

Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ
зав. кафедрой Энергетика
_____ Н.В. Савина
«_____» _____ 2007 г.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. ИЗОЛЯЦИЯ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ

для специальностей:

140204 – "Электрические станции"

140205 – "Электроэнергетические системы и сети"

140211 – "Электроснабжение "

140203 – "Релейная защита и автоматизация энергетических систем"

Составители: проф. Н.В. Савина,
доц. В.В. Соловьев

Благовещенск
2007

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного
университета

к.т.н. проф. Н.В. Савина
к.т.н. доц. В.В. Соловьев

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ.» для студентов очной, заочной и
заочной сокращенной форм обучения для специальностей: 140204 –
"Электрические станции"; 140205 – "Электроэнергетические системы и
сети"; 140211 – "Электроснабжение "; 140203 – "Релейная защита и
автоматизация энергетических систем"

Учебно-методические рекомендации ориентированны на оказание помощи
студентам очной и заочной форм обучения по специальностям: 140204 –
"Электрические станции"; 140205 – "Электроэнергетические системы и
сети"; 140211 – "Электроснабжение "; 140203 – "Релейная защита и
автоматизация энергетических систем" для формирования специальных
знаний о видах изоляции и перенапряжениях возникающих в
электроэнергетике.

Рецензент:

©Амурский государственного университета, 2007

2.1.1 Программа дисциплины, соответствующая требованиям государственного образовательного стандарта

Государственный образовательный стандарт подготовки дипломированного специалиста по направлению «Электроэнергетика» включает изучение дисциплины «Электроэнергетика» (ОПД.Ф.08). Данная дисциплина является базовой при подготовке инженеров по специальностям: «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Целью дисциплины является изучение принципов построения электроэнергетических систем, производства электроэнергии, видов и типов электростанций, схем электрических станций и подстанций, конструктивных особенностей линий электропередачи, методов расчета режимов, условий выполнения балансов мощности, особенностей систем электроснабжения различных объектов, общих сведений о релейной защите и автоматизации, изоляции и перенапряжений.

Основой для изучения дисциплины являются следующие: Физика, Высшая математика, ТОЭ, Электроматериаловедение.

2.1.2 Рабочая программа дисциплины

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования
«Амурский государственный университет»
(ГОУВПО «АмГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по УНР

_____ Е.С. Астапова

личная подпись, И.О.Ф

"__" _____ 200__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине «Электроэнергетика»
"Изоляция"

для специальностей:

140204 – "Электрические станции"

140205 – "Электроэнергетические системы и сети"

140211 – "Электроснабжение "

140203 – "Релейная защита и автоматизация энергетических систем"

Курс 4	Очная форма обучения	Заочная форма обучения	Ускоренная форма обучения
Семестр	7	5	3
Лекции (час)	48	12	8
Практические занятия	нет	нет	Нет
Лабораторные работы	16	6	4
Самостоятельная работа	46	82	88
Экзамен	3	5	3
ВСЕГО часов	100	100	100

Составитель: Савина Н.В. к.т.н., профессор

Соловьев В.В., к.т.н., доцент

Факультет энергетический

Кафедра Энергетики

2007

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению (специальности) 140203, 140204, 140205, 140211.

Разработана : Савиной Н.В. к.т.н., профессор; Соловьевым В.В., к.т.н., доцент кафедры энергетики

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

“ ___ ” _____ 200 г (протокол №).

Зав.кафедрой

(Н.В.Савина)

Рабочая программа рассмотрена на заседании учебно-методического совета направления (специальностей) 140203, 140204, 140205, 140211.

“ ___ ” _____ 200 г (протокол №).

Председатель УМС

Рабочая программа переутверждена на _____ учебный год на заседании кафедры " ___ " _____ 200

Протокол №

Зав. кафедрой

Председатель УМСС

Начальник УМУ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Государственный образовательный стандарт подготовки дипломированного специалиста по направлению «Электроэнергетика» включает изучение дисциплины «Электроэнергетика» ИЗОЛЯЦИЯ (ОПД.Ф.08). Данная дисциплина является базовой при подготовке инженеров по специальностям: «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

1.1. Цель преподавания дисциплины.

Целью дисциплины является изучение общих сведений о изоляции и перенапряжений.

Основой для изучения дисциплины являются следующие: Физика, Высшая математика, ТОЭ, Электроматериаловедение.

1.2. Задачи изучения дисциплины.

Задачей изучения дисциплины является подготовка дипломированных специалистов по направлению «Изоляция» к проектированию и эксплуатации электроэнергетических систем, электрических станций, систем электроснабжения, выработка компетентного подхода к решению задач, возникающих в области электроэнергетики, на основе системного анализа.

В результате изучения дисциплины в соответствии с квалификационной характеристикой выпускников, студенты должны **знать**:

виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения электрических станций и подстанций, воздушных и кабельных линий электропередачи;

условия работы изоляции при длительном воздействии рабочего напряжения.

Уметь:

выбирать источники электроэнергии, применять типовые схемы распределительных устройств;

использовать принципы технологического процесса производства электроэнергии на различных типах электроустановок, включая нетрадиционные источники энергии;

разрабатывать и анализировать электрические схемы станций и подстанций;

выбирать оборудование собственных нужд электростанций и их схемы; классифицировать электрические сети;

составлять схемы замещения и определять их параметры для разомкнутых разветвленных и простых замкнутых сетей различной конфигурации;

рассчитывать нормальные и послеаварийные режимы сетей различных конфигураций нескольких уровней номинального напряжения;

выбирать номера ответвлений РПН и ПБВ силовых трансформаторов и автотрансформаторов;

составлять и обеспечивать балансы активной и реактивной мощностей; анализировать рабочие режимы энергосистемы;

классифицировать электроприемники;

рассчитывать электрические нагрузки;

выбирать параметры основного оборудования в системах электроснабжения;

выбирать режимы нейтрали;

осуществлять компенсацию емкостных токов замыкания на землю;

выбирать типы электроустановок;

самостоятельно разрабатывать эффективные проектные решения в области электроэнергетики;

применять ресурсосберегающие технологии;

анализировать условия работы изоляции электроустановок и линий электропередач различных классов напряжения;

анализировать и определять характеристики физических процессов, протекающих во внешней и внутренней изоляции под воздействием высоких напряжений, оценивать их влияние на надежность электропередачи и электроустановок;

выбирать изоляцию;

эксплуатировать внешнюю и внутреннюю изоляцию линий электропередачи и электроустановок при любых условиях работы энергосистемы;

закреплять полученные теоретические навыки при выполнении курсовых и дипломных проектов.

иметь навыки построения изображений технических изделий, оформления чертежей и электрических схем и составления спецификаций; составления электрических схем основных типов электроустановок и расчетов их базовых энергетических показателей; выбора простейших схем электрических соединений электрических станций, проектирования изоляции электроустановок, систем электроснабжения, разработки и реализации оптимальных технических решений в области электроэнергетики.

1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых студентами необходимо при изучении данной дисциплины.

Математика: алгебра, решение систем алгебраических уравнений, дифференциальные и интегральные исчисления, графы, теория функций комплексного переменного, вероятность и статистика.

Физика: электричество и магнетизм, явления сверхпроводимости, полупроводники, принципы неопределенности.

Теоретические основы электротехники: уравнения электромагнитного поля, законы электрических цепей; трехфазные цепи; теория электромагнитного поля, поверхностный эффект и эффект близости; электромагнитное экранирование.

Электромеханика: типы электрических машин, трансформаторы, автотрансформаторы, их режимы работы, конструкции.

Материаловедение: диэлектрики и их пробой, электроизоляционные материалы, проводники.

ВЫДЕРЖКИ ИЗ СТАНДАРТА

2.1. Федеральный компонент ОПД.Ф.08 электроэнергетика. Изоляция
Виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения; изоляция воздушных линий электропередачи; изоляция электрооборудования станций и подстанций, закрытых и открытых распределительных устройств; элегазовая изоляция.

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ КУРСА

Курс состоит из лекционной части и лабораторных работ. На лабораторных работах проводятся опыты с , закрепляются знания, полученные на лекциях и при самостоятельной работе с литературой.

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС Изоляция – 48 часов

Тема 1. Введение. Основные понятия и определения. (4 часа).

Предмет и задачи дисциплины. Виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения и воздушных линий электропередачи, условия ее работы. Требования к изоляции и классификация электрической изоляции. Напряжения, действующие на изоляцию. Общие сведения о перенапряжениях, возникающих в электроустановках, в электрических системах, их характеристики. Проблемы изоляции в современной электроэнергетике.

Тема 2. Общая характеристика внешней изоляции (4 часа).

Особенности внешней изоляции. Атмосферный воздух как диэлектрик. Классификация воздушных изоляционных промежутков. Назначение и типы изоляторов. Конструкция изоляторов. Виды, типовые элементы и условия испытаний внешней изоляции.

Тема 3. Разряды в воздушных промежутках (6 часа)

Разряд в однородном поле. Развитие разряда и пробивные напряжения промежутков с однородным электрическим полем. Закон Пашена. Слабонеоднородные и резконеоднородные поля. Развитие разряда и начальные напряжения промежутков с неоднородными электрическим полем. Эффект полярности электродов. Разряды в длинных воздушных промежутках. Время разряда и его структура. Вольт-секундные характеристики изоляции и их значение.

Тема 4. Разряды в воздухе вдоль поверхности изоляторов (6 часа)

Поверхностный разряд в резконеоднородном поле при преобладании:

а) тангенциальной составляющей напряженности; б) нормальной составляющей напряженности. Разряд вдоль поверхности в однородном поле. Влияние конструктивных особенностей изоляторов на напряжение перекрытия. Развитие разряда и напряжения перекрытия изоляторов при неблагоприятных атмосферных воздействиях, их учет при определении разрядных и испытательных напряжений. Коронный разряд, импульсная корона. Регулирование электрических полей во внешней изоляции за счет экранов, барьеров и принудительного распределения напряжения в изоляционных конструкциях.

Тема 5. Общие свойства внутренней изоляции (4 часа)

Внутренняя изоляция электроустановок, ее общие характеристики, основные виды и принципы использования. Зависимость электрической прочности изоляции от длительности воздействия напряжения. Кратковременная и длительная электрическая прочность изоляции. Закономерности старения изоляции, характеристики частичных разрядов. Самовосстанавливающаяся и несамовосстанавливающаяся изоляция. Краткая характеристика пробоев жидких и твердых диэлектриков.

Тема 6. Основные виды внутренней изоляции и повышение ее электрической прочности (10 часов)

Комбинирование диэлектрических материалов во внутренней изоляции. Маслосбарьерная изоляция. Роль барьеров в повышении электрической прочности изоляции. Твердая изоляция. Бумажно-масляная изоляция. Вакуумная изоляция. Элегазовая изоляция. Газовая изоляция. Регулирование электрических полей во внутренней изоляции с помощью барьеров, градирование изоляции, Применение конденсаторных обкладок и полупроводниковых покрытий. Допустимые напряжения на внутренней изоляции.

Тема 7. Изоляция устройств высокого напряжения (10 часов)

Изоляция кабельных линий высокого напряжения. Общие принципы выполнения и конструкции кабельной изоляции. Кабели с вязкой пропиткой. Маслонаполненные кабели. Газонаполненные и газоизолированные кабели, кабели с элегазовой изоляцией. Кабели с пластмассовой изоляцией. Кабельные муфты. Испытания изоляции кабелей. Изоляция силовых трансформаторов. Классификация и особенности изоляции. Конструкция изоляции трансформаторов. Изоляция электрооборудования

распределительных устройств. Изоляция трансформаторов тока, ее конструкция, испытания. Изоляция выключателей (масляных, воздушных, элегазовых, вакуумных), ее испытания. Изоляция герметизированных распределительных устройств (на основе элегаза). Конструкция ячеек ГРУ, КРУЭ, их монтаж и эксплуатация. Изоляция вводов высокого напряжения, конструктивные особенности и профилактические испытания. Изоляция силовых конденсаторов, ее конструкция, испытания. Изоляция электрических машин высокого напряжения, ее конструкция и испытания. Волновые процессы в обмотках электрических машин.

Тема 8. Изоляция воздушных линий электропередачи. (4 часа).

Разрядные напряжения воздушных промежутков, характерных для линий электропередачи. Выбор линейной изоляции. Статистический метод выбора изоляции для нестандартных ВЛ. Методика выбора длины воздушного промежутка. Выбор промежутка провоз-земля или провод-транспорт. Экологическое влияние ВЛ и РУ подстанций и станций.

Лабораторные занятия

Целью проведения лабораторных работ является изучение вопросов, связанных с работой изоляции высоковольтных электроустановок и освоения на практике правил безопасности проведения работ на высоковольтных линиях электропередачи, в распределительных устройствах станций и подстанций.

№ п/п	Наименование лабораторных работ	к-во час.
1	Изучение конструкции, условий применения аппарата АИИ-70 и правил безопасности в зале ТВН	2
2	Исследование электрической прочности воздушных промежутков в переменном и постоянном магнитном поле	2
3	Исследование электрических разрядов по поверхности твердых диэлектриков	2
4	Исследование вольт-секундных характеристик изоляционных конструкций. Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции.	2
5	Изучение конструкций изоляторов	2
6	Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов	2
7	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь	2
8	Определение электрической прочности жидких диэлектриков	2
Итого		16

ИНДИВИДУАЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТА

Включает изучение лекционного материала при подготовке к защите лабораторных работ, самостоятельную работу с рекомендуемой литературой и журналами научно-технического направления.

Раздел «Изоляция» - экзамен, 7 семестр
Вопросы к экзамену.

- 1 Электрофизические процессы в газах.
- 2 Движение заряженных частиц в газе.
- 3 Основные свойства термической плазмы.
- 4 Разновидности разрядов в газах.
- 5 Канальная форма разряда.
- 6 коронный разряд.
- 7 Импульсная корона.
- 8 Ионизация и рекомбинация частиц в газах.
- 9 Лавина электронов и условие самостоятельности разряда.
- 10 Электропроводимость диэлектриков.
- 11 Поляризация диэлектриков. Диэлектрические потери.
- 12 Атмосферный воздух как диэлектрик.
- 13 Назначение изоляторов, их цели и конструкция.
- 14 Испытание внешней изоляции.
- 15 Развитие разряда и пробивные напряжения промежутков с однородным электрическим полем.
- 16 Развитие разряда, начальные и пробивные напряжения промежутков с неоднородным электрическим полем.
- 17 Вольт-секундная характеристика воздушных промежутков. Время разряда.
- 18 Разряд в длинных воздушных промежутках.
- 19 Влияние конструкции изоляторов на напряжение перекрытия.
- 20 Развитие разряда и напряжение перекрытия изоляторов при неблагоприятных погодных условиях.
- 21 Учет атмосферных условий при определении разрядных и испытательных напряжений.
- 22 Регулирование эл. полей во внешней изоляции электроустановок.
- 23 Внутренняя изоляция: понятие и общие свойства.
- 24 Зависимость эл. прочности внутренней изоляции от длительности воздействия напряжения.
- 25 Самовосстанавливающаяся и не самовосстанавливающаяся изоляция. Влияние на неё механических тепловых и др. воздействий.
- 26 Пробой жидких диэлектриков.
- 27 Пробой твёрдых диэлектриков. Разряд по поверхности твердого диэлектрика.
- 28 Маслосодержащая изоляция.
- 29 Твердая изоляция.
- 30 Бумажно-масляная изоляция.
- 31 Газовая и вакуумная изоляция. Элегазовая изоляция
- 32 Градирование изоляции.
- 33 Применение конденсаторных обкладок и полупроводниковых покрытий.

- 34 Допустимые напряжения на внутренней изоляции, факторы, влияющие на кратковременную эл. прочность внутренней изоляции.
- 35 Изоляция ВЛ на опорах.
- 36 Изоляционные расстояния в пролетах ВЛ.
- 37 Выбор линейной изоляции.
- 38 Изоляционные конструкции ОРУ.
- 39 Изоляционные промежутки в ОРУ.
- 40 Выбор наружной изоляции РУ подстанции.
- 41 Изоляционные конструкции с газовой изоляцией.
- 42 Экологическое влияние ВЛ и РУ.
- 43 Основные конструкции кабелей высокого напряжения.
- 44 Кабельные муфты. Испытание изоляции кабелей.
- 45 Классификация и особенности изоляции силовых трансформаторов. Конструкция изоляции трансформаторов.
- 46 Испытания изоляции трансформаторов.
- 47 Изоляция ТТ.
- 48 Изоляция масляных и воздушных выключателей.
- 49 Изоляция вакуумных выключателей.
- 50 Изоляция элегазовых выключателей.
- 51 Изоляция герметизированных РУ, КРУЭ.
- 52 Изоляция вводов ВН.
- 53 Изоляция силовых конденсаторов.
- 54 Изоляция электрических машин высокого напряжения.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Рекомендуемая литература:

Основная литература

1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / И.М.Богатенков, Ю.Н.Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М.Иманов и др.; под ред. Г.С.Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат, 2003.– 608 с.
2. Калявин В.П. , Рыбаков Л.М. Надежность и диагностика электроустановок. / Йошкар-Ола: Изд-во Мар гос. уч-та- 2000. - 348 с.
3. Высоковольтные электротехнологии / под ред. И.П.Верещагина - М.: Изд-во МЭИ, 2000.- 204с.
4. Основы современной энергетики: Уч-ник для вузов ч. 2 Современная электроэнергетика / под ред. А.П. Бурмана и В.А. Строева. – М. Изд-во МЭИ, 2004. – 462 с.
5. Электрические аппараты высокого напряжения/ под ред. Г.Н. Александрова. Изд-во СПб ГТУ, 2000. -503 с.
6. Высоковольтные электротехнологии / под ред. И.П. Верещагина. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 204 с.

Дополнительная литература.

1. Физико-математические основы техники и электрофизики высоких напряжений. Учебное пособие для вузов. / под ред. К.П. Кадомской. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
2. Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г. Разряд в воздухе вдоль загрязнений и увлажнение поверхности изолятора. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 31 с.
3. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 367 с.
4. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. и др. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. / под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
5. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 126 с.
6. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 367 с.
7. Техника высоких напряжений. / под ред. Д.В. Разевича. – М.: Энергия, 1976. – 426 с.
8. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техника высоких напряжений. – Минск, В.школа, 1982. – 367 с.
9. Техника высоких напряжений. Теоретические и практические основы применения. / М.Б. Бейер, В.Бек, К. Меллер, В. Цэнгль. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
10. Александров Г.Н., Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – М.: энергоатомиздат, 1989. – 308 с.
11. Яманов С.А., Яманова Л.В. Стойкость и надежность электрической изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
12. Лабораторные работы по ТВН / Аронов М.А. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 352 с.
13. Справочник по электротехническим установкам высокого напряжения. / под ред. И.А. Баумштейна, М.В.Хомякова. – М.: Энергия, 1981. – 568 с.
14. Электрические изоляторы. / под ред. Н.С. Костюкова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
15. Электротехнический справочник ЗТ ТЗ. Производство и распределение электрической энергии. / под ред. проф. МЭИ.: А.И. Попов (гл. ред.). – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 964 с.
16. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
17. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1988.–126 с.
18. Хаушильд В., Мош В., Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений / пер. с нем.. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 312 с.
19. Лабораторный практикум по ТВН. Изоляция и перенапряжения / под ред. Н.В.Савиной. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006. – (электронное пособие).

1.5. Периодические издания (профессиональные журналы)

1. Энергетик
2. Промышленная энергетика.
3. Электрика
4. Вестник МЭИ
5. Известия вузов «Энергетика»
6. Новости электротехники
7. Электричество
8. Электрические станции
9. Известия РАЦ
10. Энергетика

Учебно-методическая (технологическая) карта дисциплины.

