «ТестСервис», г. Пермь

Предприятие ООО «ТестСервис», изначально именуемое как ООО «Тест», создано летом 2003 года. Основной задачей предприятия было освоение технологии диагностики силовых кабельных линий среднего напряжения. Для реализации поставленной задачи, впервые в России, было закуплено оборудование типа OWTS предназначенное для диагностики линий методом частичных разрядов и CD-31 для диагностики методом возвратного напряжения. Приобретенное оборудование, производства германской фирмы Seba KMT, было установлено на шасси отечественного автомобиля «Газель». Длина кабелей лаборатории позволяет выполнять диагностику линий на расстоянии до 50 метров от места присоединения.

Как выяснилось позже, в фирме производителе оборудования не оказалось технологий и программного обеспечения для анализа результатов измерений, нормативов и критериев оценки технического состояния линий. Фирма не обладает этой технологией и сегодня. Попытка найти необходимую информацию на мировых фирмах обладающих подобным оборудованием успеха не принесла. Наиболее существенные успехи в этом достигнуты итальянской фирмой CESI, создавшей технологию, основанную на сравнении обнаруженного дефекта с базой данных. База данных содержит примеры разрядов и описания дефектов, полученные на основе препарирования изоляции и изучения с помощью электронного микроскопа. База создавалась около десяти лет и продолжает наращиваться.

Технология фирмы CESI не может использоваться в российских условиях непосредственно по ряду технических причин. Дело в том, что линии среднего напряжения с изолированной нейтралью применяются только в России. Во всех остальных странах линии имеют глухо заземленную нейтраль. Это обстоятельство является причиной конструктивно различного исполнения кабелей среднего напряжения в России и за рубежом. В России в таких сетях, при коротком однофазном замыкании, другие фазы линий могут находиться под действием линейного напряжения достаточно длительное время. Поэтому в российских кабелях среднего напряжения толще основная изоляция и больше сечение экрана, чем в зарубежных кабелях.

Кроме того, ряд типовых номинальных напряжений в России и за рубежом также отличается. Поэтому база данных фирмы CESI содержит информацию не характерную дефектам в российских линиях. Можно встать на позицию CESI и по образцу и подобию создать свою, российскую базу данных. Но на это потребовалось бы большое время и необходимость экспериментального исследования дефектов. Поэтому ООО «Тест» пошло другим путем. Была создана группа с опытом выполнения научно-исследовательских работ с целью решения проблемы за время не более одного года. К этому моменту предприятием была выполнена диагностика около 300 линий.

Для специалистов эксплуатирующих высоковольтные кабельные линии не столь важен вид и причина разрядов, сколько представляет интерес место возникновения разрядов и степень их опасности. Поэтому было решено не идти по пути создания базы данных и технологий, реализованных CESI, а на основе имеющейся экспериментальной информации определить закономерности развития частичных разрядов. Учитывая случайный характер развития процессов, для этих целей были использованы методы математической статистики и теории вероятности.

Путем экспертной оценки, в качестве основных параметров характеризующих частичные разряды, выбраны:

- амплитуда разрядов;
- количество разрядов за единицу времени;
- напряжение возникновения разрядов.

Задача была решена за время менее полгода. Полученные зависимости, критерии оценки технического состояния линий успешно используются в ООО «ТестСервис» и поныне. Дополнительно были разработаны технологии выполнения диагностических испытаний, обработки результатов измерений и выработки заключений о техническом состоянии. В настоящее время эта технология является наиболее совершенной для диагностики силовых кабельных линий и пока единственной для диагностики линий с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Вдохновленные положительным примером ООО «Тест», более десятка крупных фирм России приобрели аналогичное оборудование. Но, не смотря на то, что многие из них прошли краткосрочные курсы в ООО «Тест», новую технологию они освоить так и не смогли. Позже было установлено, что причина в логике восприятия результатов диагностик. Диагностика понималась и понимается большинством испытателей, как вариант привычных типовых испытаний, которой она по существу не является. Кроме того, большое значение имеет знание физических процессов в изоляции.

Изложение всех принципов и методик, которыми пользуются специалисты ООО «ТестСервис» в рамках одной статьи невозможно. Настоящая работа преследует цель по информированию специалистов только об основных принципах технологий применяемых в диагностике силовых кабельных линий. Принципиально для подготовки специалистов этого профиля необходимо несколько лет. Это новая специальность или специализация на основе уже имеющегося электротехнического образования. При наличии желания заинтересованных фирм, предприятие ООО «ТестСервис» и дочернее научно-исследовательское предприятие ООО «НИЦ Тест» могут предложить учебный план подготовки специалистов диагностов и принять участие в реализации процесса обучения.

Диагностика технического состояния объектов электроэнергетики преследует цель определения дефектов на ранней стадии, места возникновения, законов последующего их развития с целью оценки степени опасности. Дополнительной задачей диагностики является определение остаточного ресурса эксплуатации и нормирование результатов измерений.

Выполняемые в процессе диагностики исследования, реализуются интегральными или дифференциальными измерениями. Например, к интегральным измерениям относятся определение тангенса дельта, возвратного напряжения, тока абсорбции, содержание влаги и т. п. Получаемые результаты позволяют оценить техническое состояние изоляции объекта в целом, но не дают информации о месте положения проблемы. К числу дифференциальных по получаемым результатам относятся метод рефлектометрии, метод частичных разрядов, метод звуколокации, измерение электромагнитного излучения и ряд других методов.

Наиболее сложной проблемой в диагностике технического состояния электрооборудования является нормирование результатов измерений. Как правило, измеряемые процессы не являются строго детерминированными, а подчиняются случайным законам. В практике оценки технического состояния объектов электроэнергетики, наибольшее распространение получили нормативы по предельным или граничным значениям параметров. Эти нормативы являются результатами многочисленных экспериментальных исследований. Так оцениваются значения токов утечки, содержание газов, влаги, фурановых соединений в трансформаторном масле, сопротивление изоляции, тангенс дельта и т.п. В преобладающем своем большинстве аппаратура для мониторинга технического состояния электрооборудования контролирует именно эти параметры. Т.е. в основном это аппаратура релейного типа.

При анализе процессов в изоляции силового электрооборудования используют два основных методических подхода. Один из них базируется на теории зарядов и схемах замещения диэлектриков или на схемах замещения объектов включающих диэлектрики. Другой подход основан на использовании теории электромагнитного поля. Используются и комбинации этих методов.

Для диагностики технического состояния объектов электроэнергетики теория зарядов и схемы замещения используются наиболее часто. Вместе с тем в основе теории зарядов и схем замещения лежат модельные, основанные на гипотезах, представления о протекающих процессах. Модели электромагнитных процессов наглядны и удобны для анализа, но в силу имеющихся ограничений часто не позволяют дать однозначную оценку технического состояния объектов. В ряде случаев использование этого подхода вообще не позволяет получить достоверный результат.