очная форма обучения

Таблица 5

Номер лекции	Номер темы	Наименование вопросов, изучаемых на лекции	Занятия (номера)		Используемые наглядные и метод. пособия	Самостоятельная работа студента		Формы контроля
			практ.	лаборат.		содержание	часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1, 2	1	Введение. основные понятия и определения		1	Слайды с изоляционными материалами	Материалы по теме, по лабораторной работе	2	Блиц-опрос, входит контроль защита лаб.работ
3, 4	2	Общая характеристика внешней изоляции		2	Слайды с изоляционными материалами	-#-	3	Блиц-опрос, входит контроль защита лаб.работ
5, 6, 7	3	Разряды в воздушных промежутках		3	Слайды с характеристиками разрядов, вольтсекундными характеристиками	-#-	4	Блиц-опрос, входит контроль защита лаб.работ
8, 9, 10	4	Разряды в воздухе вдоль поверхности изоляторов		4, 5	Слайды с разрядами вдоль поверхности изоляторов, с коротким разрядом, с регулированием эл.полей	-#- Лабораторная работа	5	Коллоквиум. Блиц-опрос. Защита лабораторной работы
1	2	3	4	5	6	7	8	9
11, 12	5	Общие свойства внутренней изоляции			Слайды с характеристиками внутренней	Материалы по теме	2	Блиц-опрос

13, 14, 15, 16, 17	6	Основные виды внутренней изоляции и повышение ее электрической прочности		6	изоляции Слайды с видами внутренней изоляции	Материалы по теме, по лабораторной работе	6	Блиц-опрос. Защита лабораторной работы
18, 19, 20, 21, 22	7	Изоляция устройств высокого напряжения		7	Слайды с конструкцией изоляции устройств высокого напряжения	-#-	6	Коллоквиум. Блиц-опрос Защита лабораторной работы
23, 24	8	Изоляция воздушных линий электропередачи		8	Слайды с линейной изоляцией, с методикой ее выбора	-#-	3	Блиц-опрос Защита лабораторной работы

заочная форма обучения

Номер лекции	Номер темы	Наименование вопросов, изучаемых на лекции	Занятия (номера)		Используемые наглядные и метод. пособия	Самостоятельная работа студента		Формы контроля
			практ.	лаборат.		содержание	часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1, 2	1	Введение. основные понятия и определения		1	Слайды с изоляционными материалами	Материалы по теме, по лабораторной работе	2	Блиц-опрос, входит контроль защита лаб. работ
2		Общая характеристика			Слайды с			Блиц-опрос, входит

	2	внешней изоляции		2	изоляционными материалами	-#-	3	контроль защита лаб.работ
3,4	3	Разряды в воздушных промежутках		3	Слайды с характеристиками разрядов, вольтсекундными характеристиками	-#-	4	Блиц-опрос, входит контроль защита лаб.работ
5,6	4	Разряды в воздухе вдоль поверхности изоляторов		4, 5	Слайды с разрядами вдоль поверхности изоляторов, с коротким разрядом, с регулированием эл.полей	Лабораторная работа -#-	5	Коллоквиум. Блиц-опрос. Защита лабораторной работы
7,8	5	Общие свойства внутренней изоляции			Слайды с характеристиками внутренней изоляции	Материалы по теме	2	Блиц-опрос
9,10,11	6	Основные виды внутренней изоляции и повышение ее электрической прочности		6	Слайды с видами внутренней изоляции	Материалы по теме, по лабораторной работе	6	Блиц-опрос. Защита лабораторной работы
12,13,14,15,16	7	Изоляция устройств высокого напряжения		7	Слайды с конструкцией изоляции устройств высокого напряжения	-#-	6	Коллоквиум. Блиц-опрос Защита лабораторной работы
17,18	8	Изоляция воздушных линий электропередачи		8	Слайды с линейной изоляцией, с методикой ее выбора	-#-	3	Блиц-опрос Защита лабораторной работы

2.1.3 График самостоятельной работы студентов по дисциплине

очная форма обучения

№	Содержание	Объем в часах	Формы контроля	Сроки
1	Изучение конструкции, условий применения аппарата АИИ-70 и правил безопасности в зале ТВН		Выполнение лабр раб. №1, контрольная точка (октябрь)	1-2 неделя
2	Исследование электрической прочности воздушных промежутков в переменном и постоянном магнитном поле		Выполнение лабр раб. №2, контрольная точка (октябрь)	3-5 неделя
3	Исследование электрических разрядов по поверхности твердых диэлектриков		Выполнение лабр раб. №2, контрольная точка (октябрь)	5-7 неделя
4	Исследование вольт-секундных характеристик изоляционных конструкций. Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции.		Выполнение лабр раб. №4, контрольная точка (ноябрь)	9-11 неделя
5	Изучение конструкций изоляторов		Выполнение лабр раб. №4, контрольная точка (ноябрь)	11-13 неделя
6	Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов		Выполнение лабр раб. №4, контрольная точка (ноябрь)	14-16
7	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь		Выполнение лабр раб. №5, контрольная точка (декабрь)	16-17

8	Определение электрической прочности жидких диэлектриков		Выполнение лабр раб. №5, контрольная точка (декабрь)	18
---	---	--	--	----

2.1.4 Методические рекомендации по проведению семинарских и практических занятий

В рабочей программе не предусмотрено проведение семинарских и практических занятий

2.1.5 Методические рекомендации по проведению лабораторных работ

Лабораторные занятия предусмотрены в рабочей программе в объеме 18 часов. Тематика лабораторных занятий представлена в таблице.

№ п/п	Наименование лабораторных работ	к-во час.
1	Изучение конструкции, условий применения аппарата АИИ-70 и правил безопасности в зале ТВН	2
2	Исследование электрической прочности воздушных промежутков в переменном и постоянном магнитном поле	2
3	Исследование электрических разрядов по поверхности твердых диэлектриков	2
4	Исследование вольт-секундных характеристик изоляционных конструкций. Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции.	2
5	Изучение конструкций изоляторов	2
6	Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов	2
7	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь	2
8	Определение электрической прочности жидких диэлектриков	2
Итого		16

При проведении лабораторных работ необходимо придерживаться следующего плана:

1) При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать технику безопасности, предусмотренную правилами поведения в зале Высоких напряжений

- 2) Перед выполнением работы студенты сдают краткую теорию по выполняемой лабораторной работе.
- 3) Выполнение экспериментальной части лабораторной работы.
- 4) Обработка полученных результатов
- 5) Выводы по проделанной работе.
- 6) Защита полученных результатов.
- 7) Окончательное оформление отчетов.

При подготовке к лабораторным работам рекомендуется пользоваться следующим списком литературы

а) основная литература

1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / И.М.Богатенков, Ю.Н.Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М.Иманов и др.; под ред. Г.С.Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат, 2003.– 608 с.
2. Калявин В.П. , Рыбаков Л.М. Надежность и диагностика электроустановок. / Йошкар-Ола: Изд-во Мар гос. уч-та- 2000. - 348 с.
3. Высоковольтные электротехнологии / под ред. И.П.Верещагина - М.: Изд-во МЭИ, 2000.- 204с.
4. Основы современной энергетики: Уч-ник для вузов ч. 2 Современная электроэнергетика / под ред. А.П. Бурмана и В.А. Строева. – М. Изд-во МЭИ, 2004. – 462 с.
5. Электрические аппараты высокого напряжения/ под ред. Г.Н. Александрова. Изд-во СПб ГТУ, 2000. -503 с.
6. Высоковольтные электротехнологии / под ред. И.П. Верещагина. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 204 с.

б) дополнительная литература.

20. Физико-математические основы техники и электрофизики высоких напряжений. Учебное пособие для вузов. / под ред. К.П. Кадомской. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
21. Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г. Разряд в воздухе вдоль загрязнений и увлажнение поверхности изолятора. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 31 с.
22. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 367 с.
23. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. и др. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. / под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
24. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 126 с.
25. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 367 с.

26. Техника высоких напряжений. / под ред. Д.В. Разевича. – М.: Энергия, 1976. – 426 с.
27. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техника высоких напряжений. – Минск, В.школа, 1982. – 367 с.
28. Техника высоких напряжений. Теоретические и практические основы применения. / М.Б. Бейер, В.Бек, К. Меллер, В. Цэнгль. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
29. Александров Г.Н., Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – М.: энергоатомиздат, 1989. – 308 с.
30. Яманов С.А., Яманова Л.В. Стойкость и надежность электрической изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
31. Лабораторные работы по ТВН / Аронов М.А. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 352 с.
32. Справочник по электротехническим установкам высокого напряжения. / под ред. И.А. Баумштейна, М.В.Хомякова. – М.: Энергия, 1981. – 568 с.
33. Электрические изоляторы. / под ред. Н.С. Костюкова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
34. Электротехнический справочник ЗТ ТЗ. Производство и распределение электрической энергии. / под ред. проф. МЭИ.: А.И. Попов (гл. ред.). – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 964 с.
35. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
36. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1988.–126 с.
37. Хаушильд В., Мош В., Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений / пер. с нем.. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 312 с.
38. Лабораторный практикум по ТВН. Изоляция и перенапряжения / под ред. Н.В.Савиной. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006. – (электронное пособие).

в) периодические издания (профессиональные журналы)

11. Энергетик
12. Промышленная энергетика.
13. Электрика
14. Вестник МЭИ
15. Известия вузов «Энергетика»
16. Новости электротехники
17. Электричество
18. Электрические станции
19. Известия РАЦ
20. Энергетика

2.1.6 Краткий конспект лекций

Тема 1. Введение. Основные понятия и определения. (4 часа).

ТВН – это наука о характеристиках вещества и процессах происходящих в нем при экстремальных электромагнитных воздействиях (высоких напряжений и сильных токах), а также о технологическом использовании этих процессов. В развитии электроэнергетики важное место занимает применение ВН при передачи электроэнергии на большие расстояния. Учитывая возросшую мощность ТЭЦ, ГРЭС, ГЭС и АЭС, а также большую протяженность электрических сетей необходимо повышать надежность передачи электроэнергии. Например при передаче электроэнергии по линии напряжением 35кВ можно передать мощность 8-10 МВт на расстояние 30-40 км, для передачи 200-250 МВт на расстояние 200-250 км потребуется линия 220 кВ. Благодаря тому, что пропускная способность пропорциональна квадрату напряжения, а стоимость линий пропорциональна повышению напряжения, то это приводит снижению стоимости одного кВт/час. Повышение напряжения требует более высокой электрической прочности изоляции электрооборудования.

Изоляция разделяется на внешнюю (воздух и все, что находится в воздухе) и внутреннюю (эта изоляция отделена от окружающей среды корпусами и может быть газообразной, жидкой, твердой, комбинированной).

Под влиянием больших напряжений электрического поля, которые могут возникать в процессе эксплуатации, возможна частичная или полная потеря изоляцией ее диэлектрических свойств – пробой изоляции.

В эксплуатации изоляция подвергается воздействию не только рабочего напряжения но и перенапряжений, возникающих в результате грозовых поражений воздушных линий электропередачи (атмосферные перенапряжения) и при изменениях режимов работы электроустановок (внутренние перенапряжения). Перенапряжения связаны с появлением в электроустановках потенциалов и разностей потенциалов, значительно превышающих их номинальные значения. Перенапряжение - всякое повышение напряжения в электрической сети больше максимального рабочего $U_{p.макс} = U_n + (0,2 \div 0,05) U_n$ в зависимости от класса напряжения.

При перенапряжениях создаются тяжелые условия для работы изоляции, т.к. они могут во много раз превышать $U_{p.макс}$. Перенапряжения подразделяются на:

1. внешние (грозовые);
2. внутренние (переходные процессы в электрических сетях).

На схеме приведена классификация перенапряжений. Необходимо знать следующие характеристики перенапряжений

1. Максимальное значение амплитуды напряжения при перенапряжении $U_{p.макс}$ или кратность перенапряжений

$$K_T = \frac{U_{i\delta\epsilon\eta}}{U_{\delta.i\delta\epsilon\eta}}$$

2. Длительность воздействия перенапряжения.



3. Форму кривой перенапряжений (апериодическая, колебательная, высокочастотная и др.)

4. Широту охвата элементов электрической цепи.

Все перечисленные характеристики имеют стохастическую природу и имеют значительный статистический разброс, который обязательно учитывается при расчетах. Для изоляции высоковольтных устройств низких классов напряжения ($U < 220$ кВ) наиболее опасными являются грозовые перенапряжения. Их изоляция выдерживает коммутационные перенапряжения любой кратности.

Для изоляции высоковольтных устройств высоких и сверхвысоких классов напряжения ($U > 330$ кВ) наиболее опасными являются коммутационные перенапряжения.

Поэтому на низких классах напряжения ограничивают специальными устройствами только грозовые перенапряжения, а на высоких классах принудительно ограничивают и внутренние перенапряжения.

Тема 2. Общая характеристика внешней изоляции (4 часа).

Высоковольтная изоляция подразделяется на внутреннюю и внешнюю. Внешняя находится в контакте с атмосферой, внутренняя — внутри герметичного объема. Различается также изоляция для наружной и внутренней установки (наружная — вне помещений, внутренняя — отделена от внешних воздействий). Высоковольтная изоляция подразделяется на внутреннюю и внешнюю. Внешняя находится в контакте с атмосферой,

внутренняя — внутри герметичного объема. Различается также изоляция для наружной и внутренней установки (наружная — вне помещений, внутренняя — отделена от внешних воздействий).

Различают кратковременное пробивное напряжение $U_{пр}$ и длительное $U_{раб}$ - На изоляцию воздействуют грозовые и коммутационные импульсы, испытательные напряжения, а $U_{раб}$ должно воздействовать длительное время (20-30 лет) без пробоев.

При длительном воздействии $U_{раб}$ происходит старение изоляции.

Причины старения:

- 1) электрические — частичные разряды, трекинг, изменение γ , $\text{tg}\delta$;
- 2) тепловые — ускорение химических реакций, увеличение $\text{tg}\delta$, уменьшение ρ ;
- 3) механические — трещины, усталость, разрушение;
- 4) химические — окисление, образование радикалов и т. п.;
- 5) внешняя среда — влага, ультрафиолетовое лучи, температура.

По назначению изоляторы подразделяется на линейные и станционно-аппаратные, которые, в свою очередь, делятся на опорные и проходные.

Линейные изоляторы применяются для крепления и изолирования проводов и тросов воздушных линий электропередачи. По конструктивному исполнению они делятся на штыревые и подвесные.

Штыревые изоляторы изготавливаются из электротехнического фарфора или стекла и монтируются на опорах с помощью штырей или крюков. Выпускаются различного конструктивного исполнения. Обозначение, например, ШФ10-В — штыревой, фарфоровый, номинальное напряжение 10 кВ, конструктивное исполнение В (всего существует три варианта конструктивного исполнения — А, Б, В). Выпускаются промышленностью на напряжение до 35 кВ.

Подвесные изоляторы применяются для напряжений больше 35 кВ. Подразделяются на тарельчатые (шарнирные) и стержневые. Изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла и полимерных материалов. На рис. 2.1 приведена конструкция подвесного тарельчатого изолятора.

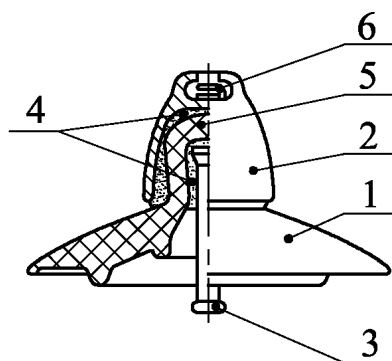


Рис. 2.1. Подвесной шарнирный изолятор с конусной головкой: 1 — тарелка изолятора; 2 — чугунная шапка; 3 — стальной стержень; 4 — цементная замазка; 5 — головка изолятора; б — замок

Шапка 2 и стержень 3 обеспечивают шарнирное соединение одного изолятора с другим при сборке в гирлянду изоляторов. Изоляторы испытывают только растягивающие усилия, но благодаря конструктивному исполнению головка 5 изолятора работает на сжатие и поэтому выдерживает очень большие механические нагрузки (до 30-50 Тс). Обозначение изолятора, например, ПСГ6-А — подвесной, стеклянный, грязестойкий. Минимальная разрушающая нагрузка 6 тонн-сила.

Подвесные стержневые изоляторы изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла, ситалла, стекловолокна с полимерным покрытием. Один изолятор может заменить гирлянду из 7 тарельчатых изоляторов на напряжение ПOkВ. Шарнирно крепится при помощи двух шапок с замками на концах изолятора. Достоинством стержневых изоляторов является непробиваемость, кроме того, за счет малого диаметра изолятора повышаются градиенты электрического поля по поверхностному перекрытию. Обозначение изолятора, например, СФ-110/2,25 — стержневой, фарфоровый, номинальное напряжение ПО кВ, минимальная разрушающая нагрузка 2,25 тонн-сила.

Опорные изоляторы предназначены для крепления шинопроводов, деталей аппаратов и изолирования их от заземленных конструкций и между собой. Изготавливают для наружной и внутренней установки на напряжение до 110 кВ. На большее напряжение опорные изоляторы собирают в колонны. Опорные изоляторы для наружной установки делятся на штыревые и стержневые. Штыревые изоляторы используются в тех случаях, когда требуется большая механическая прочность на изгиб. Изготавливаются из электротехнического фарфора. Обозначение, например, ОНШ-35-2000 — опорный, наружной установки, штыревой, номинальное напряжение 35 кВ, минимальная разрушающая нагрузка 2000 кГ-сила.

Опорно-стержневые изоляторы изготавливаются на напряжение 35-150 кВ из электротехнического фарфора. Концы изолятора армированы чугунными фланцами. Обозначение, например, ОНС-110-1000 — опорный, наружной установки, стержневой, номинальное напряжение 110 кВ, минимальная механическая прочность 1000 кГ-сила.

Проходные изоляторы и вводы используются там, где токоведущие части проходят через стены, перекрытия зданий, ограждения электроустановок или вводятся внутрь металлических корпусов оборудования. Проходными изоляторами называют изоляторы на напряжение до 35 кВ, на напряжение 110 кВ и выше — вводы. Вводы имеют более сложную конструкцию изоляции и выполняются с маслосольной изоляцией (до 150 кВ) или с бумажно-масляной изоляцией (220 кВ и выше).

Прходные изоляторы на высокие напряжения до 35 кВ включительно изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла, бакелитовой бумаги. На рис. 2.2 приведена конструктивная схема проходного изолятора.

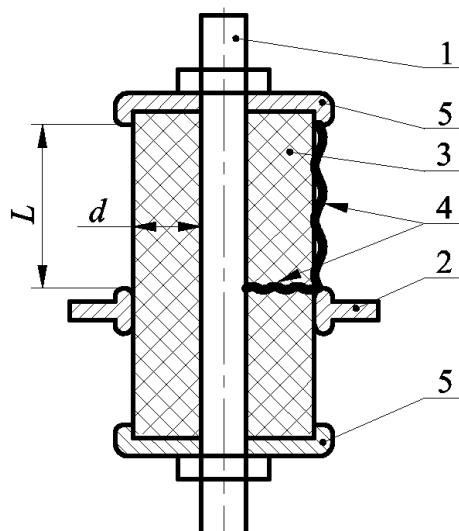


Рис. 2.2. Конструктивная схема проходного изолятора: 1 — ток-ведущий стержень (труба); 2 — заземленный фланец; 3 — твердая изоляция; 4 — пути пробоя ($U_{пр} > U_{пер}$); 5 — высоковольтные фланцы

Для увеличения напряжения перекрытия $U_{пер}$ на наружной поверхности изолятора делают ребра, а также увеличивают диаметр изолятора у заземленного фланца. Прходные изоляторы маркируются по напряжению, току и изгибающей механической нагрузке. Например, П-10 / 400 - 750, что означает: проходной изолятор, $U_n = 10$ кВ, $I_n = 400$ А, $P_{изг} = 750$ кГс.

Тема 3. Разряды в воздушных промежутках (6 часа)

Воздух до сих пор остается основным видом внешней изоляции линий электропередачи, энергетического оборудования и высоковольтной техники. Традиционный путь создания изоляционных конструкций, включающий их полномасштабные натурные испытания еще на поисковом этапе работы, с увеличением номинальных напряжений становятся все менее перспективным. Техника испытаний становится трудоемкой и требует все больше временных и материальных затрат. В связи с этим возникает потребность в численных оценках электрической прочности воздушных промежутков на основе расчетных моделей, достоверно отражающих закономерности развития разряда в воздухе.

1.1. Конфигурация электрических полей

Диэлектрики служат для изоляции токоведущих электродов разной полярности друг от друга. Изолируемые электроды (шины распределительных устройств, провода линий электропередач, наружные

токоведущие части электрических аппаратов и т. п.) создают электрические поля различной конфигурации.

От формы электрического поля зависит электрическая прочность и пробивное напряжение. Формы электрических полей подразделяются на однородные, слабонеоднородные и резконеоднородные. Типичными примерами однородного поля является поле между двумя плоскопараллельными электродами и электродами Роговского, слабонеоднородное поле реализуется в системе электродов шар-шар (рис. 1.1) при расстоянии между электродами S меньше диаметра шара D ($S < D$), резконеоднородное поле — при электродах стержень-плоскость или стержень-стержень. Степень неоднородности электрического поля между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности K_H , который равен отношению максимальной напряженности электрического поля E_{\max} к средней напряженности $E_{\text{ср}}$ между электродами, т. е.

$$K_H = \frac{A_{\text{идн}}}{A_{\text{н\ddot{o}}}}$$

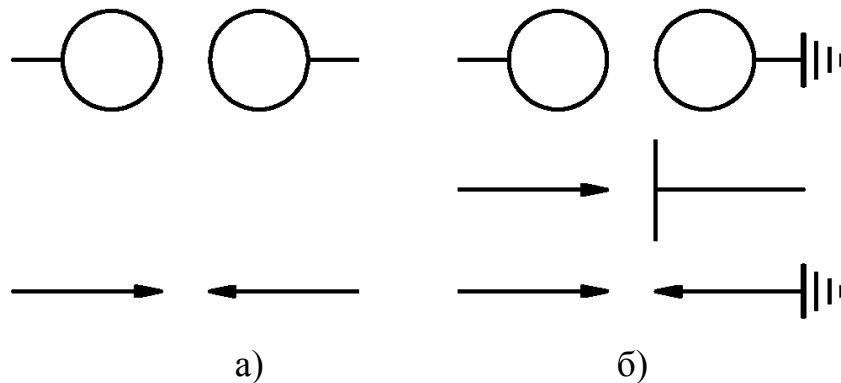


Рис. 1.1. Формы электрических полей: а — симметричная система электродов; б — несимметричная система электродов

Средняя напряженность есть отношение напряжения, приложенного к электродам, U , к расстоянию между электродами, S ,

$$A_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{U}{S}$$

Максимальная напряженность зависит от приложенного к электродам напряжения, конфигурации, размеров электродов и расстояния между ними. Например, для коаксиальных цилиндров (кабель) (рис. 1.2) максимальная напряженность определяется, как

$$A_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (13)$$

а средняя напряженность

$$A_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{U}{R - r} \quad (1-4)$$

где

U — приложенное напряжение, кВ;

r — внешний радиус внутреннего цилиндра (жила кабеля), см;

R — внутренний радиус наружного цилиндра (оплетка кабеля), см.

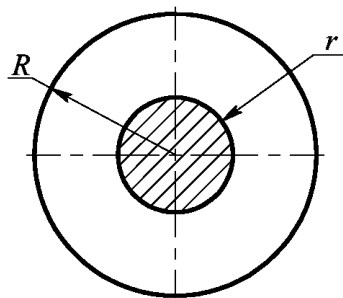


Рис. 1.2. Схема коаксиальных электродов

Подставив (1.3) и (1.4) в (1.1), получим:

$$K_i = \frac{R - r}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (1-5)$$

т. е. K_H зависит от геометрических размеров электродов.

Для однородного поля коэффициент неоднородности $K_H = 1$, для слабонеоднородного — $K_H < 3$, для резконеоднородного — $K_H > 3$.

Кроме этого различают симметричную и несимметричную систему электродов. Симметричная форма — электроды имеют одинаковую форму и размеры и отсутствует заземление какого-либо из них (рис. 1.1, а). Несимметричная форма — электроды имеют отличающуюся конфигурацию, размеры или один из них заземлен (рис. 1.1, б). Пробивные напряжения в несимметричной системе электродов ниже, чем в симметричной.

В отсутствие внешнего электрического поля частицы газа находятся в состоянии хаотического (теплового) движения, постоянно сталкиваясь с другими частицами. Если на единице длины пути частица испытала Z столкновений, то средняя длина ее свободного пробега λ равна:

$$\lambda = \frac{1}{Z} \quad (1.6)$$

Значение λ зависит от концентрации частиц и, следовательно, от давления и температуры газа. С увеличением давления и уменьшением температуры λ уменьшается. Частицы газа при тепловом движении перемещаются беспорядочно. Наличие внешнего электрического поля приводит к возникновению направленного движения заряженных частиц, если таковые имеются, т. е. к появлению в газе электрического тока. Подвижность частицы в электрическом поле зависит от ее массы: чем больше масса частицы, тем меньше ее подвижность.

При рассмотрении процессов возникновения и исчезновения заряженных частиц в газе можно считать электроны частицами и не учитывать их волновые свойства. Когда электроны находятся на наименьших стационарных орбитах, то потенциальная энергия атома минимальна. Такое состояние атома является устойчивым и называется нормальным. Переход одного или нескольких электронов с нормальных орбит на более удаленные от ядра называется возбуждением атома. Энергию, необходимую для возбуждения, атом (молекула) может получить при столкновении с другой частицей или при поглощении коротковолнового излучения (фотовозбуждение). Время пребывания атома в возбужденном состоянии составляет $\sim 10^{-10}$ с. Возвращение атома в нормальное состояние происходит самопроизвольно и сопровождается излучением фотона.

Когда электрон удаляется от ядра настолько, что взаимодействие его с ядром практически исчезает, то электрон становится свободным. Происходит ионизация атома, в результате которой образуются две независимые частицы: электрон и положительный ион. Энергия, поглощенная атомом, называется энергией ионизации. Энергия возбуждения и ионизации выражается в электронвольтах (эВ). Минимальные энергии возбуждения и ионизации некоторых содержащихся в воздухе газов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 Энергии возбуждения и ионизации газов

Газ	Минимальная энергия, эВ	
	возбуждения	ионизации
N ₂	6,1	15,5
N	6,3	14,5
O	7,9	12,5
O ₂	9,1	13,6
H ₂ O	7,6	12,7

Одновременно с ионизацией атомов и молекул газа происходит процесс взаимной нейтрализации заряженных частиц — рекомбинация. Вследствие действия двух противоположных факторов — ионизация и рекомбинация — устанавливается равновесное состояние, при котором в единицу времени возникает и рекомбинирует определенное количество заряженных частиц. Это равновесное состояние характеризуется определенной степенью ионизации газа, т. е. отношением концентрации ионизованных частиц к общей концентрации частиц.

$$K_{\text{ион}} = \frac{n_{\text{ион}}}{N_{\Sigma}} \quad (1.7)$$

где

$K_{\text{ион}}$ - коэффициент степени ионизации газа;

$n_{\text{ион}}$ - концентрация ионизованных частиц;

N_{Σ} - общая концентрация частиц ($N_{\Sigma} \sim 10^{22}$ атомов на см³).

Газ, в котором значительная часть атомов и молекул ионизирована, называется плазмой ($n_{\text{ион}} > 10^{12}$ - 10^{14} ионов на см³).

Концентрация положительных и отрицательных зарядов в плазме примерно одинакова. Плазма — форма существования вещества при температуре примерно 5000 К и выше.

Различают поверхностную и объемную ионизацию. Объемная ионизация — образование заряженных частиц в объеме газа между электродами. Поверхностная ионизация — излучение (эмиссия) частиц с поверхности электрода.

Объемная ионизация разделяется на:

1. ударная ионизация
2. ступенчатая ионизация
3. фотоионизация
4. термоионизация

Ударная ионизация — соударение электрона с нейтральным атомом или молекулой.

Так как скорость электронов значительно больше скорости ионов, то ударная ионизация ионами малоэффективна и определяющей является ударная ионизация электронами.

На рис. 1.3, а приведена схема ударной ионизации электроном. Условием ударной ионизации электроном является:

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} \geq W_{\dot{E}}$$

где

m_1 — масса электрона;

V_1 — скорость электрона;

$W_{\dot{E}}$ — энергия ионизации молекулы (атома).

Ступенчатая ионизация происходит тогда, когда энергия первого воздействующего на нейтральный атом или молекулу электрона приводит атом только в возбужденное состояние, т. е. энергия электрона недостаточна для ионизации. Воздействие второго электрона на возбужденный атом или молекулу приводит к ионизации. Время между воздействием первого и второго электронов должно быть не более времени нахождения нейтрального атома или молекулы в возбужденном состоянии. На рис. 1.3, б, приведена схема ступенчатой ионизации. Условием ступенчатой ионизации является:

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_1 V_3^2}{2} \geq W_{\dot{E}}$$

где

m_1 — масса электрона;

V_1, V_3 — скорости электронов;

$W_{\dot{E}}$ — энергия ионизации молекулы (атома).

Для осуществления фотоионизации в объеме газа энергия фотонов, излучаемая возбужденными атомами или молекулами, должна быть больше энергии ионизации при поглощении фотона нейтральным атомом или молекулой. Этот процесс успешно осуществляется в смеси газов (воздух).

При фотоионизации возможна и ступенчатая ионизация. На рис. 1.3, в, показана схема фотоионизации.

Условием фотоионизации является

$$h\nu \geq W_{\dot{E}}$$

h — постоянная Планка,

ν — собственная частота фотона.

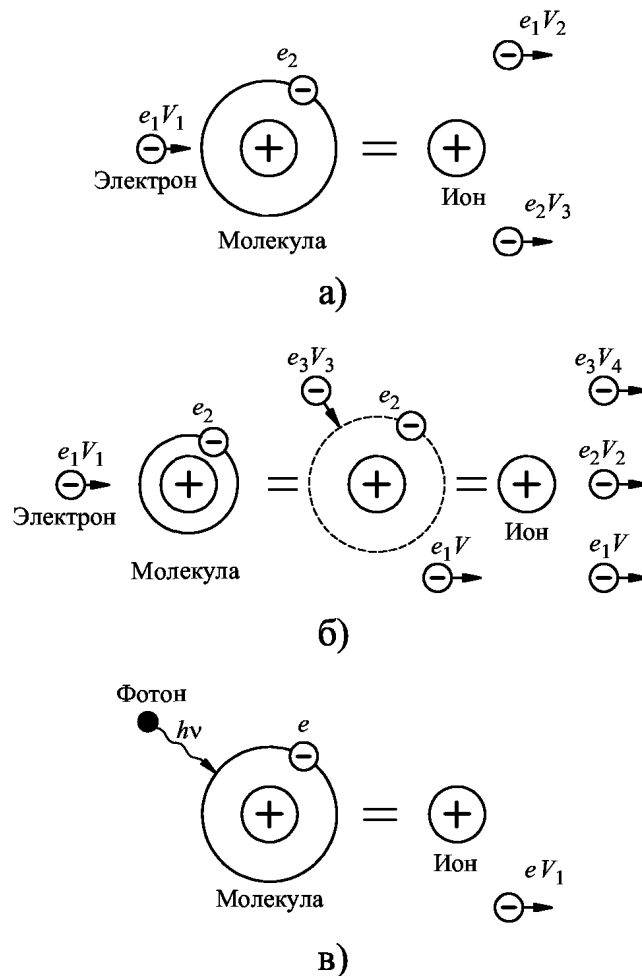


Рис. 1.3. Схемы объемной ионизации газа: а) ударная ионизация, б) ступенчатая ионизация, в) фотоионизация; e — элементарный заряд электрона ($e=1,6 \cdot 10^{19}$ Кл), m — масса заряженной частицы

Термоионизация обусловлена тепловым состоянием газа и может происходить в результате следующих актов:

- 1) освобождение электрона при соударениях между атомами и молекулами при высоких температурах;
- 2) фотоионизация нейтральных атомов и молекул, возбужденных в результате теплового взаимодействия при высоких температурах;

3) ионизация при столкновении электрона с нейтральным атомом или молекулой при высоких температурах.

В газе при тепловом движении происходит диссоциация молекул раньше, чем произойдет ионизация, т. к. энергия диссоциации меньше, чем энергия ионизации. В табл. 1.2 в качестве примера приведены энергия диссоциации и ионизации для некоторых газов.

Энергии диссоциации и ионизации

Молекула	Энергия диссоциации, эВ	Атом	Энергия ионизации, эВ
O ₂	5,17	O	13,6
N ₂	9,77	N	14,5

Поверхностная ионизация (эмиссия электронов) осуществляется за счет:

1) бомбардировки поверхности катода положительными ионами — вторичная электронная эмиссия (схема приведена на рис. 1.4 а); условие для выхода электрона с поверхности:

$$\frac{m_{eii} V_{eii}^2}{2} \geq W_{aio}$$

где

m_{eii} — масса иона;

V_{eii} — скорость иона;

W_{aio} — энергия выхода электрона.

2) лучистой энергии, облучающей катод, — ультрафиолетовый свет, рентген, излучения возбужденных атомов и молекул в объеме газа между электродами — фотоэмиссия (схема приведена на рис. 1.4,б); при этом, условие для выхода электрона с поверхности:

$$h\nu \geq W_{E}$$

где

h — постоянная Планка;

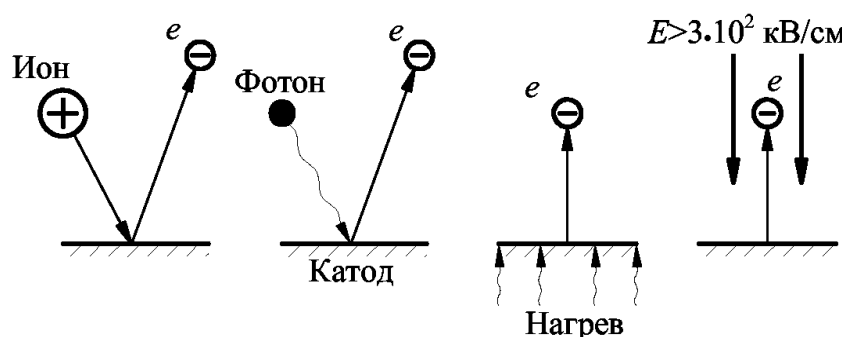
ν — частота излучения фотона;

W_{E} — энергия выхода электрона.

3) нагрева поверхности катода — термоэлектронная эмиссия (схема приведена на рис. 1.4, в);

4) энергии внешнего электрического поля — автоэлектронная или холодная эмиссия (схема приведена на рис. 1.4, г) возможна при напряженности электрического поля более $3 \cdot 10^2$ кВ / см.

Для реализации поверхностной ионизации необходимо, чтобы энергия воздействия была больше энергии выхода электрона из катода W_{aio} . Энергия W_{aio} ниже энергии объемной ионизации газа примерно в 2 раза и более и зависит от воздуха раб



ДОВ В

а) б) в) г)

Рис. 1.4. Схемы поверхностной ионизации: а) ионизация ионом, б) ионизация квантом света, в) термоионизация, г) автоэлектронная ионизация

Если в газе между двумя электродами, образующими однородное поле, появляется свободный электрон, то двигаясь к аноду при достаточной напряженности электрического поля он может ионизировать атом или молекулу газа при столкновении (рис. 1.3, а). В результате этого появляется новый (еще один) электрон и положительный ион. Этот электрон вместе с начальным ионизируют новые атомы и молекулы, и число свободных электронов непрерывно нарастает. Этот процесс получил название лавины электронов.

Интенсивность размножения электронов в лавине характеризуется коэффициентом ударной ионизации α , равным числу ионизации производимых электроном на пути в 1 см по направлению действия электрического поля. Другое название коэффициента ударной ионизации — первый коэффициент Таунсенда.

В процессе развития лавины одновременно с электронами образуются положительные ионы. Подвижность ионов значительно меньше, чем электронов, и за время развития лавины они практически не успевают переместиться в промежутке к катоду. Таким образом, после прохождения лавины электронов в газе остаются положительные, а в электроотрицательных газах и отрицательные ионы, которые искажают (уменьшают или увеличивают) внешнее электрическое поле в промежутке. На рис. 1.5 приведено распределение напряженности электрического поля в промежутке при прохождении его лавиной электронов. Видно, что напряженность электрического поля на фронте лавины возрастает, в средней части, где находятся остающиеся положительные ионы, уменьшается, а вблизи катод:

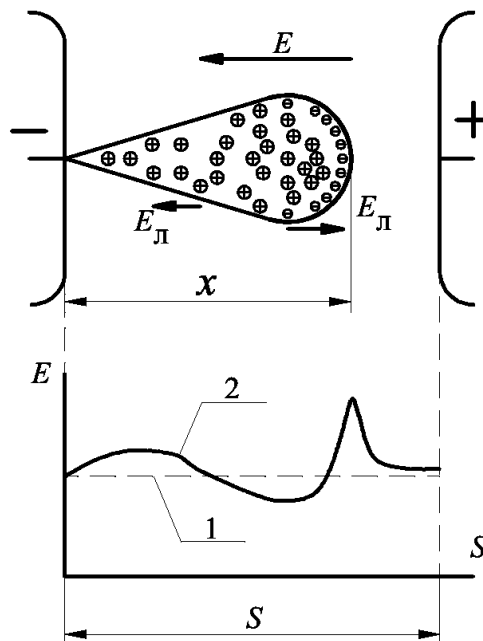


Рис. 1.5. Искажение электрического поля в промежутке, создаваемое лавиной: 1 — средняя напряженность без лавины; 2 — результирующая напряженность

Для описания лавинного процесса необходимо определить число электронов в лавине. Предположим, что из катода за счет внешнего ионизатора вырывается n_0 электронов (например $n_0 = 1$). На расстоянии x от катода число электронов возросло до n (рис. 1.6). Увеличение числа электронов dn на пути dx будет равно:

$$dn = n \cdot a \cdot dx, \quad (1-11)$$

или

$$\frac{dn}{n} = a dx \quad (1.12)$$

Интегрируя (1.12) по n от 1 до n и по x от 0 до x , получим:

$$\int_0^n \frac{dn}{n} = \int_0^x a dx \quad (1.13)$$

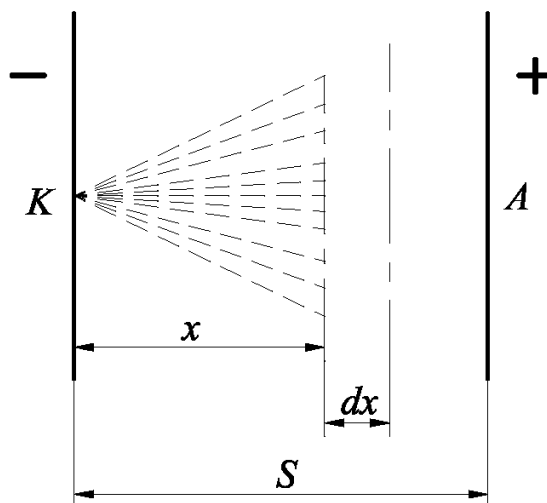


Рис. 1.6. Схема определения числа электронов в лавине

В однородном поле, где коэффициент ударной ионизации $\mathbf{a} = \text{const}$, т. к. напряженность в любой точке промежутка одинакова, будем иметь:

$$\ln n = a \cdot x \quad (1.14)$$

или

$$n = e^{ax}. \quad (1.14a)$$

Выражение (1.14) дает значение электронов в лавине без учета их прилипания к нейтральным атомам и молекулам. Это явление характеризуется коэффициентом прилипания η . Коэффициент прилипания зависит от рода газа (электроотрицательный или электроположительный). Тогда число электронов в лавине с учетом прилипания будет равно:

$$n = e^{(a-\eta)x}. \quad (1.15)$$

Если n_0 больше 1, тогда (1.15) будет иметь вид:

$$n = n_0 e^{(a-\eta)x} \quad (1.16)$$

Число электронов в лавине $n > 10^7$.

Условие самостоятельности разряда

После прохождения первой лавины в промежутке лавинный процесс может возобновляться, а может и затухнуть. Для возобновления лавинного процесса нужен хотя бы один вторичный эффективный электрон. Если этот электрон получается в результате внешнего ионизатора — разряд называется несамостоятельным. То есть, если убрать внешний ионизатор, то лавинный процесс не возобновится и разряд затухнет. Если же вторичный эффективный электрон возникает в результате прохождения первичной лавины — разряд называется самостоятельным. Разряд из несамостоятельного может перейти в самостоятельный, если увеличить приложенное к электродам напряжение.

При самостоятельной форме разряда лавинный процесс возобновляется, поскольку сама первичная лавина (и последующие вторичные тоже) создает условие для возобновления процесса. Условия возобновления:

- 1) оставшееся после прохождения лавины положительные ионы, двигаясь к катоду, бомбардируют его и вызывают эмиссию электронов из катода;
- 2) возбужденные атомы и молекулы, образующиеся наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить как к фотоионизации в объеме промежутка, так и к фотоэмиссии электронов из катода. Образующиеся таким образом вторичные электроны приводят снова к образованию лавин в разрядном промежутке.

Электроны, выбитые из катода, не все участвуют в образовании вторичных лавин. Часть электронов рекомбинирует с положительными ионами. Суммарный процесс образования вторичных электронов из катода характеризуется коэффициентом вторичной ионизации γ — второй коэффициент Таунсенда. Коэффициент γ зависит от материала катода, состава и давления газа и всегда $\gamma \ll 1$.

$$\gamma(e^{(\alpha-\eta)S} - 1) \geq 1$$

Уравнение (1.18) есть условие самостоятельности развития разряда в газовом промежутке. Оно показывает, что в результате прохождения первичной лавины необходимо образование, как минимум, одного **эффективного** электрона, способного зажечь вторичную лавину.

Образование стримера

В процессе развития лавины непрерывно увеличивается число электронов и положительных ионов. С увеличением числа электронов в головке лавины возрастает напряженность на фронте лавины (рис. 1.5). На хвосте лавины напряженность понижена. Электроны в головке лавины останавливаются и могут рекомбинировать с ионами. При рекомбинации излучаются фотоны, которые способны вблизи хвоста первичной лавины ионизовать нейтральные молекулы, образуя вторичные лавины.

Вторичные лавины, следуя по силовым линиям и имея на головке избыточный отрицательный заряд (электроны), втягиваются в область положительного объемного заряда, оставленного первичной лавиной. Электроны вторичных лавин смешиваются с положительными ионами первичной лавины и образуют стример — область с наибольшей плотностью тока, которая, разогреваясь начинает светиться, а наибольшая концентрация частиц (плотность тока) образуется вблизи катода. Для фотоионизации в объеме газа энергия фотонов должна быть больше энергии ионизации. Этот процесс успешно осуществляется в смесях газов содержащих компоненты с относительно низкой энергией ионизации (в том числе и в воздухе). Бомбардировка катода положительными ионами эффективна при низких давлениях газа.

Критерием перехода лавинного разряда в стримерный является критическое число электронов в лавине. Расчеты показывают, что при числе электронов $n_{кр} \gg 10^7 - 10^9$ лавина переходит в стример. Для накопления такого количества электронов лавина должна пройти определенное критическое расстояние $x_{кр}$. Следовательно, с увеличением расстояния между электродами свыше $x_{кр}$ лавина неизбежно перейдет в стримерную форму

развития разряда. Необходимо отметить, что $x_{кр}$ зависит от давления газа и его состава. Картина образования стримера приведена на рис. 1.7.

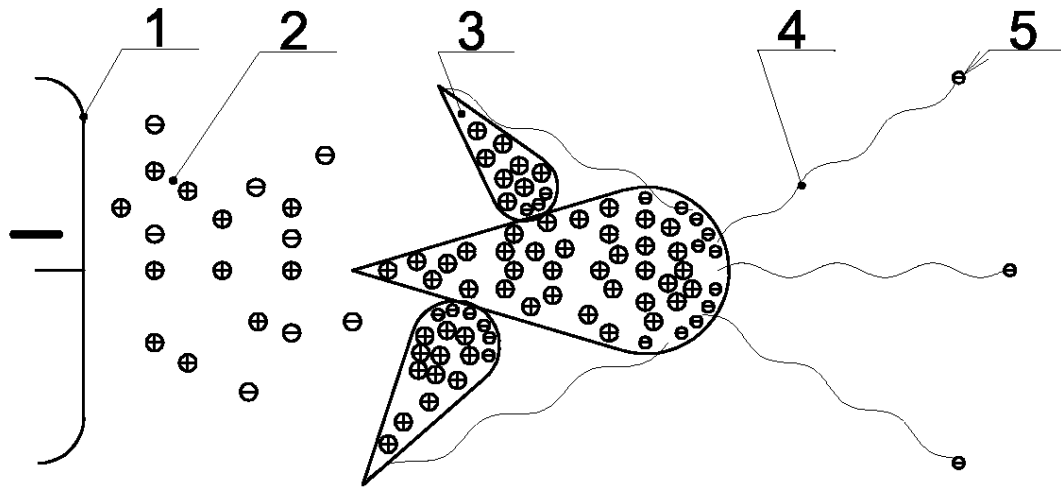


Рис. 1.7. Механизм развития катодного стримера: 1 — электрод-катод, 2 — канал стримера, 3 — лавины, 4 — движение фотонов, 5 — электрон за счет фотоионизации

Закон Пашена

Выполнение условия самостоятельности разряда (1.18) в однородном поле означает пробой всего промежутка, приняв $\eta = 0$. Поскольку нас интересует напряжение, при котором произойдет пробой, приравняем $U = U_{пр}$. Тогда из:

$$U_{пр} = \frac{B_0 P S}{\ln \frac{A_0 P S}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}}$$

Из (1.26) видно, что при неизменной температуре разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления P на расстояние между электродами S .

Эту закономерность впервые экспериментально обнаружил Пашен. И выражение (1.26) называется законом Пашена. Графически эта закономерность представлена на рис. 1.8.