Особенностью диагностики электрооборудования является то обстоятельство, что, несмотря на большой промежуток времени ее существования, многие термины, понятия и величины, используемые в ней, до сих пор не являются общепризнанными и научно обоснованными. В силу истории развития технических наук применение общепризнанных терминов является необходимым, прежде всего по причине нужды для общения на общепонятном языке. Но здесь часто скрывается опасность скатывания науки на позиции догматизма. Поэтому, обсуждая ту или иную проблему в диагностике, участникам диалога необходимо изначально договориться о применяемом техническом языке, при этом, осознавая, что этот язык является условным.

Примером догматического подхода является многовековой поиск первокирпичика материи вещества. Применение термина атом позволило на многие века считать, что это и есть тот самый первокирпичик. Однако позже выяснилось, что атом делим, появились модели атома, были введены новые понятия, элементарные частицы, электрон, протон, нейтрон и т.п. Но процесс поиска первокирпичика продолжается до настоящего времени, тратятся огромные средства на строительство исследовательской техники для этих целей. Вместе с тем, введенные в обиход представления о структуре атома до сих пор являются гипотическими.

Например, широко используемый в практике электротехников электрон ни кем и ни когда, как материальный объект, обнаружен не был и устройство его до сих пор не известно. Определены частицы, имеющие дробный заряд относительно электрона. Но это не мешает строительству технических устройств с использованием этой частицы. Возникает закономерный вопрос, а существует ли вообще этот первокирпичик материи? И должен ли он существовать? Равноценным является вопрос, а где граница окружающего нас пространства, времени, как впрочем, и их начало? Вместе с тем закономерен и вопрос, а зачем в данном случае вся эта философия? Постановка такого вопроса следует из того, что на практике у одних исследователей технического состояния объектов электроэнергетики получается относительно достоверный результат, а у других не получается. И причина этого не только в отсутствии достаточного опыта исследователей. Наличие субъективного фактора в этом процессе, несомненно, но и методика исследований часто имеет решающее значение.

Анализ публикаций и выступлений специалистов в области диагностики показывает, что наработанный материал в основном имеет качественный характер и по этой причине не может пока быть строго нормированным. Более того, у некоторых исследователей сложилось мнение, что ряд измеряемых параметров частичных разрядов, вообще не возможно нормировать. Одно определение, введенное в обиход, как кажущийся заряд, отбивает охоту, что-то нормировать в этом явлении.

Получаемый результат зачастую напрямую зависит от методов применяемых в исследованиях. Становясь на позиции отрицания, что является другой крайностью по отношению к догматизму, можно подвергнуть критике ряд положений заложенных в

теории зарядов и теории схем замещения. В научных исследованиях такой подход принято называть допущениями.

Известно, что скорость электрона в проводнике в миллионы раз меньше скорости передачи электрической энергии. Скорость передачи электрической энергии близка к скорости света. А с такими скоростями могут перемещаться только материи, не имеющие массы, или, как допущение, имеющие бесконечно малую массу. К такому виду материи относится электрическое поле.

Относительно понятия электрическая емкость существует два определения. Одно, это способность участка или элемента цепи накапливать заряды. Другое, применяемое в теоретических основах электротехники, это способность накапливать энергию электрического поля. А что такое заряд, процесс, мера или частица? И что является первокирпичиком заряда или частицы? Т.е. такое определение является условным, а более строгим, это процесс накопления энергии электрического поля.

Использование теории зарядов и схем замещения вынуждает исследователей вводить новые дополнительные понятия, емкость абсорбции, сопротивление абсорбции, потенциальная яма и т.п., но задача анализа процессов в изоляции по-прежнему остается не решенной задачей, а лишь позволяет получить качественные зависимости. Уже более сорока лет ученые всего мира пытаются описать физику возникновения стримеров, но пока безуспешно.

В теории магнитного поля также были и остаются попытки описать среду в магнитном поле с помощью строгих зависимостей. Удалось получить лишь качественный результат, хотя в процессе было сделано и не мало открытий. Революционный шаг в этих исследованиях сделал Максвелл. Он не открыл ни каких новых законов, но с помощью математического аппарата теории поля сумел объединить все ранее известные законы в теории электричества в единую теорию электромагнитного поля.

В теории электромагнитного поля Максвелла отсутствуют такие понятия как, емкость, индуктивность и только как атавизм от предыдущих представлений осталось понятие заряда. И до настоящего времени теория электрического поля остается менее развитой, по сравнению с теорией магнитного поля. В теории Максвелла свойства сред описываются лишь двумя основными параметрами, кроме проводимости, это магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума. Уравнения Максвелла дополняются уравнениями состояния сред, в которые подставляются зависимости получаемые путем экспериментальных исследований материалов, обычно представляемых в виде аппроксимаций различного вида.

До настоящего времени теория электромагнитного поля Максвелла не подвергается сомнению и является наиболее совершенным аппаратом исследований. Недостатком теории является ее относительная сложность, поэтому круг исследователей, использующих эту теорию весьма узок. Обладая образом мышления в соответствии с этой теорией, возможно, существенно продвинулся в такой области, как диагностика технического состояния электрооборудования.

Как уже отмечалось, процессы, происходящие в изоляции электрооборудования, имеют случайный характер, т.е. могут описываться с помощью теорий математической статистики и вероятности. Совместно с теорией электромагнитного поля Максвелла, это достаточно сложный аппарат исследований. Поэтому для практики широкого круга пользователей занимающихся диагностикой предварительно необходима работа специализированных фирм по разработке алгоритмов и программ для этих целей.

В настоящее время в диагностике используется большое количество алгоритмов анализа результатов. Но в большинстве своем эти алгоритмы являются результатом практической деятельности диагностов и в основном имеют качественный характер анализа. Недостаточная полнота алгоритмов компенсируется экспертной оценкой специалистов имеющих большой опыт работы в этой области. Это обстоятельство серьезным образом сдерживает развитие диагностики и не позволяет создание

общедоступных программных продуктов. При формулировании принципов анализа результатов диагностики, необходимо определиться с понятиями физических процессов протекающих в изоляции электрооборудования.

В изоляции силового электрооборудования до 80% дефектов (проблемных мест) на ранней стадии можно определить по результатам анализа частичных разрядов. Непосредственное измерение частичных разрядов в изоляции осуществить практически невозможно, поэтому анализ выполняется по так называемому кажущемуся частичному разряду, т.е. по реакции системы на воздействие высоким напряжением. В соответствие с теорией изоляции, частичные разряды не возможны в вакууме. Поэтому предварительно необходимо рассмотреть физические процессы, способствующие возникновению разрядов.

Частичные разряды в изоляции возникают в местах с большой неоднородностью диэлектрической проницаемости среды и высокой плотностью энергии электрического поля. Неоднородность в толще изоляции возникает по технологическим причинам и представляет собой твердые или газообразные включения. Существуют и конструктивные особенности объектов исследований вызывающие разряды, связанные с краевыми эффектами сред. Плотность энергии электрического поля

$$W_D = \frac{DE}{2},$$

где D – индукция, E – напряженность электрического поля. В общем случае

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi$$

A – векторный магнитный потенциал; φ – скалярный электрический потенциал. Индукция магнитного поля $B = \text{rot}A$. Индукция электрического поля или плотность потока электрического поля связаны уравнением состояния среды,

$$D = \epsilon \epsilon_0 E.$$

В уравнении состояния среды ϵ и ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость среды, и абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума. Изменение градиента электрического потенциала происходит как по причине изменение самого потенциала по координатам, так и по причине изменения диэлектрической проницаемости на границах раздела сред.

Если к диэлектрику, например, кабеля без нагрузки, приложена разность потенциалов, то в нем возникает поток электрического поля. Величина потока небольшая ввиду большого сопротивления изоляции на его пути. Большое сопротивление обеспечивается на этапе проектирования изоляции, толщина которой выбирается из условия не допущения предельной поляризации диэлектрика. Для однородной линии поток также однородный по всей ее длине, за исключением краевого эффекта в концевых кабельных муфтах. При этом проводящая жила и экран кабеля практически не оказывают сопротивления потоку. Т.е. в режиме холостого хода проводники имеют малое сопротивление электрическому потоку. Аналогом этого являются процессы в ферромагнетиках для магнитного поля. Таким образом, поток электрического поля замыкается через источник, проводящую жилу и экран кабеля. Следовательно

$$\text{div } D = 0.$$

При наличии включения в изоляции кабеля, происходит нарушение однородности поля, рис.1. В зависимости от диэлектрической проницаемости включения индукция электрического поля будет возрастать во включении, либо на его периферии.

При высокой диэлектрической проницаемости включения относительно изоляции силовые линии поля будут концентрироваться внутри включения, т.е. индукция электрического поля в этом месте растет. Следовательно, будет расти и плотность энергии электрического поля. Пример такого распределения поля приведен на рис. 2.

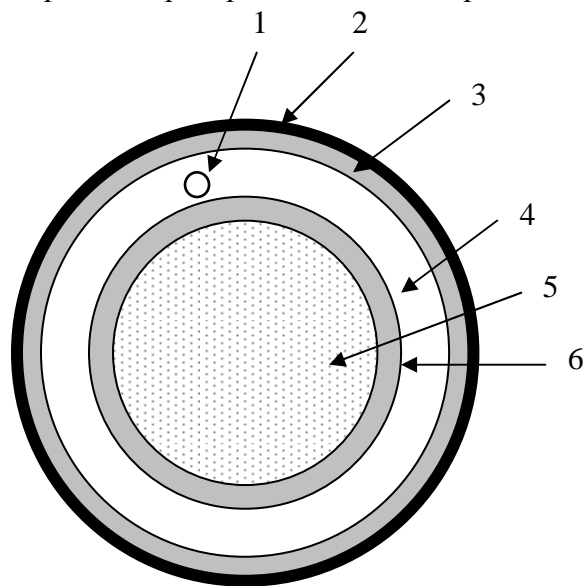


Рис. 1. Модель кабеля с включением в толще изоляции

На рис.1: 1 - включение; 2 – экран; 3 – полупроводящий полиэтилен; 4 – полиэтиленовая изоляция; 5 – токопроводящая жила; 6 – полупроводящий полиэтилен.

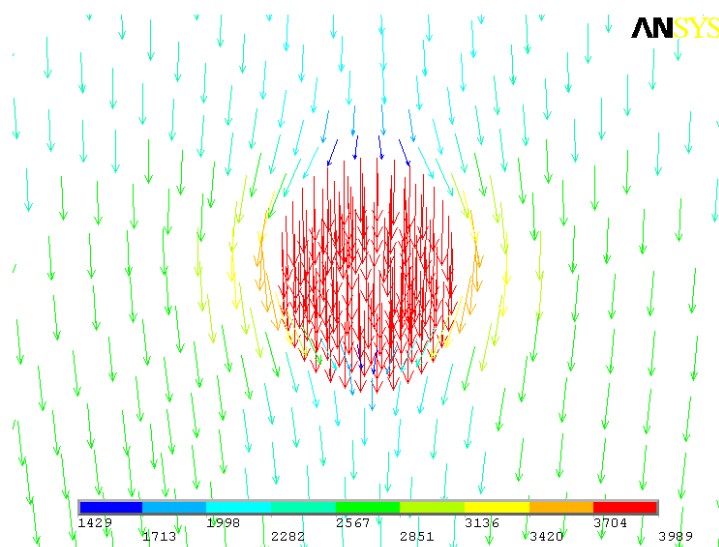


Рис.2. Распределение силовых линий электрического поля при высокой диэлектрической проницаемости среды включения

Пример распределения поля при низкой диэлектрической проницаемости среды включения приведен на рис.3.

Таким образом, наличие включений в толще изоляции приводит к локальному увеличению индукции электрического поля и, следовательно, к увеличению плотности энергии электрического поля. Увеличение индукции электрического поля эквивалентно росту разности потенциалов в этом месте. При плотности энергии электрического поля

равной критическому значению происходит частичное разрушение структуры атомов, сопровождающееся большим выделением энергии в виде электромагнитного излучения, тепла, ростом давления, механическим воздействием на границы объема включения. Т.е. для разрушения атомарной структуры затрачивается энергия от внешнего источника, а выделяющаяся энергия является энергией распада самого атома, что и является причиной нагрева сред, включая проводники. Затраты энергии на распад уменьшают поток энергии передаваемой по линии, что эквивалентно росту сопротивления линии в соответствии с законом Ома.

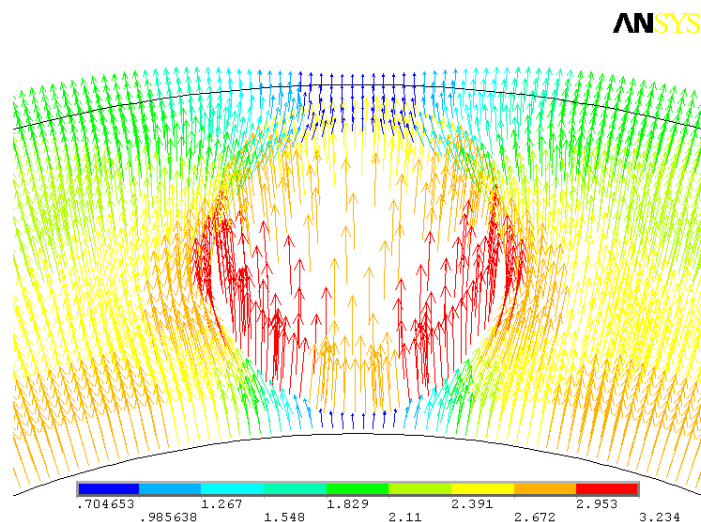


Рис.3. Распределение силовых линий электрического поля при низкой диэлектрической проницаемости среды включения

Более привычным термином для исследователей является не понятие разрушения атомов среды, а ионизация среды и образование в ней свободных зарядов. Но такое толкование вновь приводит к модельным представлениям о структуре атомов предложенной Резерфордом и Бором, а нагрев проводника при этом рассматривается как результат механического взаимодействия зарядов. Кроме того, такие представления не дают ответа о скорости передачи электрической энергии.