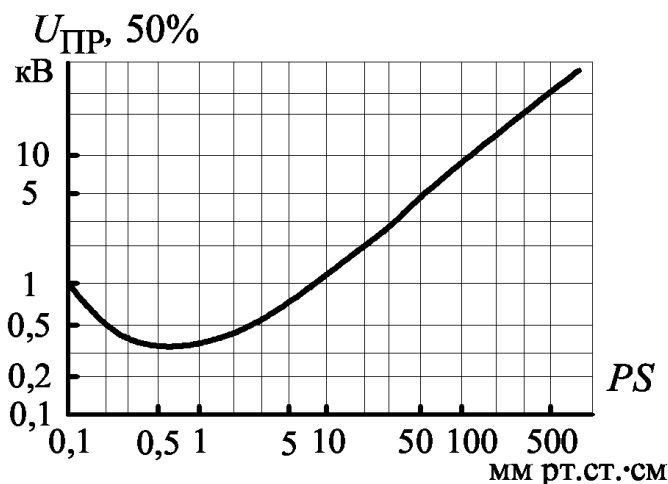


Рис. 1.8. Графическое отображение закона Пашена для воздуха

Вид этой зависимости можно объяснить, исходя из физических представлений. При $S=const$ увеличение давления больше значения, соответствующего минимуму, приводит к увеличению числа столкновений электронов с нейтральными атомами и молекулами и, как следствие, к уменьшению его энергии накапливаемой на длине свободного пробега. Следовательно, для возникновения ударной ионизации необходимо увеличение напряжения $U_{пр}$. С другой стороны, при давлениях меньших, чем соответствующее минимуму значения, увеличивается длина свободного пробега и накапливаемая электроном энергия, но уменьшается количество столкновений, что уменьшает вероятность ударной ионизации. Для ее увеличения необходимо, чтобы как можно большее число столкновений заканчивалось ионизацией. Для этого необходимо увеличивать энергию электрона на длине свободного пробега, т. е. увеличивать $U_{пр}$. Закон Пашена в виде формулы (1.26) справедлив при нормальной температуре. Изменение температуры действует обратно изменению давления и должно учитываться при расчетах.

Экспериментальная кривая Пашена отличается от расчетной как в области очень малых значений PS , так и в области очень больших. В области очень малых значений PS отличие объясняется приближением к вакуумному пробую, при котором основную роль играют процессы на поверхности электродов, а не в объеме газа. При больших значениях P, S отличие объясняется увеличением напряженности электрического поля на микровыступах электродов и увеличением вероятности возникновения лавин, что снижает $U_{пр}$.

На основании закона Пашена могут быть предложены способы повышения пробивного напряжения газов:

- 1) увеличение давления больше атмосферного;
- 2) уменьшение давления до значений меньших, чем давление соответствующее минимуму, вплоть до вакуума.

Разряд в неоднородных полях

В неоднородном поле в отличие от однородного напряженность поля в различных точках промежутка разная по величине или по направлению. К типичным промежуткам с неоднородным полем относятся стержень - стержень, стержень - плоскость, провод - земля и многие другие реальные изоляционные промежутки. На рис. 1.9 приведены зависимости

напряженностей от расстояния между электродами типа стержень - плоскость.

Основные закономерности развития разряда в любых резконеоднородных полях ($K_H > 4$) практически одинаковы. При некотором начальном напряжении K_H в промежутке возникает самостоятельный разряд в лавинной форме, т.к. вблизи стержня имеется область с напряженностью, превышающей значение E_H^* , соответствующее возникновению самостоятельной формы разряда (рис. 1.9). Разряд локализуется в этой области, а вторичные лавины поддерживаются либо за счет фотоионизации из объема газа (при положительной полярности стержня), либо за счет фотоэмиссии или автоэлектронной (холодной) эмиссии с катода (при отрицательной полярности стержня). Такой разряд называется коронным разрядом в лавинной форме. Значение напряжения и напряженности поля на электроде при возникновении коронного разряда зависит от степени неоднородности поля. С увеличением степени неоднородности напряженность на электроде-стержне увеличивается, а напряжение возникновения короны уменьшается.

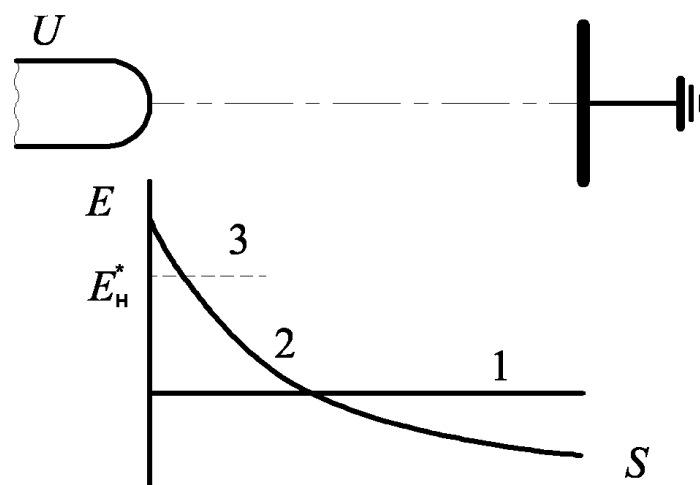


Рис. 1.9. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния между электродами типа стержень-плоскость: 1 — $E_{cp} = f(S)$; 2 — $E_{макс} = f(S)$, 3 — E_H^* — напряженность возникновения самостоятельной формы разряда

При увеличении напряжения свыше U_H , когда количество электронов в лавине возрастает до $10^7 - 10^9$, она переходит в плазменное состояние и в промежутке возникает стример у электрода с повышенной напряженностью поля. Если в однородном поле возникший стример пересекает весь межэлектродный промежуток, то в резконеодном поле в зависимости от величины напряжения стример, пройдя некоторое расстояние, может остановиться. При этом плазма его распадается, но вблизи острия возникают новые стримеры, которые также останавливаются и их плазма распадается.

Такое состояние разряда устойчивое, т.к. при этом выполняется условие самостоятельности разряда. Этот случай, когда стримеры не достигают противоположного электрода, получил название коронного разряда в стримерной форме.

Для пробоя всего межэлектродного промежутка необходимо еще увеличить напряжение. Тогда образуется канал, который продвигается от электрода с повышенной напряженностью (острие) к противоположному электроду. При пересечении искровым каналом всего промежутка он преобразуется в электрическую дугу, что означает завершение пробоя. В резконеоднородных полях напряжение пробоя всегда больше напряжения возникновения коронного разряда в любой форме.

Эффект полярности

В слабонервномерных полях, где минимальный и средний градиенты напряжения мало отличаются друг от друга, коронное и разрядное напряжения практически совпадают друг с другом, влияние полярности невелико. В сильнонервномерном поле коронное напряжение намного ниже разрядного, полярность при несимметричных электродах существенно влияет на величину разрядного напряжения. В промежутке острие-плоскость формирование разряда зависит от полярности острия.

При положительной полярности острия, имеющиеся в промежутке электроны, двигаясь к острию в область сильного поля, совершают ударную ионизацию и образуют лавину электронов. Когда лавина доходит до острия, электроны лавины нейтрализуются на аноде, а положительные ионы вследствие малой скорости движения остаются у острия и создают положительный объемный заряд, который обладает собственным электрическим полем. Взаимодействуя с внешним полем в промежутке, положительный объемный заряд ослабляет поле вблизи острия и усиливает его в остальной части промежутка (рис. 1.10, а). Если напряжение между электродами достаточно велико, то возникает лавина электронов справа от объемного заряда, электроны которой, смешиваясь с положительными ионами объемного заряда, создают зародыш канала анодного стримера, заполненный плазмой. Зажигается стримерный коронный разряд. Положительные заряды этой лавины будут располагаться на головке стримера и создавать область повышенной напряженности во внешнем пространстве. Наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера постепенно удлиняя его. Стример прорастает к катоду, вызывая пробой промежутка при сравнительно малой величине разрядного напряжения.

При отрицательной полярности острия электрическое поле непосредственно у острия приводит к эмиссии электронов с катода, которые сразу попадают в сильное поле и производят ударную ионизацию, образуя большое число лавин. Электроны лавин, перемещаясь в слабое поле у анода, теряют скорость, захватываются нейтральными молекулами, становятся отрицательными ионами, рассеянными в пространстве. Положительные ионы лавин образуют объемный заряд у острия, который, взаимодействуя с внешним полем, будет увеличивать напряженность непосредственно у острия и уменьшать в остальной части промежутка (рис. 1.10, б). Увеличение поля у острия приводит к усилению эмиссии электронов с поверхности катода,

которые, смешиваясь с положительным объемным зарядом, образуют у катода зародыш катодного стримера.

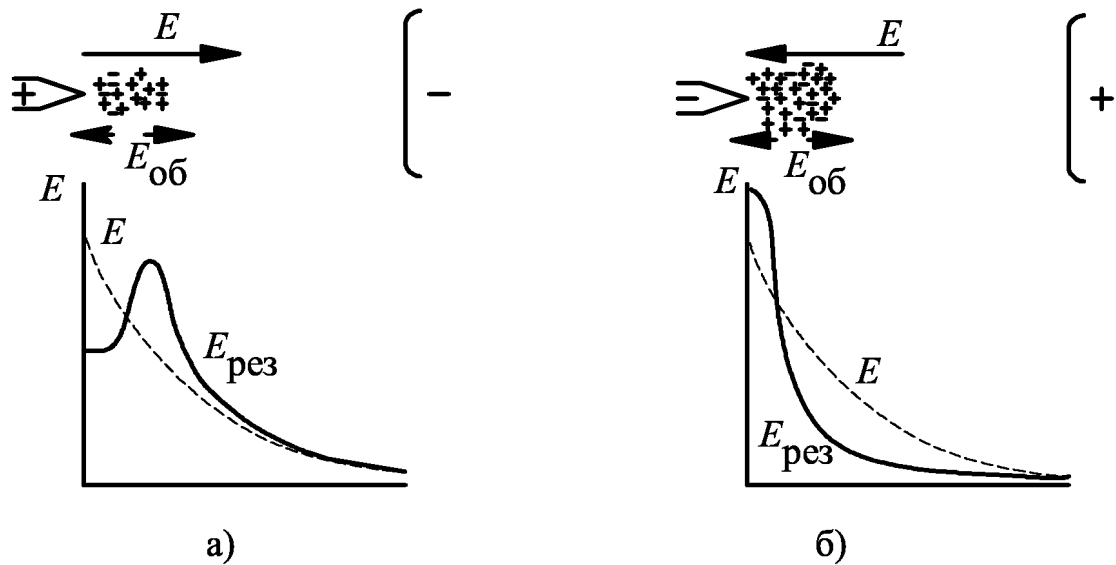
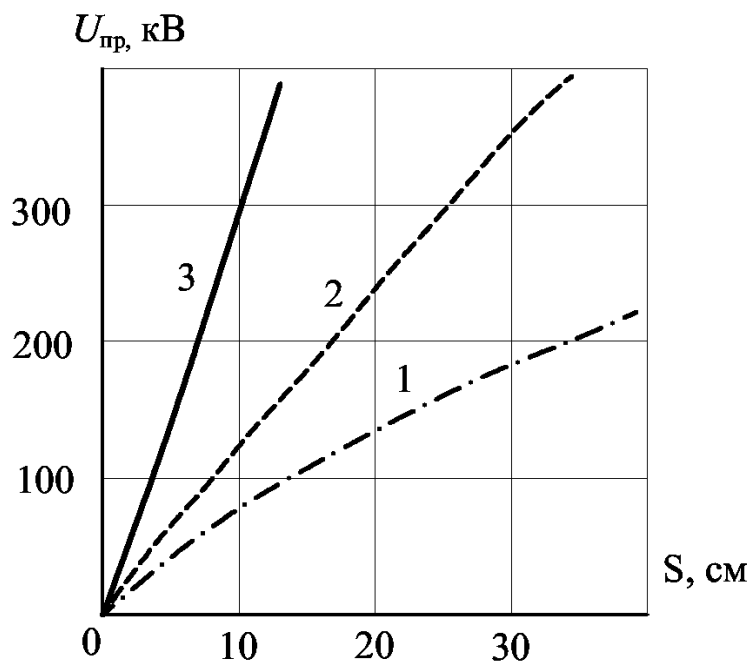


Рис. 1.10. Образование анодного а) и катодного б) стримера: E — напряженность внешнего поля; $E_{об}$ — напряженность поля объемного положительного заряда; $E_{рез}$ — результирующая напряженность в промежутке после ионизации

Вследствие большого числа начальных лавин у катода плазменный канал здесь представляет собой более или менее однородный слой с радиусом кривизны большим, чем у острия. Поэтому электрическое поле несколько выравнивается и напряженность во внешней области уменьшается. Уменьшение напряженности электрического поля во внешнем пространстве приводит к тому, что для дальнейшей ионизации в этой части промежутка необходимо значительно увеличить разность потенциалов между электродами.

При дальнейшем увеличении напряжения происходит ионизация справа от плазменного слоя, большое число образующихся лавин приводит к удлинению стримера. Однако, так же, как и в начале, благодаря большому числу лавин головка стримера размыта, и возрастание напряженности на головке стримера оказывается гораздо меньшим, чем при положительном острие.

В отрицательном разряде при положительной полярности



ие стримера при остиями, поэтому стримера больше, чем при положительной полярности

Рис. 1.11. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами стержень-плоскость на импульсном напряжении: 1 — положительная полярность острия; 2 — отрицательная полярность острия; 3 — однородное поле

Барьерный эффект

Существенное влияние объемного заряда на развитие разряда в промежутке с резконеравномерным полем используется на практике для увеличения разрядных напряжений изоляционных промежутков. Это увеличение достигается помещением в промежуток барьеров из твердого диэлектрика (электрокартон, гетинакс и др.). При положительном острие положительные ионы оседают на барьер и растекаются по его поверхности тем равномернее, чем дальше от острия расположен барьер. Это приводит к более равномерному распределению напряженности в промежутке между барьером и плоскостью (рис. 1.12, а) и, следовательно, к значительному увеличению разрядного напряжения.

При отрицательной полярности стержня электроны, двигаясь от острия, попадают на барьер, теряют скорость и большинство из них вместе с атомами кислорода становятся отрицательными ионами. На барьере в этом случае появляется концентрированный отрицательный заряд, увеличивающий напряженность поля не только между положительным объемным зарядом у острия и барьером, но и во внешнем пространстве (рис. 1.12, б). Поэтому при отрицательной полярности острия увеличение разрядного напряжения в промежутке при наличии барьера будет незначительным. При расположении барьера в средней части промежутка, разрядные напряжения при отрицательной и положительной полярностях близки. При расположении барьера в непосредственной близости от положительного острия роль его уменьшается вследствие резкой неравномерности распределения зарядов на барьере. Напряженность поля оказывается достаточной для того, чтобы ионизационные процессы

проходили на другую сторону барьера. Барьер, расположенный в непосредственной близости от отрицательного острия, не способен задерживать быстрые электроны с острия, которые проходят сквозь барьер к плоскости.

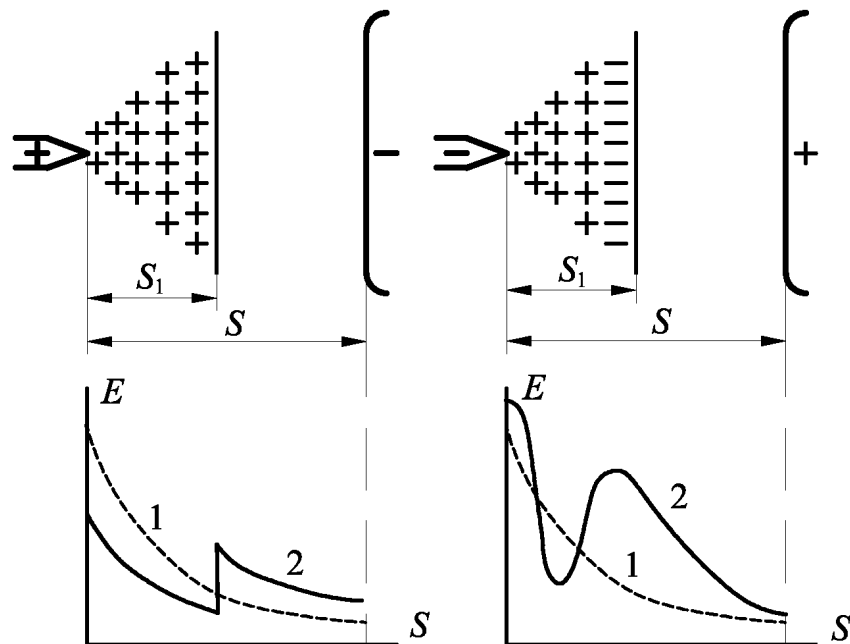


Рис. 1.12. Распределение напряженности поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера: а) — положительная полярность стержня; б) — отрицательная полярность стержня; 1 —распределение напряженности поля без барьера; 2 —распределение напряженности поля с барьером

Таким образом, барьеры в промежутке устанавливаются на таком оптимальном расстоянии от острия, при котором разрядные напряжения максимальны (25-30 % от длины промежутка между электродами), причем при положительной полярности острия разрядное напряжение может увеличиться в 2 раза по сравнению с промежутком без барьера

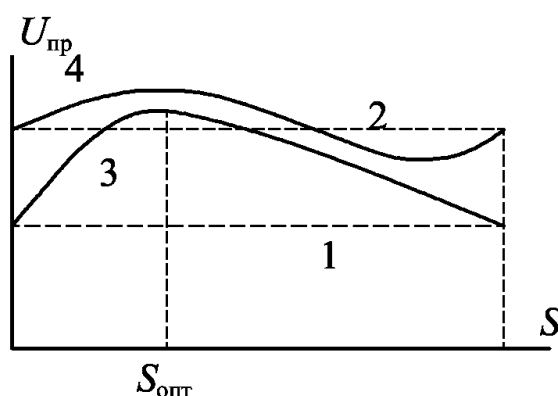


Рис. 1.13. Влияние барьера на пробивное напряжение газового промежутка при положительной (1, 3) и отрицательной (2, 4) полярностях напряжения: 1,2 — пробивное напряжение промежутка без барьера; 3, 4 — пробивное напряжение промежутка с барьером

Барьеры широко используются в высоковольтных конструкциях, работающих как в воздухе, так и в масле (высоковольтные вводы, трансформаторы и др.). На переменном напряжении электрическая прочность на положительной полярности увеличивается и приближается к электрической прочности на отрицательной полярности.

Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции (вольт-секундная характеристика — ВСХ)

При кратковременных импульсах значение разрядного напряжения воздушных промежутков зависит от продолжительности воздействия. Если к промежутку приложено напряжение достаточное для пробоя, то для развития и завершения разряда в промежутке необходимо определенное время T_p называемое временем разряда (см. рис. 1.14).

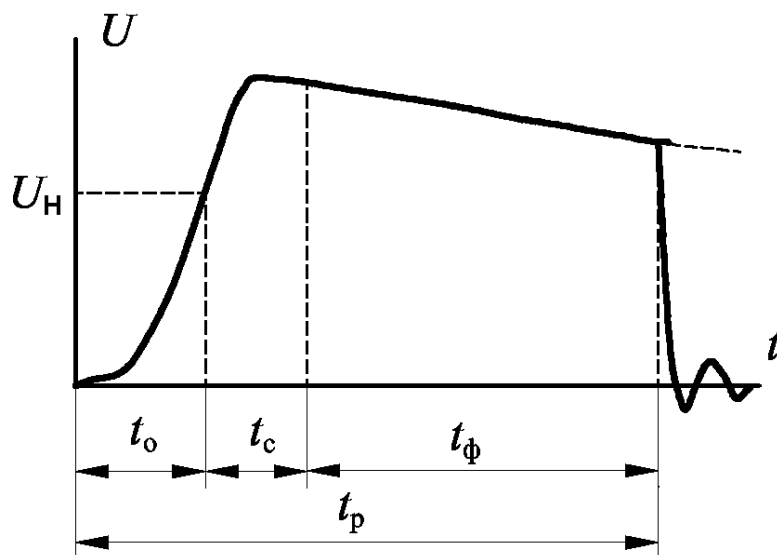


Рис. 1.14. Временная структура развития разряда на импульсном напряжении

Развитие самостоятельного разряда начинается с появления в промежутке эффективного начального электрона, что является случайным событием. Время ожидания эффективного электрона t_c подвержено разбросу и называется поэтому статистическим временем запаздывания разряда.

Это первая составляющая времени разряда. Другой составляющей, имеющей также статистический характер является время формирования разряда t_ϕ , т.е. время от момента появления начального электрона до завершения пробоя промежутка. Время $t_c + t_\phi = t_3$ называют временем запаздывания развития разряда. При достаточно большой длительности фронта импульса имеет значение также время t_0 , представляющее собой время подъема напряжения до значения U_n . Таким образом, в общем случае время разряда определяется как:

$$t_p = t_0 + t_c + t_\phi \quad (1.27)$$

Составляющие времени разряда t_c и t_ϕ зависят от значения напряжения на промежутке. При увеличении напряжения повышается вероятность того, что появляющиеся в промежутке электроны станут эффективными, и t_c уменьшается. Сокращается также и t_ϕ , поскольку при большем напряжении возрастает интенсивность разрядных процессов и скорость продвижения канала разряда в промежутке. Поэтому чем выше разрядное напряжение, тем меньше время разряда.

Зависимость максимального напряжения разряда от времени действия импульса называется вольт-секундной характеристикой изоляции. Поскольку начало и скорость развития ионизационных процессов зависят от значения напряжения, вольт-секундные характеристики зависят от формы импульса. С целью унификации испытаний и возможности сопоставления изоляционных конструкций установлен стандартный грозовой импульс с длительностью фронта (возрастания напряжения) $\tau_\phi = 1,2 \pm 0,4$ мкс и длительностью импульса $\tau_m = 50 \pm 10$ мкс и обозначается 1,2/50 мкс (рис. 1.15).