Если неоднородности среды интерпретировать как концентраторы силовых линий электрического поля, то становятся понятными требования к механической обработке изоляции при монтаже соединительных и концевых муфт. К концентрации силовых линий поля приводят неровности, выступы в местах снятия изоляции и полупроводящих слоев, неравномерное распределение проводников экрана. Это и есть причины возникновения разрядов. Причиной неоднородности электрического поля является также отсутствие симметрии по сечению кабеля относительно проводящей жилы, что часто присутствует как технологический брак в конструкции кабелей.

Таким образом, качество кабельной линии зависит от качества самого кабеля и во многом от культуры производства фирм занимающихся монтажом кабельных линий. Эти же выводы справедливы для любого вида электрооборудования силовой электроэнергетики. Отдельным вопросом является монтаж линий с изоляцией из сшитого полиэтилена, включая вопрос заземления экрана. Эксплуатация оборудования с твердой изоляцией и изоляцией с применением масла также имеет ряд отличительных особенностей влияющих на срок безаварийной работы.

В зависимости от агрегатного состояния среды процесс развития разряда в изоляции может подчиняться различным закономерностям. Эти закономерности устанавливаются

экспериментальным путем. Наиболее часто среда включения представляет собой газовый пузырь, поэтому, в качестве примера, есть смысл анализа развития разрядов в газовой среде. Для простоты, будем считать, что газовое включение находится в твердой изоляции. В изоляции содержащей масло процесс развития разрядов в газах обладает некоторыми особенностями по сравнению с твердой изоляцией. Кроме того, масло может иметь примеси-включения в твердом состоянии и в ряде случаев примеси, обладающие проводимостью. Кроме того, в изоляции, содержащей масло возможно перемещение включения по объему под действием электромагнитных сил, перепада давления и циркуляции масла.

В соответствие с классической теорией разрядов ток в газах, в общем случае, не подчиняется закону Ома, а определяется вольтамперной характеристикой изображенной на рис. 4.

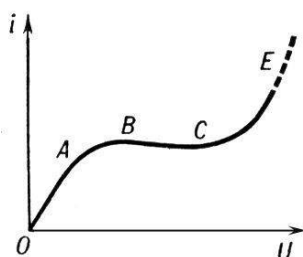


Рис. 4. Вольтамперная характеристика разрядов в газе

Это утверждение не совсем корректно. Правильным следует считать, что ток в газе подчиняется закону Ома, но сопротивление газа является нелинейным и зависит от плотности энергии электрического поля в месте разряда.

Увеличение плотности электрического поля приводит к изменению физических свойств газов и изменению его агрегатного состояния вплоть до перехода в плазму. Плазма, как агрегатное состояние среды, является следствием разрушения структуры атомов. Плазма обладает высокой проводимостью, соизмеримой с проводимостью проводников.

Разряд под воздействием стороннего источника энергии, называется несамостоятельным разрядом. Несамостоятельный разряд при малом значении разности потенциалов называется тихим разрядом. На рис. 4. участок характеристики $O-A-B-C$ соответствует тихому разряду. Электропроводность на этом участке зависит от степени разрушения структуры атомов газа. Участок OA характеризует пропорциональное увеличение проводимости от приложенного напряжения. На этом участке количество атомов с разрушенной структурой растет медленнее, чем количество атомов восстанавливающих или рекомбинирующих свою структуру. На этом участке энергии среды еще недостаточно для преобладания числа разрушений структуры атомов, а связанные с этим потери энергии незначительны.

На участке AB плотности энергии среды становится достаточно для роста скорости разрушения структуры атомов по сравнению с рекомбинацией и рост тока замедляется. На участке BC число распадов начинает преобладать над числом восстановлений и ток в цепи даже уменьшается. Это соответствует росту сопротивления среды. Но при этом растет и плотность энергии электрического поля. На участке CE энергии электрического поля в месте разряда становится достаточным для перехода газа в другое агрегатное состояние, плазмы. При этом большинство атомов имеет разрушенную структуру, что сопровождается большим выделением энергии, но снижением потерь передаваемой энергии. На этом участке нелинейное изменение сопротивления сохраняется в сторону уменьшения и ток резко нарастает.

Описанная характеристика соответствует положительной части разряда во времени до его амплитуды. Экспериментальные характеристики разрядов показывают, что после достижения максимального значения разряд начинает уменьшаться по величине, а затем уходит в область отрицательных значений. При этом площадь отрицательной части разрядной характеристики в разы превышает положительную часть.

Таким образом, для возникновения разряда в месте с высокой плотностью потока электрического поля необходима среда способная к переходу в плазменное состояние. Следовательно, разряд, как оптическое явление, является вторичным и возникает на участке потока электрического поля с высокой плотностью энергии. Первичным является поток электрического поля. В общем случае энергия разряда

$$W = w_E + w_B + w_t + w_{эм} + w_m + w_{аи} + \Delta w_a ,$$

где w_E - энергия потока электрического поля, включая потоки рассеивания; w_B - энергия магнитного поля; w_t - энергия теплового поля; $w_{эм}$ - энергия электромагнитного излучения; w_m - механическая энергия; $w_{аи}$ - энергия акустического излучения; Δw_a - энергия распада атомарной структуры.

Поток электрического поля непосредственно не измеряется, а измеряется сила его взаимодействия со средой, измеряемая в амперах. В соответствие с законом Ампера один ампер соответствует 2×10^{-7} Н силы взаимодействия двух параллельных проводников с током. При измерении разрядов электрическим способом измеряется сила тока в месте подключения аппаратуры. Если проинтегрировать силу тока от разряда по времени, то получим величину заряда. Однако интегрирование производится за фиксированный промежуток времени при амплитуде разряда, что соответствует амплитуде кажущегося заряда.

Часть потока электрического поля ответвляется на потоки рассеивания через основную изоляцию на экран кабеля. Другая часть потока распространяется в сторону противоположную от точки измерения и, отразившись от конца линии, возвращается к точке измерения. Это отраженный импульс разряда. Без учета потерь на потоки рассеивания и энергии отраженного импульса нормирование разрядов на основе таких измерений под большим вопросом. Совершенно очевидно, что измеренная таким способом амплитуда разряда не соответствует полной энергии электрического поля в месте возникновения разряда. По крайней мере, необходимо учитывать затухание импульса. Следует предположить, что полная энергия электрического поля разряда является максимальной по сравнению с другими видами энергии в месте разряда.

При наличии потока электрического поля образуется магнитное поле. В однородной среде это поле близко к нулю, но в местах неоднородностей изоляции и концах линии оно существенно и оказывает влияние на процесс разряда. В практике диагностики измерение магнитных полей распространение не получило. Однако магнитное поле и свободные электрические диполи в изоляции являются причиной колебательного характера процесса разряда. Эти колебания не гармонические, а число колебаний зависит от энергии, запасенной в месте разряда.