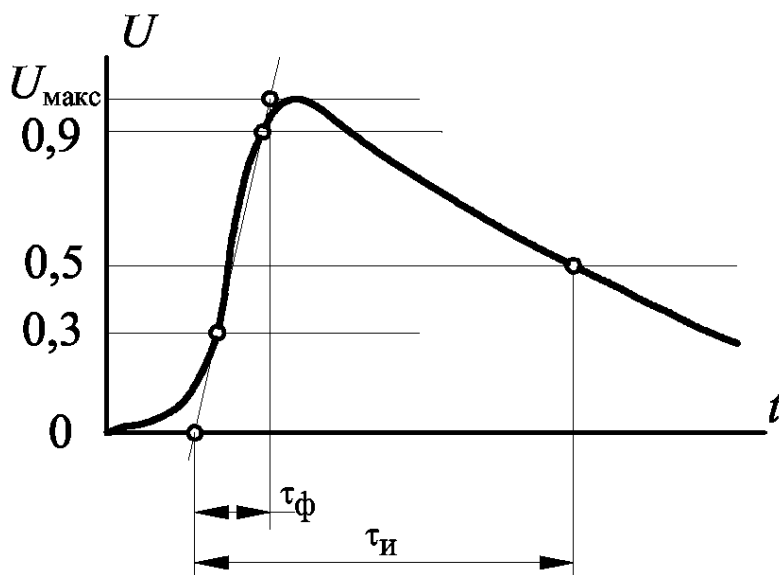


Рис. 1.15. Определение параметров импульса напряжения

Для экспериментального определения вольт-секундной характеристики к исследуемому промежутку прикладываются импульсы стандартной формы. При каждом значении максимального напряжения импульса

производится серия опытов. В силу статистического разброса времени разряда вольт-секундная характеристика получается в виде области точек (рис. 1.16), для которой указываются средняя кривая и границы разброса времени разряда.

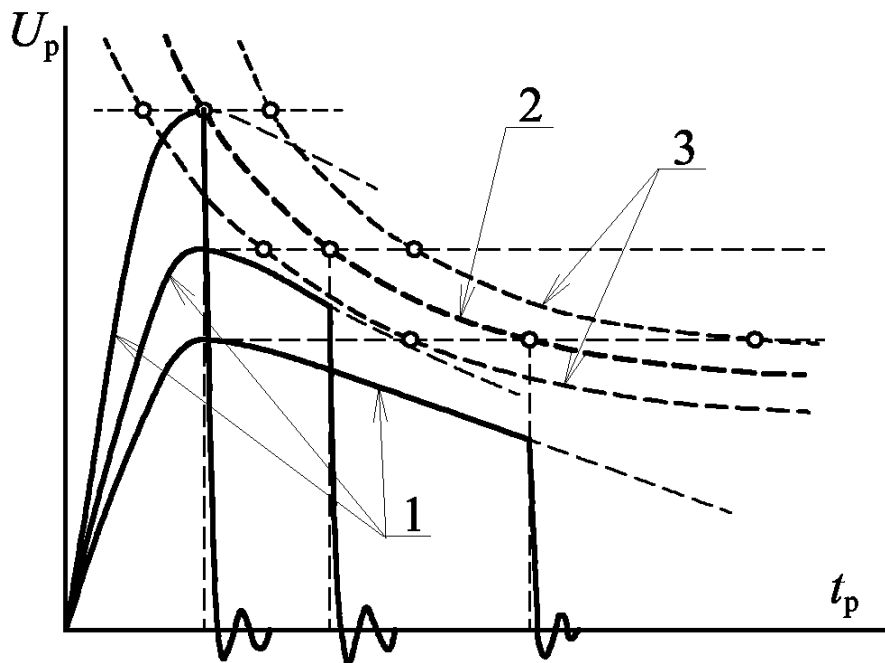


Рис. 1.16. Построение вольт-секундной характеристики изоляции по опытным данным (грозовые импульсы): 1 — импульс напряжения; 2 — кривая средних значений пробивного напряжения; 3 — границы разброса пробивных напряжений

Вид вольт-секундной характеристики зависит от степени неоднородности электрического поля в промежутке. Для промежутков с однородным или слабонеоднородным полем, вольт-секундная характеристика слабо зависит от t_p (рис. 1.17, кривая 1), и только при временах разряда порядка 1 мкс и меньше разрядное напряжение увеличивается. Связано это с тем, что разряд в таких промежутках формируется за весьма малое время при напряжении равном начальному значению и отсутствует корона. Отмеченные свойства вольт-секундной характеристики позволяют использовать промежуток между шаровыми электродами, создающими практически однородное поле, если расстояние между электродами меньше их радиуса, в качестве универсального прибора для измерения максимальных значений напряжения.

Вольт-секундные характеристики промежутков с резконеоднородным полем (рис. 1.17, кривая 2) имеют достаточно большую крутизну, поскольку в таких промежутках время формирования разряда сильно зависит от значения приложенного напряжения. Для таких промежутков при грозовых импульсах характерны большие разрядные напряжения U_p , чем при переменном напряжении промышленной частоты 50 Гц. Отношение

$$K_{\text{imp}} = \frac{U_p}{U} \quad (1.28)$$

называется коэффициентом импульса.

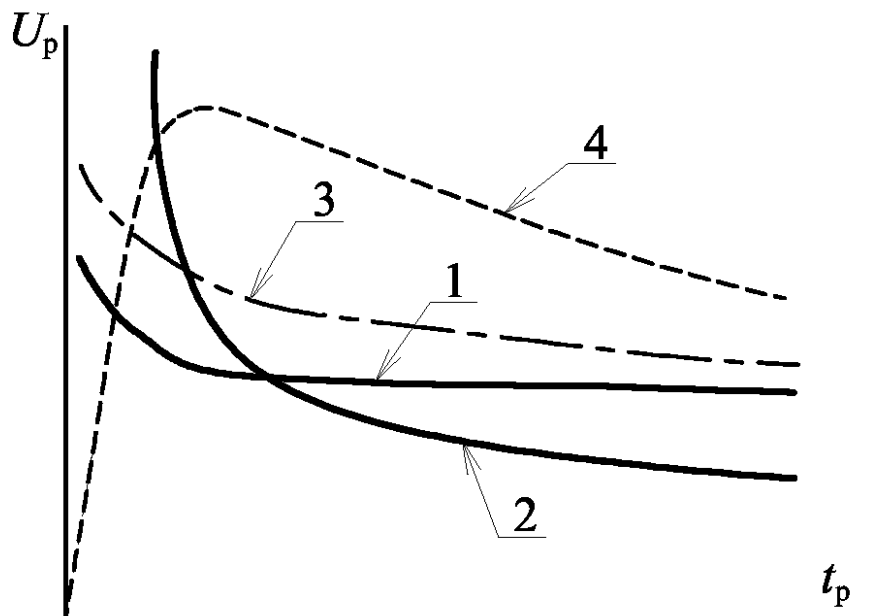


Рис. 1.17. ВСХ защитных разрядников и изоляции: 1 — ВСХ вентильного разрядника (однородное поле); 2 — ВСХ трубчатого разрядника (резконе-однородное поле); 3 — ВСХ защищаемого объекта; 4 — импульс напряжения

Промежутки с однородным и слабонеоднородным полями имеют коэффициент импульса $K_{\text{imp}} = 1$ практически во всем диапазоне времен разряда.

Вольт-секундные характеристики широко используются для координации изоляции высоковольтного оборудования, т. е. для защиты от воздействия грозových и коммутационных перенапряжений. С этой целью параллельно защищаемому объекту включается воздушный разрядник (например, вентильный разрядник) с пологой ВСХ. Надежная защита будет обеспечиваться, если ВСХ разрядника (рис. 1.17, кривая 1) лежит ниже ВСХ защищаемого оборудования (кривая 3) во всем диапазоне времен воздействующего напряжения.

Тема 4. Разряды в воздухе вдоль поверхности изоляторов (6 часа)

Коронный разряд это самостоятельный разряд, при котором ударная ионизация электронами имеет место не на всей длине промежутка, а лишь в его части у электродов. Коронный разряд может иметь лавинную и стримерную форму. Пробой коронирующего промежутка происходит при напряжении большем начального.

Корона представляет интерес в связи с потерями энергии при коронировании ЛЭП. Например, на линиях сверхвысокого напряжения потери энергии при коронировании проводов ЛЭП в плохую погоду составляют 100-200 кВт на километр линии и более. Кроме этого, продукты ионизации воздуха разрушительно действуют на изоляцию и металлическую арматуру. Коронный разряд также является источником акустического шума и высокочастотного электромагнитного излучения (спектр частот 0,154—100 МГц), которое создает помехи радио- и телеприему.

При коронном разряде происходит ионизация воздуха и у поверхности провода образуется объемный заряд того же знака, что и полярность напряжения на проводе. Под действием сил электрического поля ионы, составляющие объемный заряд, движутся от провода. Для их передвижения необходимы затраты энергии, которые и определяют в основном потери энергии на корону, поскольку затраты энергии на ионизацию воздуха значительно меньше.

На постоянном напряжении различают униполярную и биполярную корону. Если коронирует один провод — униполярная корона. При униполярной короне генерируемые короной заряды, имеющие тот же знак, что и коронирующий провод, под действием электрического поля устремляются к земле, где происходит их нейтрализация. При биполярной короне объемные заряды проводов различной полярности движутся навстречу друг другу. При встрече происходит рекомбинация ионов разных знаков. Часть ионов проникает в пространство вблизи противоположного провода, что приводит к усилению интенсивности коронирования. Это увеличивает потери на корону.

На переменном напряжении коронный разряд зажигается при достижении начального напряжения, равного напряжению зажигания короны U_H при времени t_1 (рис. 1.18, а). Вокруг провода образуется зона ионизации, называемая чехлом короны (рис. 1.18, в). Из чехла короны положительные заряды (как на рис. 1.18, в) выносятся в окружающее пространство и образуют внешний объемный заряд (ОЗ). Процесс коронирования продолжается до тех пор, пока напряжение не достигнет t_2 .

Несмотря на повышение напряжения до $U_{\text{макс}}$, напряженность на проводе остается постоянной и равной E_H из-за влияния объемного заряда. Затем напряжение начинает снижаться. Синхронно снижается и напряженность на проводе, что приводит к погасанию короны. Но после погасания короны (после t_2) в пространстве вокруг провода остается положительный внешний объемный заряд, который еще удаляется от провода (рис. 1.18, в). Расстояние, на которое удаляется объемный заряд, зависит от напряжения на проводе и составляет $\sim 40-100$ см. Разность потенциалов между проводом и ОЗ увеличивается по мере уменьшения напряженности на проводе до времени t_3 . При t_4 (рис. 1.18, а, в), когда напряжение достигает U_0 , которое значительно меньше U_H , зажигается отрицательная корона. При этом отрицательно заряженные частицы начинают двигаться от провода во внешнюю область, а навстречу (к проводу) движутся положительно

заряженные частицы из внешнего объемного заряда. Происходит рекомбинация заряженных частиц до полной компенсации положительного внешнего ОЗ. Затем накапливается отрицательный ОЗ во внешней области. Все это происходит за время от t_4 до t_5 (рис. 1.18, а, в). В момент времени t_5 (начало уменьшения напряжения) отрицательная корона гаснет. В дальнейшем все эти циклы повторяются и зажигание короны на обеих полярностях происходит при U_0 .

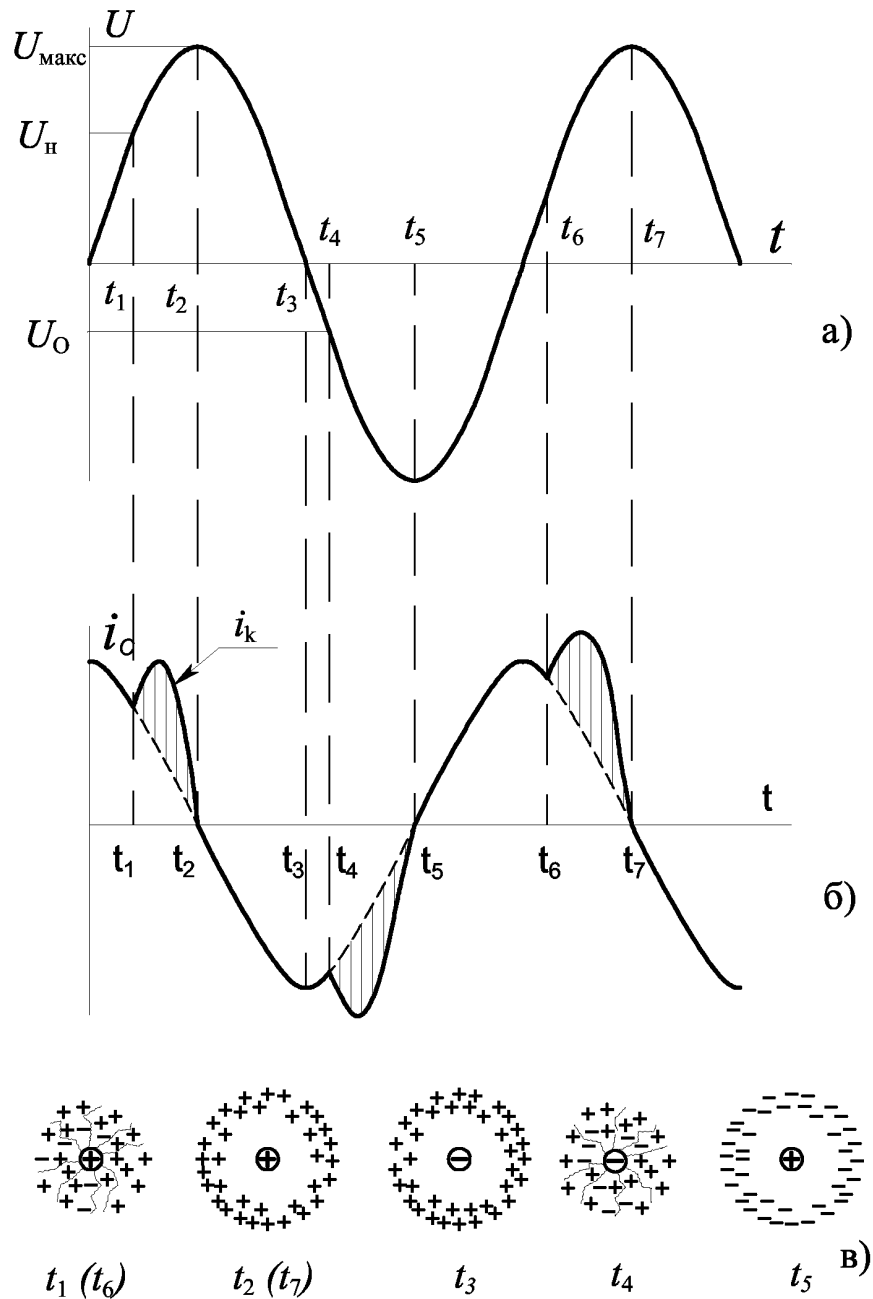


Рис. 1.18. Развитие короны при переменном напряжении

Между проводом и землей имеет место емкость C , которая заряжается и разряжается с частотой переменного тока. При этом между проводом и землей протекает емкостной ток i_c (рис. 1.18, б):

$$i_c = C \frac{du}{dt} \quad (1.29)$$

Возникновение коронного разряда в момент t_1 приводит к появлению тока короны i_k , который накладывается на емкостный ток линии и искажает синусоиду тока (рис. 1.18, б). Длительность пиков тока короны равна длительности ее горения, т.е. от t_1 до t_2 (или от t_4 до t_5)

При переменном напряжении коронирование проводов более интенсивное, чем при постоянном напряжении, и при прочих равных условиях потери энергии на корону существенно больше.

На характеристики коронного разряда — начальное напряжение, потери энергии, радиопомехи, шум — значительное влияние оказывают погодные условия. Атмосферные осадки резко снижают начальное напряжение возникновения короны.

Разряд в воздухе по поверхности изоляторов

Рассмотрим влияние твердого диэлектрика на возникновение и развитие разряда в воздухе вдоль поверхности изолятора. В конструкции рис. 1.19, а силовые линии электрического поля параллельны поверхности диэлектрика и поле однородно. В конструкции рис. 1.19, б поле неоднородно и тангенциальная составляющая напряженности поля на поверхности диэлектрика E_τ преобладает над нормальной составляющей E_n . В конструкции рис. 1.19, в поле также неоднородно, но преобладает нормальная составляющая. Первая конструкция сравнительно редко встречается в реальных условиях, но удобна при выявлении влияния характеристик диэлектрика на возникновение разряда, вторая и третья конструкции встречаются часто (опорные и проходные изоляторы).

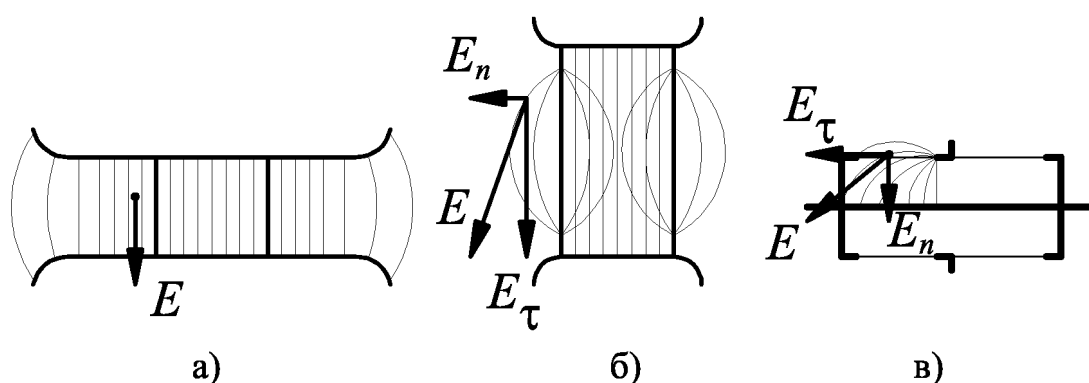


Рис. 1.19. Характерные конструкции воздушных промежутков с твердым диэлектриком

В изоляционной конструкции рис. 17, а электрическая прочность промежутка с диэлектриком меньше, чем чисто воздушного промежутка. Это связано с адсорбцией влаги из окружающего воздуха на поверхности диэлектрика, а также с микроразорами между твердым диэлектриком и электродом. Поверхность всех тел во влажном воздухе покрыта тончайшей

пленкой воды. Ионы, образующиеся в этой пленке под действием электрического поля, перемещаются к электродам. В результате этого поле вблизи электродов усиливается, а в середине промежутка ослабляется. Усиление поля у электродов приводит к снижению электрической прочности промежутка. Это снижение тем больше, чем гигроскопичнее диэлектрик.

Например, стекло является более гигроскопичным материалом, чем глазурованный фарфор, поэтому напряжение перекрытия вдоль поверхности стекла ниже, чем вдоль фарфора.

Уменьшение напряжения перекрытия изолятора при наличии микроразрыва между диэлектриком и электродом или микротрещины на поверхности диэлектрика связано с увеличением в них напряженности поля вследствие различия диэлектрических проницаемостей воздуха и твердого диэлектрика (диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика в 3-4 раза больше, чем воздуха), увеличение напряженности поля к микроразрывам приводит к возникновению там ионизационных процессов, продукты которых (ионы и электроны), попадая в основной промежуток, создают местное усиление поля, приводящее к уменьшению напряжения перекрытия.

Для увеличения разрядного напряжения промежутка с твердым диэлектриком стремятся использовать малогигроскопичные диэлектрики или создать покрытия из малогигроскопичных материалов, разряда и полному перекрытию промежутка при меньшем значении напряжения между электродами.

Длина канала скользящего разряда зависит от его проводимости, а следовательно, от значения тока в нем. В свою очередь ток зависит от напряжения между электродами, изменения напряжения и емкости канала стримера относительно противоположного электрода. Рост длины изолятора дает относительно малое повышение разрядного напряжения. Поэтому для увеличения разрядных напряжений проходных изоляторов уменьшают удельную поверхностную емкость путем увеличения диаметра изолятора у фланца, с которого можно ожидать развития разряда. Используется также нанесение у фланца полупроводящего покрытия, что способствует выравниванию распределения напряжения по поверхности изолятора и, следовательно, приводит к увеличению разрядных напряжений.

При постоянном напряжении удельная поверхностная емкость практически не влияет на развитие разряда и значение разрядного напряжения оказывается близким к разрядному напряжению чисто воздушного промежутка.

Разряд вдоль проводящей и загрязненной поверхности изолятора

В условиях эксплуатации поверхности изоляторов всегда загрязняются. Как правило, сухие загрязнения, имеющие высокое сопротивление и не влияющие на распределение напряжения по поверхности изолятора, не снижают заметно его разрядного напряжения. Увлажнение слоя загрязнения морозящим дождем или росой приводит к уменьшению сопротивления слоя загрязнения, изменению распределения напряжения по поверхности изолятора и в результате — к снижению его разрядного напряжения.

Механизмы перекрытия изолятора под дождем и при загрязненной и увлажненной поверхности сходны. Рассмотрим развитие разряда в случае, когда поверхность изолятора загрязнена и увлажнена.

Под действием приложенного к изолятору напряжения по увлажненному слою загрязнения проходит ток утечки, нагревающий его. Так как загрязнение распределено по поверхности изолятора неравномерно и плотность тока утечки неодинакова на отдельных участках изолятора из-за сложной конфигурации его поверхности, то нагревание слоя загрязнения происходит также неравномерно. На тех участках изолятора, где плотность тока наибольшая, происходит интенсивное испарение воды и образуются подсушенные участки с повышенным сопротивлением. Распределение напряжения по поверхности изолятора меняется. Почти все напряжение, воздействующее на изоляцию, оказывается приложенным к подсушенным участкам. В результате этою подсушенные участки перекрываются искровыми каналами, называемыми частичными перемежающимися дугами. Сопротивление искрового канала меньше сопротивления подсушенного участка поверхности изолятора, поэтому ток утечки возрастает. Возрастание тока утечки приводит к дальнейшему подсушиванию слоя загрязнения, а следовательно, и к увеличению его сопротивления.

Интенсивное подсушивание поверхности изолятора у концов дуг приводит к их удлинению. Подсушивание всей поверхности ведет к снижению тока утечки, а увеличение длины частичных дуг к его росту. Если результатом этого будет уменьшение тока утечки, то дуги погаснут, если же ток утечки будет расти, то частичные дуги будут удлиняться и перекроют весь изолятор. Так как параметры частичной дуги и количество дуг, одновременно существующих на поверхности изолятора, случайны, то и перекрытие также является случайным событием, характеризуемым определенной вероятностью. Вероятность перекрытия изолятора повышается с увеличением воздействующего напряжения, так как при этом возрастает ток утечки, что благоприятствует удлинению частичных дуг до полного перекрытия изолятора.

Из приведенной картины развития разряда следует, что разрядные напряжения изоляторов будут тем выше, чем меньше ток утечки.