Установлено, что отрицательная часть колебаний по площади существенно больше положительной части, что означает наличие дополнительной энергии. Так как любое преобразование энергии идет с потерями, то причиной прироста энергии не может быть наведенная ЭДС от изменяющегося магнитного поля. Предположительно, дополнительная энергия возникает по причине разрушения энергетических уровней атомов среды.

Также предположительно, энергия теплового поля в месте разряда является результатом разрушения энергетических уровней атомов, в результате чего и происходит нагрев среды от освобожденной энергии уровней. Наиболее высокая плотность теплового поля в «жгуте» плазмы разряда. Поэтому в точке возникновения разряда происходит большой нагрев изоляции и насыщение ее углеродом. Каждый последующий разряд в

этом месте происходит уже с меньшими затратами энергии из-за увеличения электропроводности пути разряда, но это не означает уменьшение энергии электрического поля от разряда. Во времени этот процесс идет достаточно медленно, месяцы и даже годы, но в конечном итоге приводит к пробое изоляции. Тепловое поле от разрядов может быть измерено тепловизором или пирометром. В принципе эта энергия может быть нормирована.

Любой разряд сопровождается электромагнитным излучением в высокочастотном диапазоне. Для измерения электромагнитного излучения существуют приборы отечественного и зарубежного производства. Достоинством таких измерений является отсутствие непосредственного контакта с объектом. Электромагнитное излучение также может быть нормировано. Электромагнитное излучение от разряда происходит и в ультрафиолетовом диапазоне частот. Это излучение легко измеряется при наличии разряда на поверхности диэлектрика. При разряде в толще изоляции такие измерения невозможны из-за сильного экранирования ультрафиолетового излучения.

Механическая энергия от разряда возникает в результате взрывоподобного воздействия на окружающую среду. Это воздействие постепенно приводит к разрушению изоляции. Импульсы механического воздействия могут быть измерены средствами вибродиагностики, что применяется для диагностики муфт высоковольтных линий и вводов. Эта энергия также может быть нормирована.

Результатом механического воздействия на среду является акустическое излучение, в том числе и в ультразвуковом диапазоне частот. Это излучение также может быть измерено, что используется в практике диагностики.

Таким образом, для выработки нормативов для разрядов в изоляции необходимо учесть все перечисленные виды энергии, либо выделить из них наиболее значимые. Второстепенные виды энергии от разрядов могут использоваться для уточнения диагноза технического состояния изоляции. Естественно, что эта работа должна быть согласована между специалистами занимающимися диагностикой изоляции. Решение должно быть выработано либо на основе экспертной оценки специалистами, либо на основании экспериментальных и теоретических исследований. Учитывая, что в современной России отсутствуют структуры федерального уровня для выполнения этой работы, первоначально она может быть реализована силами общественного совета специалистов.

В настоящее время нормативы для оценки разрядов в изоляции хотя и имеются, но не являются общепризнанными и утвержденными в установленном порядке. Задача диагностики изоляции и экспертной оценки технического состояния пока решается силами уникальных специалистов на основе их большого практического опыта.

По аналогии с ферромагнитными средами, среды с диэлектрическими свойствами можно рассматривать как биполярные. Допустим, что в диэлектрике отсутствуют объемы, обладающие электрическим потенциалом одного знака, а среда диэлектрика представляет собой хаотично расположенные электрические диполи (поляризованные области пространства). При отсутствии внешнего электрического поля суммарное поле диэлектрика равно нулю, а энергия внутреннего электрического поля минимальна. При наличии внешнего электрического поля диполи диэлектрика выстраиваются в направлении внешнего поля (электронизация), а среда дополнительно поляризуется. Процесс идет до тех пор, пока суммарное поле диполей (направленное навстречу к внешнему полю) не станет равным по напряженности внешнему полю, рис.5.

Таким образом, заряд емкости это процесс накопления энергии электрического поля в диэлектрике. Пробой диэлектрика возможен при условии, когда напряженность внешнего поля на участке цепи становится большей суммарной напряженности поля диполей. Частичный разряд при номинальном напряжении возникает в местах изоляции с большой плотностью энергии электрического поля, т.е. в местах неоднородностей изоляции.

Теория электромагнитного поля не предполагает изучение диэлектрика на атомарном уровне, а рассматривает его как дискретную структуру, поляризованную в электрическом поле. Характеристики диэлектриков, применяемые в решениях уравнений поля, в данном случае являются результатами экспериментальных исследований.

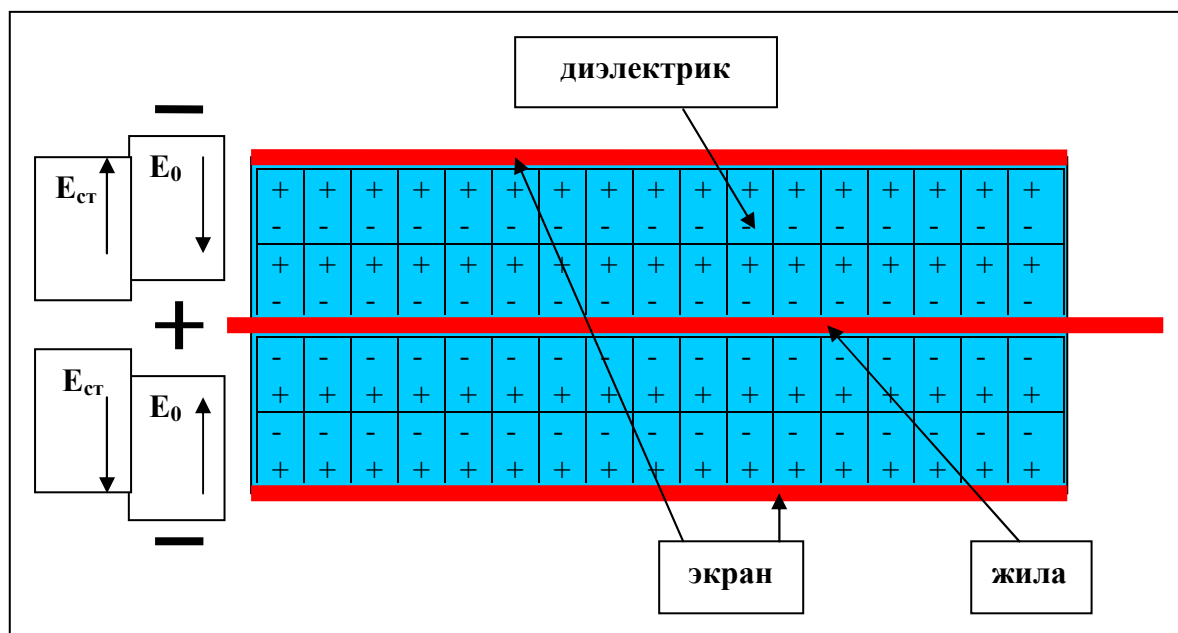


Рис. 5. Модельные представления физических процессов в изоляции кабеля

На рис.5, E_0 - напряженность электрического поля диполей (областей) диэлектрика, $E_{ст}$ - напряженность стороннего источника. При отсутствии неоднородностей в изоляции, электрическое поле однородно и условий для протекания токов в изоляции нет. При наличии неоднородностей в изоляции кабеля условие $E_0 \geq E_{ст}$ нарушается и появляется ток утечки. При $E_{ст} \gg E_0$ возможен пробой изоляции. Наличие неоднородностей в изоляции, таких как: образование полостей из-за утечки масла, в концевых и соединительных муфтах; наличие воды в изоляции; расслоение изоляции и т.п., можно обнаружить с помощью метода возвратного напряжения в кабелях с бумажно-масляной изоляцией (метод вольтметра). Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена методом тока абсорбции (метод амперметра). Метод возвратного напряжения для такой изоляции также применим, но по причине низкого уровня возвратного напряжения слабо помехозащищен. На рис.6 показан принцип реализации метода возвратного напряжения.

Схема замещения линии соответствует широко применяемой в расчетах изоляции схеме предложенной Максвеллом. Применительно к кабельной линии, в течение 15 минут выполняется заряд емкости линии от источника постоянного напряжения. На время равное две секунды жила линии замыкается на экран, в течение, которого происходит разряд геометрической емкости, а емкости абсорбции, из-за больших значений сопротивлений абсорбции, разрядится, не успевают.

На схеме $R_{и}$ - сопротивление изоляции; $R_{г}$ - геометрическая емкость; C_k , R_k - емкости и сопротивления абсорбции, рис.6.

В дальнейшем измеряются процессы обмена энергией между емкостями абсорбции и геометрической емкости до их окончательного разряда. Понятия геометрическая емкость и емкость абсорбции являются условными, позволяющими анализировать процессы в изоляции с помощью схемы замещения.

Используя принципы, изложенные выше, процессы в методе возвратного напряжения можно описать следующим образом, рис.7. При коротком замыкании заряженной линии на малый промежуток времени напряженность внешнего

электрического поля становится равной нулю. При этом большая часть диполей под действием электрических сил успевает занять новое устойчивое положение в пространстве, а разность потенциалов между жилой и экраном линии уменьшается до величины называемой возвратным напряжением (остаточная поляризация).

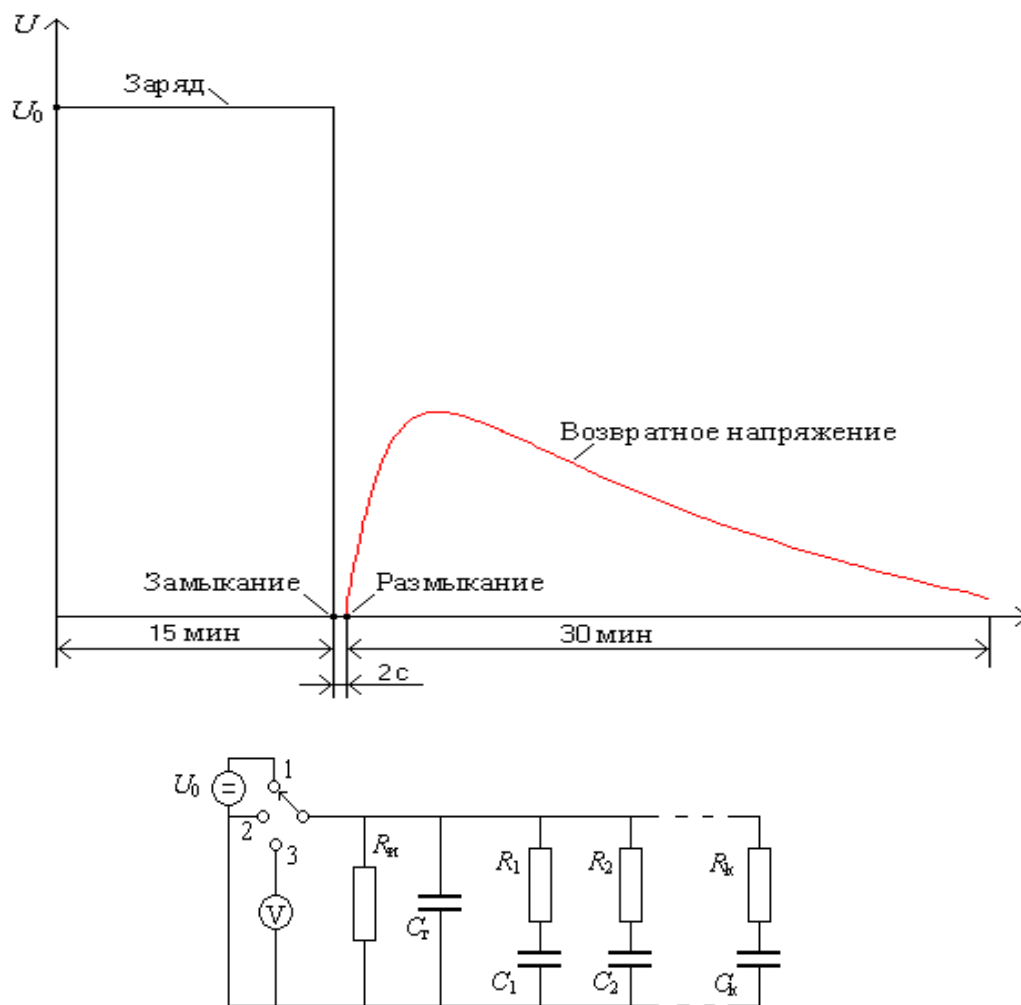


Рис. 6. Принцип реализации метода возвратного напряжения

Дальнейший процесс разряда идет медленно и зависит от ширины петли гистерезиса, площадь которой пропорциональна запасенной энергии электрического поля, а также угла ее наклона к оси абсцисс. В этот момент велико сопротивление пути разряда, так как диполи изоляции вновь разориентированы по объему, кроме его части соответствующей возвратному напряжению.

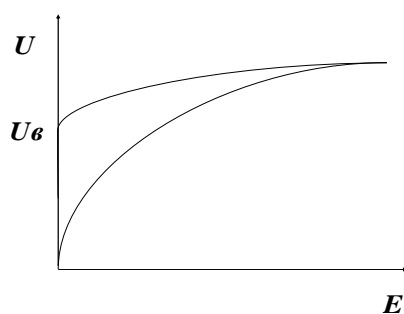


Рис.7. К методу возвратного напряжения

Аналогично ферромагнетикам диэлектрики можно разделить на электрически-мягкие и электрически-жесткие. Так, например, кабельные линии с бумажно-масляной изоляцией имеют широкую петлю гистерезиса и большое возвратное напряжение, а линии из сшитого полиэтилена имеют узкую петлю и возвратное напряжение на порядок меньшее.

Для выполнения расчетов изоляции необходимо иметь экспериментальные характеристики используемых в конструкциях материалов, аналогично характеристикам ферромагнетиков, а в методиках использовать численные методы анализа полей. Этот же подход следует использовать при анализе результатов диагностики изоляции, например, методом частичных разрядов.