Следовательно, разрядное напряжение изолятора будет возрастать с увеличением длины пути утечки и уменьшением диаметра изолятора:

Так как процессы подсушки поверхности изолятора происходят относительно медленно, то при кратковременных перенапряжениях они не успевают развиться и напряжение перекрытия бывает выше, чем при длительном воздействии напряжения.

Влагоразрядное напряжение изолятора зависит от характеристик слоя загрязнения, его количества и состава, а также от интенсивности и вида увлажнения. Большое разнообразие видов загрязнения, встречающихся в условиях эксплуатации, не позволяет выбрать единственное, "стандартное" загрязнение, которое можно было бы наносить на поверхность изоляторов при определении влагоразрядных напряжений. Наиболее правильно

разрядные напряжения в реальных условиях загрязнения и увлажнения могут быть определены из опыта эксплуатации.

Тема 5. Общие свойства внутренней изоляции (4 часа)

Пробой жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики, обладая значительно более высокой электрической прочностью по сравнению с газами, нашли очень широкое применение в качестве высоковольтной изоляции в разнообразных устройствах: трансформаторах, кабелях, передающих линиях, конденсаторах, выключателях, разрядниках и т. д.

Жидкие диэлектрики можно классифицировать по их природе на следующие группы:

- 1) углеводороды минеральные — продукты перегонки нефти и каменного угля (трансформаторное, конденсаторное и др. масла);
- 2) углеводороды растительные (касторовое, льняное и другие масла);
- 3) хлорированные углеводороды ароматического ряда (хлор-дифенил, совтол);
- 4) кремнийорганические соединения.

Кроме этого, жидкие диэлектрики могут быть полярными и неполярными, в связи с этим у них существенно изменяются свойства, которые приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4 Свойства диэлектриков

Вид диэлектрика	ρ , Ом-см	δ	$\text{tg}\delta$
Неполярные	$>10^{18}$	1,8...2,5	$\ll 0,001$
Слабополярные	$\ll 10^{11} \dots 10^{12}$	$>2,5$	$\ll 0,01$
Сильнополярные	$\ll 10^7 \dots 10^8$	>5	$\ll 0,1$

В промышленности имеют дело с технически чистыми жидкими диэлектриками, у которых влияние посторонних примесей ограничено некоторой минимальной концентрацией. В этой связи в теориях пробоя технически чистых жидкостей рассматривают влияние посторонних примесей, неизбежно появляющихся при эксплуатации. Важнейшие посторонние примеси в жидких диэлектриках:

- а) вода;
- б) газы;
- в) волокна целлюлозы;
- г) углерод;
- д) продукты разложения используемого жидкого диэлектрика.

По сравнению с воздухом (газом) пробивные напряжения масла имеют очень большой разброс. Отклонение от среднего составляет 50% и более, а среднеквадратичное отклонение 10...15%. Определение электрической прочности масла $U_{пр}$ по ГОСТ 6581-75 осуществляется в стандартном пробойнике на переменном напряжении.

На пробой жидких диэлектриков существенное влияние оказывает множество факторов, которые могут, как понижать пробивное напряжение (загрязнения, увлажнение и др.), так и увеличивать его (очистка, давление, барьеры и т.д.). Основные факторы, изменяющие

- 1) загрязнение и увлажнение (увеличение загрязненности масла снижает $U_{пр}$, ничтожное количество влаги ($< 0,03\%$) резко снижает $U_{пр}$);
- 2) вязкость (уменьшение вязкости уменьшает $U_{пр}$);
- 3) температура (с увеличением температуры $U_{пр}$ уменьшается; на импульсном напряжении это влияние незначительное; для технически чистого масла зависимость $U_{пр} = f(T^0 C)$ носит сложный характер);
- 4) давление (для технически чистого масла увеличение давления приводит к увеличению $U_{пр}$, т.к. увеличивается давление в газовых пузырьках);
- 5) наличие барьеров (барьеры могут существенно повысить $U_{пр}$, особенно в резконеоднородном поле;
- 6) время действия напряжения (с увеличением времени воздействия напряжения $U_{пр} >$ уменьшается; чем чище диэлектрик, тем меньше это влияние; на импульсном напряжении коэффициент импульса в несколько раз больше, чем для газовых диэлектриков);
- 7) форма, площадь электродов и расстояние между ними (форма электродов создает поля разной степени неоднородности при $S = const$, чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже $U_{пр}$, с увеличением площади электродов $U_{пр}$ уменьшается; увеличение расстояния увеличивает $U_{пр}$);
- 8) полярность электродов при несимметричной их форме (при отрицательной полярности пробивные напряжения больше, чем при положительной; этот эффект тем больше, чем более полярен диэлектрик).

Пробой жидких диэлектриков — явление сложное, что объясняется сложным составом жидких диэлектриков и многими факторами, влияющими на развитие пробоя (загрязнение, форма, размеры и материал электродов, температура, давление и др.) Для хорошо очищенных жидкостей величина электрической прочности достигает 1000 кВ/см.

Влияние влаги и микропримесей

Влага в масле может находиться в трех состояниях: в молекулярно-растворенном виде, в виде эмульсии (мелкие шарики воды размером 2...10мкм) и в виде водяного отстоя на дне бака. Растворимость воды в жидких диэлектриках зависит от температуры. Например, в минеральном масле при 20°C может растворяться ~ 40-10⁶ воды по объему, а при 80°C ~ 400-10⁶.

Наличие влаги в обоих состояниях сказывается на электрической прочности масла, особенно в присутствии волокон. Причем наиболее сильно влияет эмульгированная влага. Вследствие большой диэлектрической проницаемости (для воды $\epsilon = 80$, для волокон целлюлозы $\epsilon = 6,4$) частички влаги и волокна втягиваются в область наибольшей напряженности электрического поля, поляризуются и вытягиваются вдоль силовых линий поля. Это приводит к образованию «мостиков», которые увеличивают локальную плотность тока, нагреву, сильному увеличению местной

напряженности поля в местах разрыва мостиков, вследствие чего начинаются местные ионизационные процессы и может произойти пробой всего межэлектродного промежутка.

Зависимость пробивной напряженности трансформаторного масла от содержания влаги C_{H_2O} (рис. 1.20) (миллионные доли влаги в единице объема масла) показывают, что наличие 40-50 млн. долей влаги уменьшает электрическую прочность масла примерно в 10 раз.

Снижение электрической прочности в области малых концентраций вызвано влиянием растворенной влаги, а в области больших концентраций — эмульгированной влаги.

Наличие влаги и волокон слабо сказывается на прочности жидких диэлектриков при коротких импульсах напряжения (единицы-десятки микросекунд), поскольку частицы примесей не успевают переместиться на значительное расстояние и повлиять на развитие разряда в жидкости.

Общее количество воды, которое может находиться в масле в молекулярно-растворенном и эмульсионном виде, ограничено. При содержании воды более 0,02% влага выпадает в виде отстоя на дно. Хотя сам отстой и не влияет на электрическую прочность, его появление свидетельствует о существенном ухудшении изоляционных свойств масел.

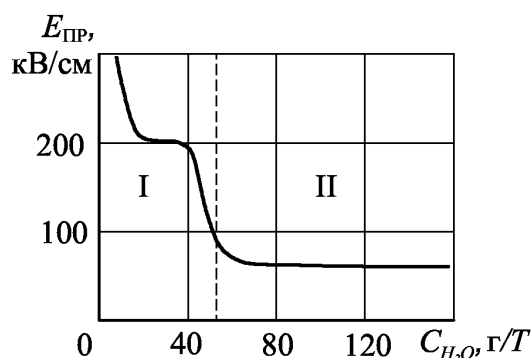


Рис. 1.20. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от содержания влаги, C_{H_2O} (грамм тонна): I — зона растворимости влаги, II — эмульгированная влага

Особенно резкое уменьшение разрядных напряжений происходит при наличии в масле гигроскопических загрязнений в виде волокон бумаги, картона, пряжи, значительно облегчающих образование проводящих мостиков. Эти загрязнения проникают в масло в процессе эксплуатации из элементов твердой изоляции, находящихся в масле.

Влияние давления

Пробивное напряжение как технических, так и очищенных жидких диэлектриков при промышленной частоте 50 Гц сильно зависит от давления. Это связано с наличием и образованием в жидкости при высоком напряжении пузырьков газа, являющихся очагами развития пробоя. А электрическая прочность газа сильно зависит от давления (закон Пашена).

На рис. 1.21 представлены зависимости пробивного напряжения трансформаторного масла от давления ниже атмосферного. При пониженных

давлениях из масла начинают выделяться растворенные в нем газы, и его прочность резко падает (рис. 1.21, кривая 1).

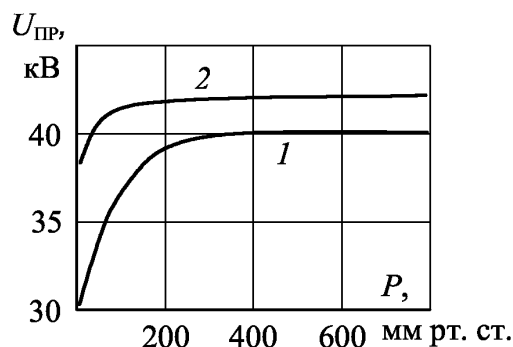


Рис. 1.21. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления: 1 — недегазированное масло; 2 — дегазированное масло

Видно, что зависимость пробивного напряжения от давления заметно увеличивается с повышением степени очистки масла (рис. 1.21, кривая 2), что указывает на большое влияние газообразных примесей.

При давлениях выше атмосферного (рис. 1.22) электрическая прочность масла увеличивается, что также свидетельствует о наличии газа в масле и его влиянии на электрическую прочность масла.

При импульсных воздействиях давление меньше сказывается на электрической прочности жидких диэлектриков.

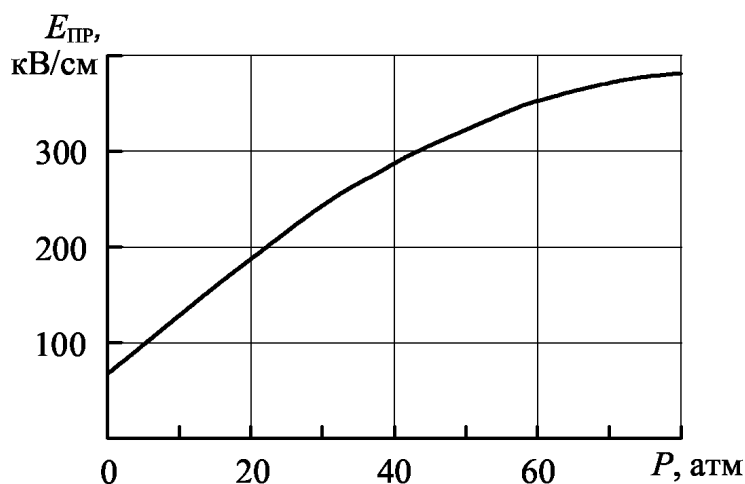
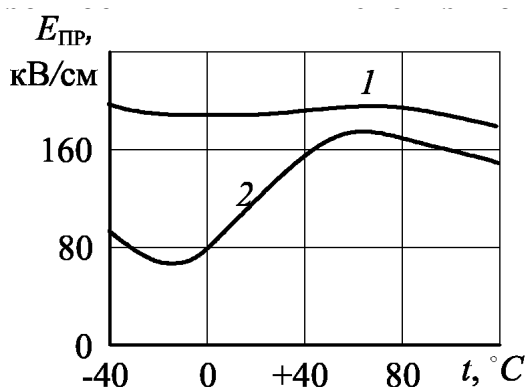


Рис. 1.22. Зависимость пробивного напряжения парафинового масла от давления (50 Гц)

Влияние температуры

Электрическая прочность зависит от их чистоты и температуры наблюдения (рис. 1.23, кривая 1).



з сильной степени ичительное влияние арения и кипения,

Рис. 1.23. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от температуры: 1 — сухое масло; 2 — техническое масло с примесью влаги

Для технически чистых жидкостей с примесью влаги зависимость электрической прочности от температуры достаточно сложная. Из рис. 1.23, кривая 2 видно, что имеет место минимум и максимум электрической прочности. Снижение температуры от точки максимума приводит к уменьшению $E_{ПР}$ до минимума, что связано с переходом растворенной влаги в эмульгированное состояние. Дальнейшее понижение температуры (меньше $0^{\circ}C$) вызывает замерзание капелек воды и, как следствие, повышение $E_{ПР}$. У льда диэлектрическая постоянная $\epsilon_{л}$ примерно равна диэлектрической постоянной масла $\epsilon_{м}$ ($\epsilon_{л} \approx \epsilon_{м}$), что уменьшает влияние влаги на электрическую прочность масла.

Уменьшение электрической прочности для сухого и технического масел при температуре выше $+80^{\circ}C$ (рис. 1.23) обусловлено интенсивным испарением и кипением жидкости.

Влияние времени воздействия напряжения

Электрическая прочность жидких диэлектриков существенно зависит от длительности приложения напряжения t и чем больше примесей в жидкости (особенно влаги и волокон), тем сильнее эта зависимость (рис. 1.24).

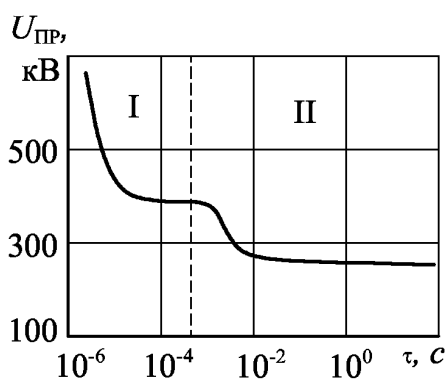


Рис. 1.24. Зависимость пробивного напряжения от времени воздействия для трансформаторного масла. Электроды: острие-плоскость; расстояние между электродами 20 см; положительная полярность напряжения

Экспериментальные результаты по пробоем жидких диэлектриков показывают наличие, как минимум, двух областей, связанных с временем

воздействия напряжения (рис. 1.24), появление которых объясняется различными механизмами пробоя. При воздействии импульсов напряжения с длительностью $\tau < 10^{-4}$ с (область I) влияние примесей значительно ослаблено, т.е. они не успевают переместиться на заметные расстояния. Начальная стадия разряда в жидкости возникает при напряженностях 100 кВ/см. В этом случае начинают проявляться процессы электронной эмиссии. Возможны процессы авто- и термоэлектронной эмиссии с катода, а также процессы автоионизации жидкости у анода. Все перечисленные явления могут участвовать в инициировании разряда.

Образование газовых пузырьков у электрода может иметь место как за счет разложения углеводородов жидкого диэлектрика, так и за счет вскипания жидкости под воздействием выделенной энергии в локальных зонах электрода ("тепловая" теория пробоя). В газовых пузырьках развивается ударная ионизация, образуется кистевой стримерный канал, который развивается к противоположному электроду.

Резкое увеличение электрической прочности при $\tau < 10^5$ с связано с запаздыванием развития разряда, когда время воздействия напряжения становится соизмеримо с временем формирования разряда. Увеличение времени воздействия напряжения $\tau > 10^3$ с приводит к быстрому снижению $U_{пр}$ вследствие влияния влаги и волокон, а также образования газовых пузырьков. При дальнейшем увеличении времени воздействия напряжения решающее влияние на снижение $U_{пр}$ начинают оказывать тепловые процессы.

При длительном воздействии напряжения (область II) присутствие влаги, газа, загрязнений в жидком диэлектрике сильно снижает его электрическую прочность, причем наиболее опасным является эмульгированное стояние влаги. Пробой наступает вследствие образования цепочек из мелких поляризованных частиц включений, которые вытягиваются вдоль силовых линий. Эти цепочки образуют проводящий канал, по которым протекает ток, разогревающий воду и прилегающую к каналу жидкость до кипения. Пробой жидкости происходит по образовавшемуся газовому каналу.

Влияние материала, геометрии электродов, расстояния между ними и полярности

Геометрическая форма электродов создает поля разной степени неоднородности, и чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже пробивное напряжение. Даже незначительное увеличение радиуса кривизны электродов в резконеоднородных полях дает более существенное увеличение $U_{пр}$ по сравнению с воздухом. Увеличение расстояния между электродами S приводит к увеличению пробивного напряжения (рис. 1.25).

На величину пробивного напряжения при неизменном S оказывает влияние площадь электродов и объем жидкости между электродами: увеличение площади электродов и объема жидкости вызывает снижение $U_{пр}$. Состояние поверхности электродов также оказывает влияние на электрическую прочность $E_{пр}$ жидких диэлектриков. Загрязнение, окисление

и плохая полировка поверхности электродов снижают $E_{\text{пр}}$. По мере увеличения расстояния между электродами влияние материала электродов уменьшается и при расстоянии несколько миллиметров практически прекращается. Влияние материала электродов на $E_{\text{пр}}$ жидких диэлектриков осуществляется через эмиссию электронов с катода.

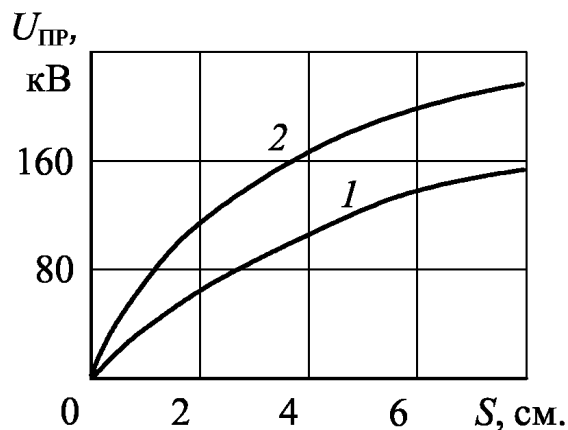


Рис. 1.25. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и полярности для трансформаторного масла, электроды острие-плоскость: 1 - положительная полярность острия; 2 — отрицательная полярность острия; напряжение постоянное

Как следует из рис. 1.25, пробивное напряжение зависит от полярности электрода-острия при несимметричной системе электродов. Наиболее ярко эта зависимость проявляется для полярных жидкостей. Например, для воды увеличение $U_{\text{пр}}$ при отрицательной полярности острия достигает 2,0-2,5 раз по сравнению с положительной полярностью.

Барьерный эффект

Барьеры из твердого изоляционного материала, устанавливаемые в масле между электродами, весьма широко применяются для повышения электрической прочности масляной изоляции.

При наличии барьеров электрическая прочность разрядного промежутка значительно возрастает. Это обусловливается двумя факторами. Барьер непроницаем для ионов жидкости. Поэтому ионы, двигаясь от одного электрода к другому, оседают на барьере, «растекаются» по его поверхности и заряжают ее. Благодаря этому, электрическое поле в промежутке становится более равномерным, что приводит к увеличению разрядного напряжения. Кроме этого, барьер затрудняет образование сплошных проводящих мостиков из волокнистых веществ, находящихся в масле. Действие барьеров более эффективно в неравномерных полях. При кратковременных импульсных воздействиях напряжения барьеры менее эффективны, чем на постоянном и переменном напряжениях.

На рис. 1.26 представлено относительное изменение пробивного напряжения $U_6 / U_{\text{пр}}$ ($U_{\text{пр}}$ - пробивное напряжение чисто масляного промежутка, а U_6 - пробивное напряжение того же промежутка с барьером) в зависимости от положения барьера S_6 / S (S — расстояние между электродами,

постоянно, а S_b - расстояние от острия до барьера) в масляном промежутке, образованном электродами острие-плоскость при воздействии переменного напряжения с частотой 50 Гц.

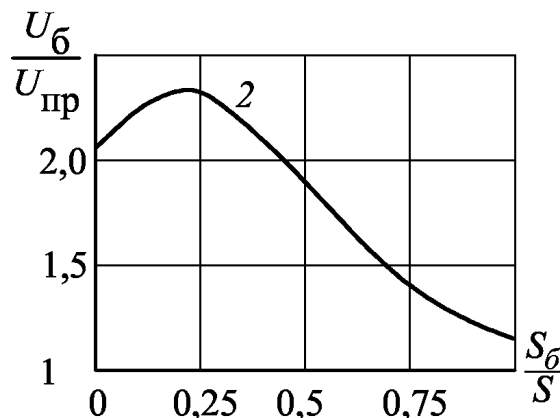


Рис. 1.26. Влияние барьера на пробивное напряжение масляного промежутка: электроды острие-плоскость; напряжение 50 Гц, $S=75$ мм

Барьер - плоский электрокартон толщиной 5 мм. Расстояние до барьера измеряется от острия. В данной системе координат пробивное напряжение масляного промежутка без барьера равно 1. Наличие барьера приводит к увеличению пробивного напряжения. Максимальный эффект соответствует расстоянию до барьера $S_b \approx 0,25 S$, что хорошо коррелирует с аналогичным эффектом для газа.

Маслобарьерная изоляция широко применяется в высоковольтной технике при изготовлении трансформаторов, вводов, реакторов и т.п.

Пробой твердой изоляции

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой

Электрическая прочность твердой изоляции зависит от:

- 1) формы электрического поля;
- 2) вида напряжения и полярности;
- 3) времени воздействия напряжения;
- 4) однородности диэлектрика;
- 5) электрофизических характеристик (полярный-неполярный, $\text{tg}\delta$, ϵ , γ и др.);
- 6) температуры.

Различают три вида пробоя твердого диэлектрика:

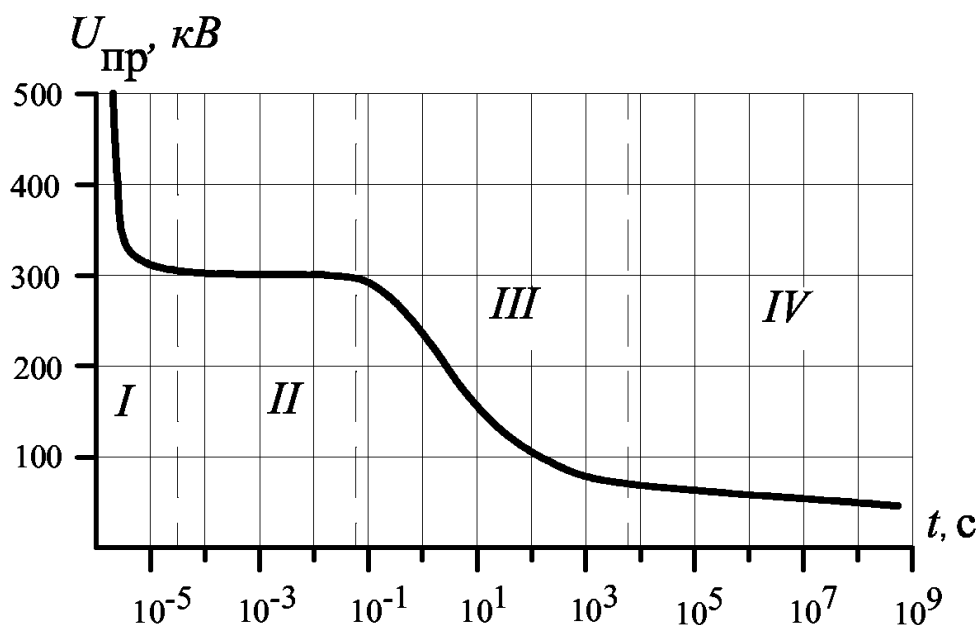
- 1) электрический — $E \sim 10 - 10$ кВ/мм;
- 2) тепловой — $E \sim 10 - 10$ кВ/мм;
- 3) старение — $E \sim 10$ кВ/мм и менее.

Твердая изоляция включает в себя все виды твердых диэлектриков от пленок до толстой монолитной.

Наиболее сильное влияние на электрическую прочность твердой изоляции оказывают время приложения напряжения, температура, толщина. Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения называется вольт-временной характеристикой. Она приведена на рис. 1.27.

На кривой выделяют 4 области. Области I и II соответствуют электрическому пробое. Время приложения напряжения $t < 0,1$ с. Резкое возрастание пробивного напряжения в I области обусловлено запаздыванием развития разряда относительно времени приложения напряжения. Область III характеризуется резким спадом пробивного напряжения, что говорит о преобладающей роли тепловых процессов. Область IV — медленное снижение пробивного напряжения с увеличением времени воздействия связано с медленными процессами старения, деградации твердой изоляции.

Электрическая прочность $E_{ПР}$ твердой изоляции возрастает с уменьшением ее толщины и особенно быстро в области микронных толщин. Этот эффект используют в изоляции конденсаторов, кабелей, вводов и др. Влияние температуры наглядно иллюстрируется рис. 1.28, где приведена зависимость электрической прочности фарфора от температуры. Видно, что до температуры $\sim +75^{\circ}\text{C}$ пробивная напряженность фарфора $E_{ПР}$ практически не изменяется (область А). Дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому уменьшению $E_{ПР}$ (область Б).



с. 7.27. Вольт-временная характеристика твердой изоляции: I — электрический пробой, запаздывание развития канала разряда; II — электрический пробой, $t < 0,1$ с, не зависит от температуры; III — тепловой пробой, $t > 0,1$ с, резкое снижение $U_{пр}$ во времени; IV — старение, $U_{пр}$ мало изменяется, а время до пробоя возрастает значительно

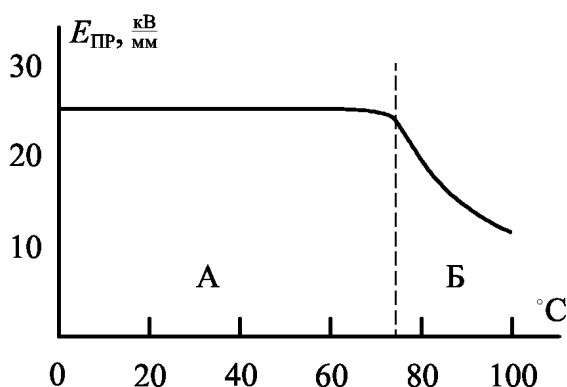


Рис. 1.28. Зависимость пробивного напряжения от температуры для фарфора (напряжение 50 Гц)

Суть теплового пробоя изоляции можно представить в виде рис. 1.29, где Q_1 — тепло, выделенное в изоляции за счет джоулевых и диэлектрических потерь, Q_2 — отводимое от изоляции тепло в окружающую среду.

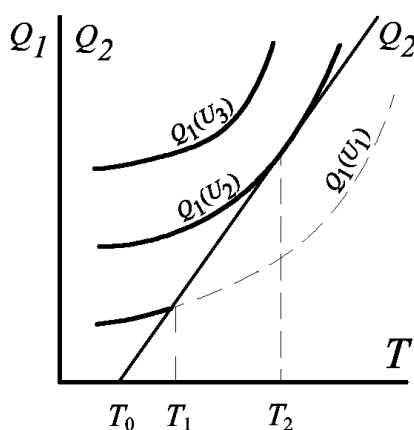


Рис. 1.29. Изменение выделенного Q_1 и отводимого изоляции при разных U

Частичные разряды

Под действием высокой напряженности электрического поля в изоляции в местах с пониженной электрической прочностью возникают частичные разряды (ЧР), которые представляют собой пробой газовых включений, локальные пробои малых объемов твердого диэлектрика.

Условия возникновения ЧР определяются конфигурацией электрического поля изоляционной конструкции и электрическими характеристиками рассматриваемой области изоляции.

ЧР обычно не приводят к сквозному пробую диэлектрика, однако приводят к местному разрушению изоляции, а при длительном существовании могут привести и к сквозному пробую.

Возникновение ЧР всегда свидетельствует о местной неоднородности диэлектрика. В связи с этим регистрация характеристик ЧР позволяет оценивать качество изготовления изоляции и выявлять местные дефекты.

Характеристики ЧР достаточно хорошо коррелируют с размерами и количеством дефектов, т. е. позволяют судить о степени дефектности изоляционной конструкции.

Изучение характеристик ЧР в зависимости от различных условий работы стало вопросом первостепенной важности для кабелей, конденсаторов, трансформаторов и других устройств — там, где применяется слоистая изоляция при переменном, постоянном, пульсирующем и импульсном напряжениях.

При рассмотрении механизма возникновения ЧР воспользуемся эквивалентной схемой замещения диэлектрика с общей емкостью C_0 (рис. 1.30).

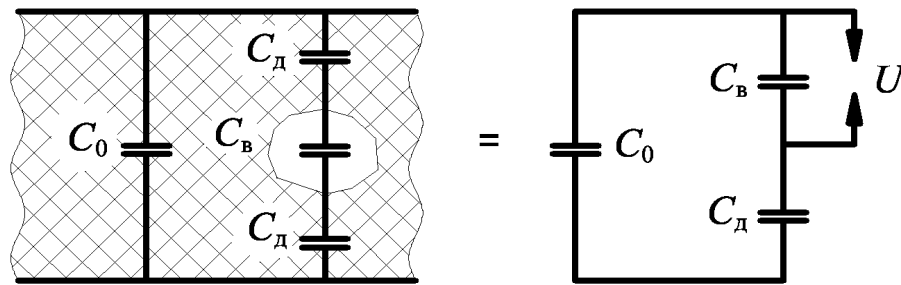


Рис 1.30. Схема замещения твердого диэлектрика: C_0 — емкость бездефектной изоляции; C_v — емкость воздушного включения; C_d — емкость диэлектрика последовательно с включением; U_v — напряжение пробоя воздушного включения

ЧР возникают тогда, когда напряжение на включении достигает пробивного значения $E_{пр}$ — напряжения зажигания разряда во включении. Напряженность электрического поля во включении E_v связана с напряженностью в остальной части диэлектрика.

Исходя из (1.49), напряженность электрического поля в газовом включении (и в любом другом, где $\epsilon_v < \epsilon_d$) всегда выше, чем в остальном диэлектрике.

Эпюры напряжения на включении в процессе приложения переменного напряжения приведены на рис. 1.31.

При размерах включения десятки микрометров и давлении близком к атмосферному, пробивное напряжение лежит вблизи минимума кривой Пашена, слабо изменяется с изменением размеров включения и составляет 250..300 В.

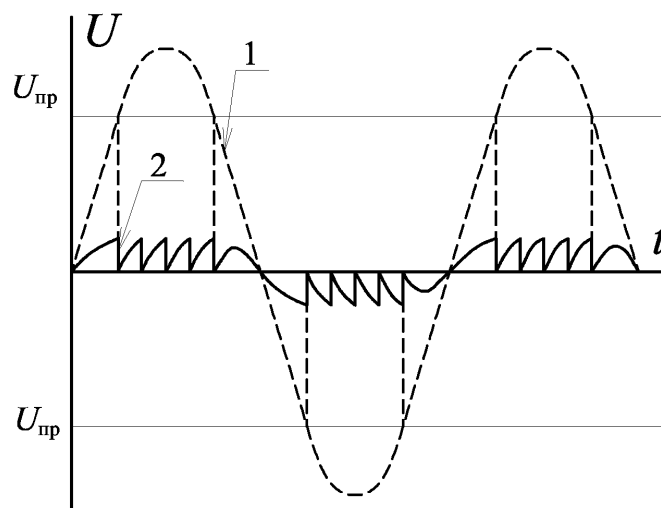


Рис. 1.31. Этюры напряжения на воздушном включении в твердом диэлектрике: 1 — напряжение на образце; 2 — напряжение на включении; $U_{пр}$ — напряжение на образце, при котором происходит пробой воздушного включения

Наибольшую опасность ЧР представляют на переменном или импульсном напряжении.

Разрушающее действие ЧР на диэлектрики обусловлено следующими факторами, возникающими при пробое включения:

- 1 — воздействие ударных волн;
- 2 — тепловое воздействие;
- 3 — бомбардировка заряженными частицами;
- 4 — воздействие химически активными продуктами разряда (озон, окислы азота);
- 5 — воздействие излучения;
- 6 — развитие древовидных побегов — дендритов.

В зависимости от величины заряда $q_{чр}$, измеряемого при ЧР, возможна классификация ЧР по $q_{чр}$:

1. При превышении некоторого порога напряжения в изоляции возникают ЧР с интенсивностью $q_{чр} = 10^{-11} \dots 10^{-12}$ Кл. Такие ЧР не вызывают быстрого разрушения изоляции и во многих случаях могут быть допустимы. Такие разряды называются начальными.

2. Дальнейшее возрастание напряжения или увеличение размеров включений в процессе длительной работы изоляции приводит к резкому возрастанию интенсивности ЧР, причем прежде всего возрастает $q_{чр}$ до величины $q_{чр} = 10^{-10} \dots 10^{-8}$ Кл. Их возникновение резко сокращает срок службы изоляции и они не должны допускаться при рабочих условиях. Такие разряды называются критическими.

На постоянном напряжении интервал между ЧР во включении составляет секунды-десятки секунд, что на несколько порядков больше, чем на переменном напряжении промышленной частоты. Это позволяет увеличить рабочие напряженности электроизоляционных конструкций постоянного напряжения по сравнению с переменным.

Развитие ЧР на импульсном напряжении принципиально не отличается от переменного напряжения. Часто основной причиной пробоя изоляции при многократном воздействии импульсного напряжения являются ЧР.

Тема 6. Основные виды внутренней изоляции и повышение ее электрической прочности (10 часов)

К диэлектрическим материалам, используемым для внутренней изоляции оборудования высокого напряжения, предъявляются высокие требования в отношении их электрических, тепловых, механических и других свойств.

Прежде всего материалы должны обеспечивать высокие— кратковременную и длительную — электрические прочности. Это означает, что они должны обладать определенным комплексом свойств: иметь высокие пробивные напряженности в области чисто электрического пробоя и малые диэлектрические потери (от них зависит напряжение теплового пробоя), иметь достаточную стойкость к воздействию частичных разрядов или обеспечивать отсутствие в изоляции газовых включений,

Тепловые свойства диэлектрических материалов (теплопроводность, стойкость к тепловому старению и др.) исключительно важны в связи с тем, что они ограничивают допустимые температуры активных частей оборудования и влияют на перепады температуры в изоляции. Следовательно, они предопределяют допустимые рабочие режимы оборудования в целом (допустимые рабочие токи, токи перегрузки и т.д.). Кроме того, от тепловых свойств материалов зависят степень пожаро- и взрывоопасности конструкции, объем и содержание защитных мероприятий. Высокие требования к механической прочности диэлектрических материалов обусловлены не только значительными нагрузками на изоляцию в эксплуатации, но и нагрузками, возникающими в процессе изготовления самой изоляции и конструкции в целом. Особенность этих требований состоит в том, что необходимо не просто обеспечить механическую целостность изоляции и всей конструкции, но и исключить появление в изоляции трещин, расслоений и других небольших дефектов, снижающих электрическую прочность.

Весьма важными являются требования к технологичности диэлектрических материалов. Кратко эти требования сводятся к тому, что материалы должны быть пригодными для высокопроизводительных процессов изготовления изоляции и всего оборудования или аппарата в целом,

Материалы для внутренней изоляции должны удовлетворять экологическим требованиям: они не должны содержать или образовывать в процессе эксплуатации токсичные продукты; после отработки всего срока службы они должны легко поддаваться переработке или уничтожению без загрязнения окружающей среды.

Наконец, диэлектрические материалы должны быть недефицитными и иметь такую стоимость, при которой достигаются требуемые экономические показатели оборудования.

В ряде случаев к указанным выше общим требованиям могут добавляться и другие, обусловленные спецификой того или иного вида оборудования.

Например, материалы для силовых конденсаторов должны иметь повышенную диэлектрическую проницаемость; материалы для камер выключателей — высокую стойкость к термоударам и воздействию электрической дуги.

Следует подчеркнуть, что все отмеченные выше группы требований относятся к категории главных, т.е. пренебрежение любыми из них приведет к тому, что конструкция высокого напряжения окажется либо неработоспособной, либо экономически или экологически неприемлемой. Многолетняя практика создания и эксплуатации оборудования высокого напряжения показала, что весь комплекс требований наилучшим образом удовлетворяется при использовании в составе внутренней изоляции комбинации из нескольких материалов, дополняющих друг друга и выполняющих несколько различные функции.

Целесообразность комбинирования материалов во внутренней изоляции строго может быть обоснована только путем анализа многих свойств различных вариантов изоляции и влияния этих свойств на показатели конкретных видов оборудования. Поэтому для краткости ограничимся некоторыми общими соображениями о преимуществах комбинированной изоляции.

Во всех случаях в состав внутренней изоляции должны входить твердые диэлектрические материалы, так как только они могут обеспечить необходимую механическую прочность изоляционной конструкции. Эти материалы имеют, как правило, и весьма высокую электрическую прочность. Однако твердые диэлектрические материалы обладают низкой теплопроводностью; в конструкциях со сложной конфигурацией электродов они требуют больших трудозатрат на механическую обработку. Главный же недостаток твердых материалов состоит в том, что трудно или даже невозможно обеспечить надежное сочленение деталей из таких материалов друг с другом или с электродами без воздушных зазоров, в которых под действием рабочего напряжения могут развиваться частичные разряды, вызывающие старение изоляции.

Указанные недостатки в значительной мере или полностью устраняются, если в комбинации с твердыми материалами использовать высокопрочные газы под давлением или жидкие диэлектрики. Газы и жидкости легко заполняют изоляционные промежутки любой конфигурации, могут заполнять тончайшие зазоры и щели, чем существенно повышают электрическую прочность, особенно длительную. Жидкие диэлектрики могут быть использованы в качестве теплоносителя в системе интенсивного охлаждения конструкции. Но для газов и жидких диэлектриков необходим корпус — резервуар (бак), а для жидких диэлектриков — еще и устройство для компенсации температурных изменений объема и специальные противопожарные мероприятия, так как большинство жидких диэлектриков являются горючими материалами. Поэтому иногда в составе внутренней изоляции применяют диэлектрические материалы, которые лишь в процессе

изготовления изоляции находятся в жидком состоянии, а затем отверждаются.

Ниже рассматриваются наиболее распространенные виды внутренней изоляции оборудования высокого напряжения энергосистем, целесообразность комбинирования материалов в которых подтверждена многолетней практикой. Следует, однако, отметить, что в ряде случаев комплекс высоких свойств изоляции может быть достигнут и при использовании одного материала. Примером тому служат силовые кабели на напряжения ПО и 220 кВ с изоляцией из вулканизированного полиэтилена,

МАСЛО-БАРЬЕРНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Основу масло-барьерной изоляции (МБИ) составляет минеральное (трансформаторное) масло, которое как маловязкая жидкость легко заполняет изоляционные промежутки с электродами любой конфигурации и обеспечивает хорошее охлаждение конструкции за счет самопроизвольной или принудительной циркуляции.

Масло-барьерная изоляция используется в качестве главной изоляции в силовых трансформаторах, автотрансформаторах и реакторах. В состав МБИ входят твердые диэлектрические материалы: электрокартон, кабельная бумага и др. Они используются для обеспечения механической прочности конструкции, а также для повышения электрической прочности МБИ. Необходимость в этом обусловлена тем, что в больших по объему изоляционных промежутках масло имеет относительно невысокую электрическую прочность (всего лишь в 2,5—3,0 раза большую, чем у воздуха при атмосферном давлении).

С целью повышения электрической прочности МБИ в масляных промежутках устанавливают барьеры из электрокартона толщиной 2,0—3,0 мм, покрывают электроды полимерными материалами или наносят на них слой бумажных лент.

Барьеры из электрокартона дают наибольший эффект, когда они расположены нормально к силовым линиям электрического поля. Поэтому в силовых трансформаторах они выполняются в виде цилиндров и угловых шайб.

Введение барьеров в масляный промежуток приводит к увеличению напряженности в масле на 5—7%, так как диэлектрическая проницаемость пропитанного маслом картона примерно в 1,5 раза выше, чем масла. Тем не менее барьеры повышают электрическую прочность МБИ на 30—50 %." Строгое объяснение барьерного эффекта для масляных промежутков пока отсутствует. Вероятнее всего роль барьера состоит в следующем. В технически чистом масле неизбежно присутствуют взвешенные твердые примесные частицы. Такие частицы в электрическом поле втягиваются в области повышенных напряженностей, которые образуются у поверхностей электродов (элементов обмотки) с наименьшими радиусами кривизны. Около частиц из-за различия диэлектрических проницаемостей происходит усиление электрического поля, что приводит к снижению электрической прочности масляного промежутка. Барьеры, разделяя промежуток на ряд

узких каналов, ограничивают количество примесных частиц, которые могут приближаться к электродам и участвовать в иницировании разрядного процесса.

Средством повышения электрической прочности МБИ служит также покрытие электродов сложной формы тонким слоем полимерного материала (поливинилбутирала— «бутвара»); а в случае электродов простой формы — изолирование их слоями бумажной ленты.

Технология изготовления МБИ включает сборку конструкции, сушку ее под вакуумом при температуре 100—120 °С и заполнение (пропитку) под вакуумом дегазированным маслом.

К достоинствам МБИ относятся сравнительная простота конструкции и технологии ее изготовления, интенсивное охлаждение активных частей трансформаторов (обмоток, магнитопроводов), а также возможность восстановления качества изоляции в эксплуатации путем сушки конструкции и замены масла.

Масло имеет меньшую электрическую прочность, чем твердая изоляция, поэтому при увеличении напряжения вначале происходит пробой наиболее нагруженного масляного промежутка (масляного канала). При этом ток в месте пробоя ограничивается сопротивлением последовательно включенной твердой изоляции и других масляных каналов и поэтому полной потери изоляционных свойств не происходит. Однако в месте разрядов в масле создаются необратимые повреждения твердой изоляции, снижающие ее длительную электрическую прочность. Поэтому кратковременную электрическую прочность масло-барьерной изоляции принято характеризовать пробивным напряжением первого масляного канала.

Напряжение пробоя первого масляного канала в масло-барьерной изоляции отличается от пробивного напряжения чисто масляных промежутков, поскольку условия формирования разряда зависят от емкости, через которую замыкается разрядный ток. Однако экспериментальные данные по пробивным напряжениям чисто масляных промежутков могут быть использованы для приближенного определения напряжения пробоя первого масляного канала. Для этого нужно рассчитать долю напряжения, приходящегося на масляный канал, с учетом различия диэлектрических проницаемостей масла и твердой изоляции. Более точное определение пробивных напряжений производится экспериментально на полномасштабных макетах изоляции.

Недостатками МБИ являются меньшая, чем у бумажно-масляной изоляции, электрическая прочность, пожаро- и взрывоопасность конструкции, необходимость специальной защиты от увлажнения в процессе эксплуатации.

Масло-барьерная изоляция, как уже отмечалось, используется в качестве главной изоляции, т. е. изоляции между обмотками разного напряжения, а также между обмотками и заземленными элементами конструкции, в силовых трансформаторах с номинальными напряжениями от 10 до 1150 кВ, в автотрансформаторах и реакторах высших классов напряжения. Ранее она

применялась и во вводах напряжения 110—220 кВ, однако теперь в них используется бумажно-масляная изоляция,

ТВЕРДАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Для создания изоляционных конструкций применяется широкий круг твердых диэлектрических материалов, отличающихся своим происхождением, структурой, физико-механическими свойствами и электрическими характеристиками. В изоляционных конструкциях твердый диэлектрик может использоваться отдельно, а также входить в состав комбинированной изоляции как одна из ее важнейших частей, поскольку твердая часть изоляции несет механическую нагрузку.

Таблица 1. Электрические характеристики твердых изоляционных материалов

Изоляционные материалы	*Пр' кВ/см	ε при 50 Гц	tg δ при 50 Гц
Неорганические материалы:			
электрофарфор	280—350	6,0—7,2	0,02—0,04
стеатит	380—500	6,5—7,0	0,0005—0,003
стекло и стеклотекстолит	100—480	6,0—8,0	0,003—0,05
сланцевые изделия	120—500	5,8—7,5	0,008—0,07
асбест	30—60	7,0—8,0	0,2—0,5
Органические материалы:			
на основе целлюлозы:			
бумаги и картоны фибра	100—500	2,2-2,7	0,001—0,03
гетинакс и текстолит	εк_70 160—200	5,0—8,0	0,02—0,18
пропитанная древесина	40—80	7,0—8,0	0,06—0,3
синтетические материалы:			
термопластичные (полиэтилен, полистирол, фторопласт и др.),	250-600	2,2-4,0	0,0001-0,0008
термореактивные (эпоксидные компаунды)	250—500	—	0,01—0,05

Одной из особенностей твердой изоляции является возможность ее теплового пробоя вследствие затрудненного теплоотвода. Поэтому твердые диэлектрики должны обладать малыми диэлектрическими потерями, высокой нагревостойкостью и хорошей теплопроводностью.