Для полной и наиболее достоверной диагностики силовых кабельных линий используются метод частичных разрядов, метод возвратного напряжения (тока абсорбции). Дополнительно возможны измерения сопротивлений фаз, петли фаза-нуль, тепловизионное обследование кабельных муфт.

Заключение по техническому состоянию силовой кабельной линии делается на основании анализа результатов диагностики методом частичных разрядов и методом возвратного напряжения. Первый метод позволяет определить степень опасности обнаруженных дефектов (проблемных мест), выполнить их локализацию. Под локализацией понимается определение участка линии, на котором имеется дефект. При ремонте этот участок подлежит замене. При локации места дефекта его наихудшее и точное место положение практического смысла не имеет, так как при ремонте, все равно нужно определиться, какой длины отрезок линии должен быть заменен.

Второй метод позволяет уточнить время выхода линии из строя, т.е. остаточный ресурс с имеющимся дефектом. Кроме того, возможно определение степени старения изоляции и наличие в ней влаги. Наличие влаги в изоляции характерно не только для старых линий, но и для вновь вводимых в эксплуатацию при ненадлежащем хранении кабеля.

Разработана методика, которая позволяет на основании полученных результатов определять остаточный ресурс линий с точностью до года, а по полученным осциллограммам оценивать техническое состояние линии, включая контроль предпробивного состояния. Недостаток метода заключается в интегральной оценке технического состояния изоляции.

В протоколе приводятся напряжения возникновения разрядов по фазам, а также максимальный уровень и количество разрядов в секунду. Здесь же указываются диапазоны допустимых значений факторов по четырем степеням технического состояния. Дополнительно определяются не нормированные факторы. К ним относятся:

- уровень разрядов для напряжения возникновения разрядов;
- напряжение гашения;
- тангенс угла диэлектрических потерь;
- скорость распространения электромагнитной волны;
- количество циклов измерения;
- электрическая емкость каждой фазы относительно земли.

Осциллограммы в технических отчетах по диагностике приводятся как интегральные для всех фаз, так и по каждой фазе в отдельности. Осциллограммы с картой частичных разрядов и гистограммами их количества в проблемных местах уже на первом этапе позволяют делать выводы о техническом состоянии линии и степени опасности обнаруженных дефектов. По результатам диагностических испытаний методом частичных разрядов пока не удалось научиться определять остаточный ресурс кабельных линий, что часто является необходимым для заказчиков диагностических работ.

В методе частичных разрядов для решения задачи по определению остаточного ресурса, казалось бы достаточно иметь статистику состояния изоляции во времени. Однако, как показывает практика, заметное изменение технического состояния происходит за время не менее полугода, а для построения кривой изменения, в соответствие с теорией аппроксимации, необходимо иметь не менее пяти результатов диагностик. За это время есть риск неконтролируемого выхода линии из строя. Кроме того, уже в течение нескольких месяцев локализованный дефект может переместиться в другое место линии, что характерно для кабелей с бумажно-масляной изоляцией, а в ряде случаев вообще исчезнуть, чтобы вновь возникнуть через определенное время.

Перемещение проблемных мест, а также их исчезновение в линиях с бумажно-масляной изоляцией возможно по ряду причин. При нарушении герметичности муфт или кабеля происходит утечка масла, которое находится под давлением большим атмосферного давления. Давление масла в месте утечки падает, что приводит к перемещению масла к месту утечки по межслойным капиллярным каналам изоляции.

По длине капиллярных межслойных каналов действует большая сила поверхностного натяжения, поэтому возможен разрыв потока масла. В месте разрыва потока образуется газовый пузырь, за задним фронтом которого создается разряжение давления. Аналогично маслу в силовых трансформаторах, в линиях с бумажно-масляной изоляцией при работе всегда имеются растворенные газы. Газовый пузырь поляризуется под действием сил электрического поля и в дальнейшем ведет себя как диполь, т.е. может перемещаться в направлении поля.

Таким образом, перемещение проблемного места в таких линиях происходит под действием сил перепада давления и сил электрического поля. Газовый пузырь может выйти наружу в месте утечки масла и проблемное место (частичные разряды) исчезает. Новый разрыв потока масла возможен в любом другом месте линии, но вблизи места утечки. Поэтому, проблема в большинстве случаев находится в арматуре линий, хотя порой и не проявляет себя по наличию частичных разрядов.

Немного об испытаниях линий с изоляцией из сшитого полиэтилена повышенным напряжением пониженной частоты, т.е. 0,1 Гц. Метод широко рекламируется в литературе, но эффективно может быть использован только после достаточно длительной эксплуатации линий. Это время, как правило, больше десяти лет. В ряде случаев, при грубых нарушениях технологии монтажа, этот метод также может быть эффективным. Но в большинстве случаев при проверке вновь вводимых в эксплуатацию линий выявить имеющиеся дефекты этим методом не удается.

В процессе длительной эксплуатации кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в его толще, с выходом на поверхность изоляции, образуются микротрещины, так называемые триинги. Причин образования триингов много, это процессы полимеризации, механические и тепловые нагрузки и т.п. По каналам триингов из окружающей среды поступает влага, поэтому с их ростом сопротивление изоляции в этом месте падает.

На рис. 8 условно показано образование триинга в изоляции из сшитого полиэтилена. Так как ширина каналов триинга не велика, то напряженность электрического поля в точках на стенках каналов в любом сечении примерно одинаковая (например, участок 1-2-3). Следовательно, и разность электрических потенциалов в этих точках также невелика. Поэтому возникновение разрядов между стенками каналов мало вероятно.

Электрическая прочность изоляции из сшитого полиэтилена существенно больше бумажно-масляной изоляции. Кроме того, сшитый полиэтилен относится к классу не полярных диэлектриков. При производстве испытаний этой изоляции повышенным напряжением пониженной частоты (0,1 Гц) разряды возникают в местах с малой толщиной, например, участок (4-5), рис.8. В этом случае велика вероятность пробоя изоляции. При малой глубине проникновения триингов испытания проходят успешно, в то время как дефекты в изоляции уже имеются. В случаях грубых нарушениях технологии

изготовления муфт, либо при механических повреждениях кабеля в процессе монтажа, этот метод может быть эффективным для обнаружения дефектов.

При монтаже кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена часто происходит механическое нарушение оболочки кабеля. В дальнейшем, при эксплуатации таких линий, под воздействием проникающей влаги происходит окисление и разрушение экрана кабеля. Поэтому при производстве испытаний основной изоляции необходимо также испытание оболочки (экран-земля). Нарушение оболочки происходит и из-за ее проплавления под действием наведенных токов при неправильном заземлении экранов линии.

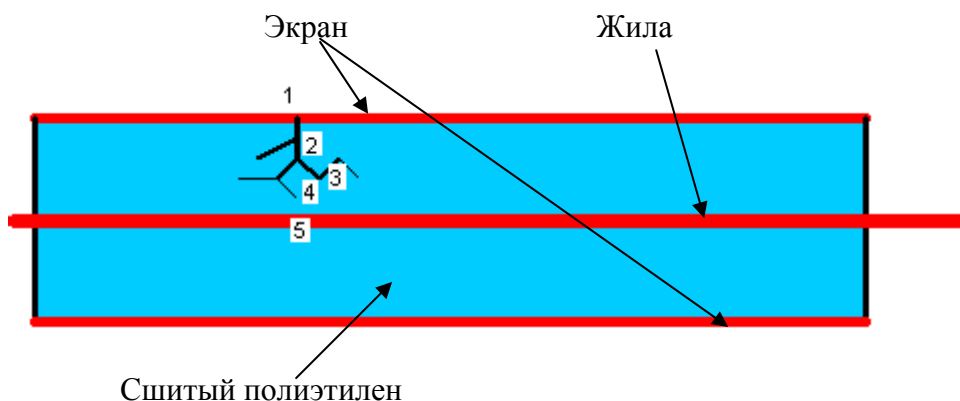


Рис.8. Пример образования триинга в кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена

Триинги в сшитом полиэтилене могут быть определены по току утечки, току релаксации или тангенсу угла диэлектрических потерь.

На рис. 9 показана зависимость напряженности электрического поля от диаметра газового включения в полиэтиленовой изоляции.

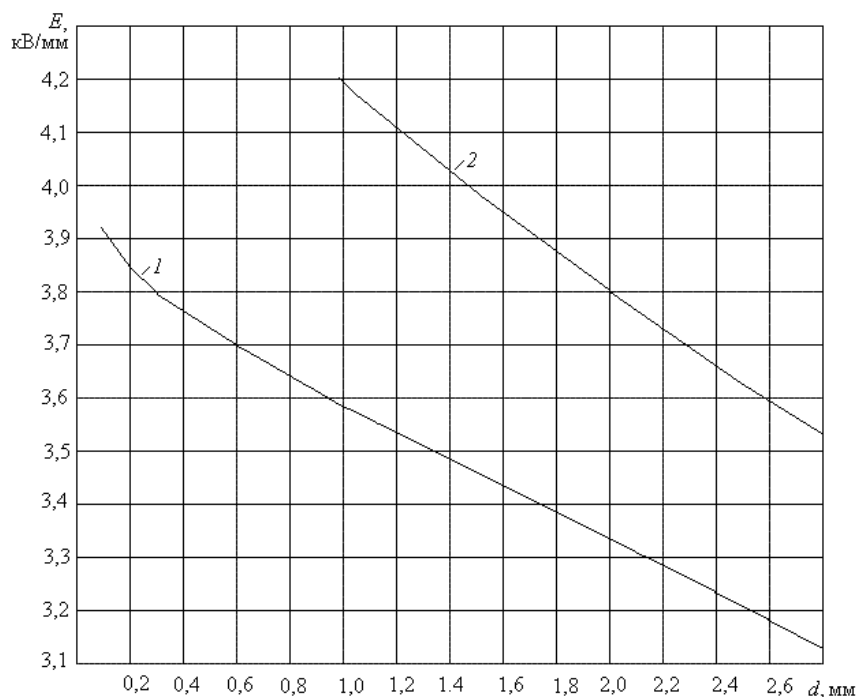


Рис. 9. Зависимость напряженности электрического поля от диаметра газового включения:
 1) в полиэтиленовой изоляции; 2) электрическая прочность воздуха

Плотность энергии электрического поля зависит не только от индукции электрического поля, но и от напряженности. В свою очередь напряженность электрического поля является функцией состояния среды включения и его размеров. В общем случае, сопротивление, по которому замыкается поток поля

$$Z = \sum_{i=1}^n a \frac{l_i}{S_i},$$

где a – коэффициент или функция, описывающая физические свойства среды; l_i – длина участка пути; S_i – площадь поперечного сечения участка цепи. Например, для активного сопротивления проводника, коэффициент a , это удельное электрическое сопротивление; для магнитного поля, этот коэффициент пропорциональный магнитной проницаемости среды, а для потока электрического поля, диэлектрической проницаемости среды.

В общем, a является функцией координат и агрегатного состояния среды, т.е. является нелинейным и нестационарным. В любом случае сопротивление пути потоку поля стремится к минимуму, что саморегулируется отношением длины участка цепи к сечению, в зависимости от величины a , т.е. в функции энергетического состояния среды. Это является причиной разветвления любого электрического разряда.

На рис. 10 представлен пример возможного разряда в газе. D – индукция электрического поля на участке цепи до точки разветвления потока, B – индукция возникшего в результате магнитного поля. В соответствии с законом электромагнитной индукции, изменяющееся магнитное поле наводит в «жгуте» плазмы разряда на этом участке ЭДС

$$e = -\frac{\partial B}{\partial t},$$

препятствующую нарастанию поля под действием внешнего источника. Кроме того, растет разность потенциалов диполей в месте разряда, поле которых направлено встречно полю внешнего источника. Все это приводит к уменьшению потока разряда и вплоть до его реверса на участке разряда.

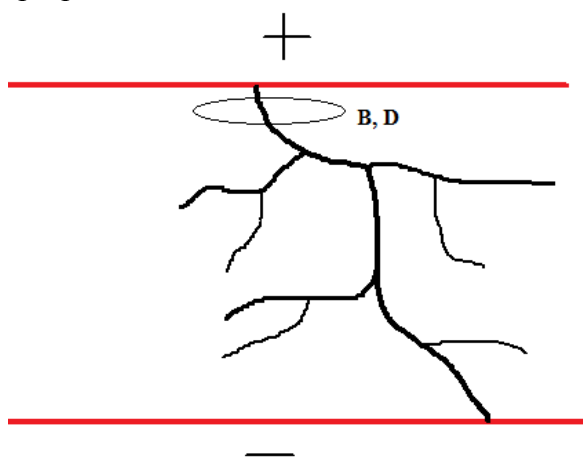


Рис. 10. Разряд в газе

Геометрически разряды имеют криволинейную форму, что объясняется влиянием магнитных полей на поток электрического поля. Практически всегда в картине разряда

имеется законченная траектория от одного потенциала внешнего источника к другому потенциалу. Ответвления разрядов визуально обрываются в пространстве, но фактически на конце каждого ответвления происходит дополнительное разветвление потока поля, по причине не достаточной энергии для образования плазмы. Поэтому среда вновь переходит из плазменного в исходное газообразное состояние и визуально поток поля не наблюдается.

Попытки многих исследователей описать разряд с помощью теории зарядов и схем замещения успеха не принесли. Задача может быть решена на основе использования теории электромагнитного поля и наличии экспериментальных характеристик сред, в которых наблюдаются разряды. Решение этой задачи имеет не только научное, но и прикладное значение, например, для целей нормирования измеряемых разрядов в электрооборудовании.

Сегодня нормирование разрядов производится по их амплитуде, а их величина имеет размерность пК. Такое нормирование не содержит в себе информацию об энергии разряда и не позволяет, обосновано сравнивать калибраторы разрядов различных производителей. Учитывая, что заряд является интегралом тока по времени, необходимо нормировать и время измерения амплитуды разряда.