Твердая изоляция в отличие от газообразной и жидкой после пробоя не самовосстанавливается. Это свойство твердые диэлектрики придают также комбинированной изоляции, в состав которой они входят.

В табл. 1 приведены электрические характеристики некоторых твердых изоляционных материалов, при этом указанная в ней электрическая прочность относится к тонким образцам.

Неорганическая изоляция устойчива к внешним воздействиям, долговечна и имеет невысокую стоимость. Из керамических материалов отметим стеатит, изготавливаемый из талька, каолина и углекислого бария по технологии, аналогичной производству фарфора. Стеатит обладает механической прочностью, превышающей фарфор в 2—3 раза, малыми диэлектрическими

потерями и высокой теплостойкостью. Особенно низкий $\text{tg } \delta$ стеатит имеет при высоких частотах, поэтому он используется в основном для изоляции радиоустройств.

Стеклоткань, спрессованная в несколько слоев и пропитанная изоляционными смолами, называется стеклотекстолитом. Этот материал имеет высокую нагревостойкость и может надежно работать при температурах до 180 °С.

Слюда как диэлектрический материал обладает рядом ценных качеств, к числу которых относятся очень высокая электрическая прочность (при определенной ориентации электрического поля относительно кристаллической структуры), стойкость к воздействию частичных разрядов, высокая нагревостойкость. Эти качества делают слюду незаменимым материалом для изоляции статорных обмоток вращающихся машин с номинальными напряжениями до 36кВ.

Однако основные виды слюдяной продукции: слюда щипаная и слюдинитовая бумага-сами по себе непригодны для выполнения крупных изоляционных конструкций. Щипаная слюда — это пластинки небольших размеров толщиной от 0,005 до 0,045 мм; слюдинитовая бумага, получаемая из отходов слюдяного производства, имеет крайне низкую механическую прочность. Поэтому оба этих продукта используются в составе композиционных материалов: микаленты и слюдинитовой ленты.

Микалента представляет собой слой пластинок слюды, скрепленных лаком между собой и с подложкой из специальной бумаги или стеклоленты. Микалента используется для изготовления так называемой компаундированной изоляции. Технология изготовления такой изоляции включает следующие операции: намотку нескольких слоев микаленты на проводники обмотки, пропитку при нагреве под вакуумом битумным компаундом и опрессовку. Этот процесс повторяется после наложения каждых пяти-шести слоев до получения изоляции необходимой толщины.

Компаундированная изоляция используется до настоящего времени в машинах малой и средней мощности. Ее недостатки: недостаточная механическая прочность при нагреве из-за размягчения термопластичного компаунда, а также дефицитность и высокая стоимость основного компонента — щипаной слюды.

Более совершенной является изоляция, выполняемая из слюдинитовых лент и термореактивных пропиточных составов. Слюдинитовая лента состоит из одного слоя слюдинитовой бумаги толщиной 0,04 мм и одного или двух слоев подложки из стеклоленты толщиной 0,04 мм. Такая композиция обладает достаточно высокой механической прочностью (за счет подложек) и отмеченными выше качествами, характерными для слюды.

Из слюдинитовых лент и пропитывающих составов на основе эпоксидных и полиэфирных смол изготавливают термореактивную изоляцию, которая при нагреве не размягчается, сохраняет высокую механическую и электрическую прочность.

Возможны два способа изготовления такой изоляции. В первом варианте намотка осуществляется лентами, заранее пропитанными под вакуумом терморезактивным составом. После наложения необходимого количества слоев изоляция под вакуумом разогревается и опрессовывается до отверждения пропиточного состава. Во втором варианте намотка осуществляется сухой (непропитанной) лентой. Затем проводится сушка под вакуумом, пропитка горячим составом, нагнетаемым с избыточным давлением, и опрессовка до отверждения пропиточного состава. В обоих случаях режимы основных технологических операций выбираются так, что обеспечивается плотное прилегание слоев друг к другу и к проводникам обмотки, надежное заполнение терморезактивным составом всех зазоров между слоями и пор в самих лентах. Соответствующие виды терморезактивной изоляции у нас в стране называют «слюдотерм» и «монолит».

Терморезактивная изоляция значительно превосходит компаундированную по электрическим и механическим, свойствам; входящая в ее состав слюдинитовая бумага Н0 является дефицитной и значительно дешевле щипаной слюды. Терморезактивная изоляция используется в настоящее время в статорных обмотках всех крупных турбо- и гидрогенераторов, двигателей и синхронных компенсаторов с номинальными напряжениями до 36 кВ.

Асбест—негорючий и теплостойкий минерал. Благодаря волокнистой структуре из него изготавливаются ткани, листы, плиты и пр. Используется для нагревостойкой изоляции, предохранения от действия электрической дуги. и поэтому используется также в качестве полупроводящих покрытий и прокладок. Органическая изоляция создается на основе целлюлозы, синтетических материалов или каучука. Основным недостатком изоляции на основе целлюлозы являются ее высокая гигроскопичность и низкая нагревостойкость. Для уменьшения гигроскопичности бумагу пропитывают лаками и смолами. Пропитанные терморезактивной бакелитовой смолой и спрессованные листы бумаги после термообработки образуют монолитный материал с высокими механическими свойствами, называемый гетинаксом. Если же такой обработке подвергается хлопчатобумажная ткань, то получаемый материал называют текстолитом.

Бумага, обработанная хлористым цинком и спрессованная в виде листов или труб, называется фиброй. Этот материал поддается всем видам механической обработки и используется для изготовления крепежных деталей. При термическом разложении фибра выделяет большое количество газов, поэтому она используется для обеспечения дугогашения в трубчатых разрядниках.

Высушенная и пропитанная древесина твердых пород используется для изготовления крепежных деталей и прокладок. Из тонких листов древесного шпона после пропитки изоляционными смолами, прессования и термообработки получают дельта-древесину — листовой материал с высокими механическими свойствами и хорошими электрическими характеристиками.

Большой класс твердых изоляционных материалов составляют синтетические полимерные диэлектрики. Термопластичные материалы, размягчающиеся и плавящиеся при нагреве до нескольких сотен градусов, применяются для изготовления прессованных изделий и тонких пленок, полиэтилен нашел применение в качестве изоляции силовых кабелей напряжением до 35 кВ.

Компаунды на основе эпоксидной смолы являются термореактивными материалами: после нагрева они теряют пластичность, затвердевают и становятся нерастворимыми. Они используются для изготовления литой изоляции трансформаторов, аппаратов и герметизированных распределительных устройств.

Кратковременная электрическая прочность твердой изоляции, как следует из табл. 1, зависит от вида диэлектрика и изменяется в широких пределах.

Пробивное значение напряженности поля для тонких слоев (пленок) значительно выше, чем для больших толщин изоляции. Поэтому во многих случаях создается многослойная изоляция, например посредством намотки бумаги или; синтетической пленки. В реальной изоляции слои твердого диэлектрика, конечно, не склеиваются, а изоляция вакуумируется, сушится и пропитывается жидким или газообразным диэлектриком (минеральное масло, элегаз), чтобы исключить воздушные включения между слоями диэлектрика и связанные с ними частичные разряды.

БУМАЖНО-МАСЛЯНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Исходными материалами для изготовления бумажно-масляной изоляции (БМИ) служат кабельная или конденг саторная бумага и минеральное масло (трансформаторное, кабельное, конденсаторное). В ряде случаев используются минеральное (кабельное) масло с добавками канифоли, касторовое масло, синтетические жидкости.

Основу БМИ составляют слои бумаги. В зависимости от размеров и особенностей конструкции электродов (токоведущих частей) каждый слой бумаги может быть сплошным или состоять из отдельных лент. В первом случае используются рулоны бумаги достаточно большой ширины (до 3,5 м), во втором—ролики бумажной ленты шириной от 20 до 400 мм. Рулонная БМИ применяется в силовых конденсаторах и вводах (проходных изоляторах), ленточная - для изолирования электродов относительно сложной конфигурации или большой длины, например во вводах высших классов напряжения, в кабелях, обмоточных проводах для трансформаторов и т. д.

Слои ленточной изоляции образуются путем плотной намотки на электрод бумажной ленты внахлест (положительное перекрытие) или с зазором между соседними витками (отрицательное перекрытие). Первый вариант обычно используется при ручной намотке изоляции на изогнутые электроды, например на электроды тороидальной формы; второй — при наложении изоляции с помощью специальных намоточных станков, обеспечивающих такое взаимное расположение лент в соседних слоях, при котором зазоры между витками в одном слое надежно перекрываются лентами следующего слоя. Ленточная изоляция с отрицательным перекрытием используется в

кабелях, так как наличие небольших зазоров (1—2 мм) между витками в слое дает изоляции большую гибкость.

После плотной намотки необходимого числа слоев бумаги изоляция подвергается сушке под вакуумом при температуре 100—120 °С до остаточного давления 0,1—10 Па. Затем под вакуумом производится пропитка тщательно дегазированным маслом.

Бумажно-масляная изоляция многослойная. В такой изоляции случайный дефект твердого диэлектрика (бумаги) заведомо ограничен пределами одного слоя и многократно перекрывается другими слоями; вероятность совпадения дефектов в нескольких слоях оказывается ничтожно малой.

Бумажно-масляная изоляция имеет сложную структуру. При плотной намотке между слоями остаются тонкие (менее 0,01 мм) зазоры, обусловленные микронеровностями поверхностей бумаги. В самой бумаге имеется большое количество микропор между волокнами. В ленточной изоляции, кроме того, образуются небольшие зазоры, соседними витками ленты. В любом случае в БМИ создается система распределенных по всему объему и связанных зазоров и микропор, которые в целом занимают около 50 % объема изоляции. Благодаря этой системе при вакуумной, сушке обеспечивается удаление из изоляции воздуха и сорбированной влаги, а при пропитке — надежное заполнение всех зазоров и микропор маслом.

В силу отмеченных выше особенностей структуры БМИ имеет высокую кратковременную и длительную электрические прочности при больших толщинах и объемах изоляционной конструкции. По этому показателю она превосходит все другие виды внутренней изоляции, используемые в широких промышленных масштабах.

В настоящее время разновидности БМИ широко используются во многих видах оборудования высокого напряжения энергосистем: в силовых конденсаторах разного назначения, во вводах на напряжений от 110 до 1150 кВ, в силовых кабелях с номинальными напряжениями от 35 до 500 кВ, в силовых трансформаторах, автотрансформаторах и реакторах (в качестве витковой изоляции), в измерительных трансформаторах тока высших классов напряжения.

ГАЗОВАЯ И ВАКУУМНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Применение газовой изоляции дает ряд преимуществ по сравнению с твердыми и жидкими диэлектриками. В частности, газовая изоляция отличается очень малыми диэлектрическими потерями и практически не изменяет своих свойств в процессе эксплуатации. Применение ее приводит к резкому снижению массы конструкции. В ряде случаев конструкция устройства упрощается и становится пожаробезопасной.

При увеличении давления электрическая прочность элегаза (SF_6) и воздуха становится выше электрической прочности твердых и жидких диэлектриков, например минерального масла

Газы, используемые для изоляции установок высокого напряжения, должны быть химически стойкими в электрическом разряде и не должны выделять химически активных веществ; быть инертными и не вступать в реакции с

материалами, в сочетании с которыми они применяются; обладать низкой температурой сжижения, допускающей их применение при повышенных давлениях, и высокой теплопроводностью. Помимо этого они должны быть негорючими и нетоксичными, и иметь невысокую стоимость.

В настоящее время в качестве изоляции применяются воздух, азот и шестифтористая сера (элегаз). Из них наибольшей электрической прочностью, превышающей прочность азота и воздуха примерно в 2,5 раза, обладает элегаз. Причина этого заключается в том, что элегаз является электроотрицательным газом, в состав его молекулы SF_6 входит фтор - галоген, легко присоединяющий к себе электрон и образующий устойчивые ионы при увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально давлению и может, быть выше электрической прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков. Наибольшее рабочее давление, следовательно, наибольший уровень электрической прочности элегаза в изоляционной конструкции ограничивается с-возможностью сжижения элегаза при низких температурах. Так, температура сжижения элегаза при давлении 0,3 МПа составляет $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при 0,5 МПа повышается до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такие температуры у отключенного оборудования наружной установки вполне возможны зимой во многих районах; страны. В связи с этим большой интерес представляют смеси элегаза с азотом, у которых электрическая прочность лишь на 10—15 % ниже прочности чистого элегаза, а допустимое давление резко возрастает. Так, например, у смеси из 30 % элегаза и 70 % азота сжижение при температуре $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ наступает при давлении 8 МПа.

Для крепления токоведущих частей в комбинации с элегазом используются опорные изоляционные конструкции из литой эпоксидной изоляции. Основным материалом в ней является эпоксидная или эпоксидно-диановая смола. Качество таких опорных изоляторов и особенно их длительная электрическая прочность в сильной степени зависят от технологии подготовки материалов и заливки. Обязательными считаются сушка исходных материалов, тщательное перемешивание компаунда, вакуумирование объема формы, заливка и выдержка до отверждения при избыточном давлении. Эти мероприятия позволяют исключить в литой изоляции газовые включения и тем самым обеспечить высокий уровень ее длительной электрической прочности.

Элегазовая изоляция может быть использована только в герметичных конструкциях. Практика показала, что надежная герметизация конструкций с элегазом является сложной задачей, требующей пристального внимания. В современных элегазовых аппаратах утечка элегаза не превышает 1 % общей массы в год.

Высокая надежность элегазовой изоляции, как показывает опыт эксплуатации, обеспечивается при условии очень тщательной очистки от загрязнений всех элементов конструкции, соприкасающихся с элегазом. Небольшие количества пыли, мелкой металлической стружки, волокон пряжи или бумаги могут снизить кратковременную электрическую

прочность конструкции или вызвать появление в ней частичных разрядов. Последние опасны тем, что разлагают элегаз с образованием химически очень активных, а иногда и токсичных продуктов.

В настоящее время основной областью применения элегазовой изоляции являются комплектные распределительные устройства (КРУЭ) на напряжение ПО—220 кВ, наибольшее рабочее давление элегаза в которых 0,3 МПа. Сейчас разрабатываются КРУЭ на напряжение 1150 кВ, ведутся работы по созданию силовых кабелей с элегазовой изоляцией.

Элегаз является не только хорошей изолирующей, но и хорошей дугогасящей средой. Ток отключения в элегазе примерно в 10 раз больше, чем в воздухе. Если же учесть, что в элегазе скорость восстановления электрической прочности после погасания дуги почти на порядок выше, чем в воздухе, то из этого следует, что мощность отключения в элегазе может быть почти в 100 раз больше, чем в воздухе. По этой причине элегазовые выключатели успешно конкурируют с воздушными выключателями:

Воздух под избыточным давлением в несколько атмосфер используется в основном в образцовых конденсаторах на напряжение до 35 кВ. Ограниченное применение воздуха связано с тем, что при частичных разрядах в воздухе образуется озон, вызывающий коррозию металлов и разрушение твердых диэлектриков.

Азот и элегаз применяются для изоляции конденсаторов, трансформаторов, кабелей и герметизированных распределительных устройств.

Характерной особенностью электроотрицательных газов (элегаза, воздуха) под давлением является наличие максимума в зависимости пробивного напряжения промежутков с резконеоднородным полем от давления (рис. 12.6). Такое явление наблюдается при переменном напряжении, а также при постоянном напряжении и положительной полярности электрода с высокой кривизной поверхности. При импульсных напряжениях максимум выражен слабо. Объясняется это возникновением вблизи электрода с большой кривизной в результате ионизации положительного объемного заряда. Диффузия этого заряда затруднена из-за, повышения давления, и он как бы увеличивает радиус кривизны электрода, выравнивая электрическое поле, вследствие чего пробивное напряжение повышается. При дальнейшем росте давления после значения, соответствующего максимуму U_{np} , вследствие увеличивающегося поглощения фотонов и усиления фотоионизации изменяется механизм разряда: из лавинного он становится стримерным, и пробивное напряжение достаточно резко снижается. Под нарушением электрической прочности вакуумной изоляции понимают те явления, которые ограничивают подъем напряжения на электродах в данной конкретной установке. В одном случае это пробой при быстром подъеме напряжения, в других — возникновение изредка импульсов тока при длительном приложении напряжения или появление темновых токов. Таким образом, в зависимости от требований, предъявляемых к вакуумной изоляции, в понятие электрической прочности может вкладываться разный смысл.

Отличительной чертой вакуумной изоляции являются очень большие разбросы пробивных напряжений и напряжений появления темновых и импульсных токов (измеренные значения могут отличаться друг от друга в 1,5—3 раза), что объясняется особенностями микроструктуры поверхности электродов в их чистоте (адсорбционные и окисные пленки). Характеристики поверхности зависят от материала и чистоты обработки электродов и могут изменяться при воздействии разрядов. Недостатком вакуумной изоляции являются конструктивные сложности получения высокого вакуума и сложная технологическая обработка токоведущих частей.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРНЫХ ОБКЛАДОК

Регулирование электрического поля в конструкциях с бумажно-масляной изоляцией может осуществляться с помощью так называемых конденсаторных **обкладок** представляющих собой дополнительные электроды из таллической фольги, которые располагаются в толще изоляции между главными электродами. В результате образуется цепочка последовательно включенных конденсаторов, емкости которых при переменном напряжении (или сопротивлении изоляции между обкладками при постоянном напряжении) определяют распределение напряженностей в изоляции.

Путем изменения размеров, числа и взаимного расположения конденсаторных обкладок можно изменять емкости последовательно включенных конденсаторов, регулируя тем самым характер распределения напряженностей.

Отметим, что с помощью конденсаторных обкладок можно также регулировать электрическое поле и во вводах с масло-барьерной изоляцией. В этом случае обкладки располагают на барьерах цилиндрической формы. Поскольку число барьеров во вводах невелико, регулирование получается более грубым, чем во вводах с бумажно-масляной изоляцией.

На краях тонких обкладок из фольги напряженности электрического поля велики, и в этих местах возникают частичные разряды. Для того чтобы исключить их или по крайней мере уменьшить размеры области, в которой они возникают, увеличивают радиус закругления края обкладки, например путем заворачивания его, а также располагают между краями обкладок дополнительные электроды, как показано на рис. 13.2, б. С помощью этих электродов удается более равномерно распределить напряжение между краями соседних обкладок и уменьшить напряженность поля у краев основных обкладок.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

В тех случаях, когда электрод с острой кромкой находится в газе или жидкости или примыкает к поверхности твердой изоляции, скругление края электрода приводит к образованию узкой щели между электродом и твердой изоляцией. При этом эффект от скругления края электрода получается существенно меньше, так как напряженность в щели возрастает из-за

различия диэлектрических проницаемостей газа (жидкости) и твердой изоляции.

ДОПУСТИМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Внутренняя изоляция оборудования энергосистем должна надежно выдерживать грозовые и внутренние перенапряжения. Это означает, что перенапряжения не должны приводить к полному пробое внутренней изоляции, а также к появлению в ней каких-либо местных повреждений, влекущих за собой сокращение срока службы изоляционной конструкции. Такие повреждения при перенапряжениях могут быть вызваны частичными разрядами (см. гл. 18). Например, опасные повреждения возможны в конструкциях с бумажно-масляной изоляцией в резконеоднородном электрическом поле, а также в маслобарьерной изоляции силовых трансформаторов при частичных разрядах в виде пробоя первого масляного канала.

Таким образом, кратковременная электрическая прочность внутренней изоляции, или ее способность выдерживать воздействие перенапряжений, не всегда характеризуется напряжением полного (сквозного) пробоя, в ряде случаев она определяется напряжением появления частичных разрядов с опасной для данной изоляции интенсивностью.

Это обстоятельство имеет большое практическое значение. Например, при заводском контроле изоляционных конструкций отсутствие пробоя во время приложения испытательного напряжения отнюдь не означает, что испытания прошли успешно. Необходимо еще убедиться в том, что под действием испытательного напряжения в изоляции появились частичные повреждения. С этой целью до и после приложения испытательного напряжения состояние изоляции обязательно контролируется с использованием методов, позволяющих обнаружить местные дефекты (например, по характеристикам частичных разрядов).

В диапазоне времен воздействия, характерных для Г] зовых и внутренних перенапряжений, кратковременная электрическая прочность большинства видов внутренней изоляции сложным образом зависит от длительности приложенного напряжения. Для практических целей проектирования изоляционных конструкций обычно используют данные о кратковременной электрической прочности при стандартных грозовых импульсах напряжения и при плавном или ступенчатом подъеме напряжения частотой 50 Гц.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КРАТКОВРЕМЕННУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Кратковременная электрическая прочность внутренней изоляции любого типа зависит от многих конструктивных и технологических факторов. Соответствующие зависимости, необходимые для разработки новых конструкций, технологии их изготовления и правил ведения эксплуатации оборудования, определяются экспериментальным путем. Из-за высокой стоимости высоковольтных изоляционных конструкций и больших разбросов значений U_n и U_{50} выявление и достоверное определение

требуемых для практики зависимостей связано со значительными затратами средств и времени. Поэтому накопление экспериментальных данных о кратковременной электрической прочности любой несамовосстанавливающейся изоляции идет обычно очень медленно. Для наиболее распространенных видов внутренней изоляции накоплено уже сравнительно много опытных данных, выявлены важнейшие зависимости, в ряде случаев. Однако даже для этих видов изоляции влияние некоторых факторов оценено лишь качественно или весьма приближенно.

Тема 7. Изоляция устройств высокого напряжения (10 часов)

Вводы — это проходные изоляторы на 110кВ и выше. Они содержат внешнюю и внутреннюю изоляцию сложной конструкции. Внешней изоляцией является фарфоровая покрывка. Внутренняя - участки изоляции в теле ввода. Вводы бывают двух типов - маслобарьерные и бумажномасляные (для $U_H \geq 220$ кВ).

1) Маслобарьерный ввод 110-150 кВ конденсаторного типа (рис 2.3). Чтобы повысить $U_{пр}$, а) разбивают промежуток на n малых промежутков барьерами 5; б) выравнивают поле металлическими обкладками (фольга на барьерах). В результате $U_{пр}$ повышается в $\sim 2,5$ раза.

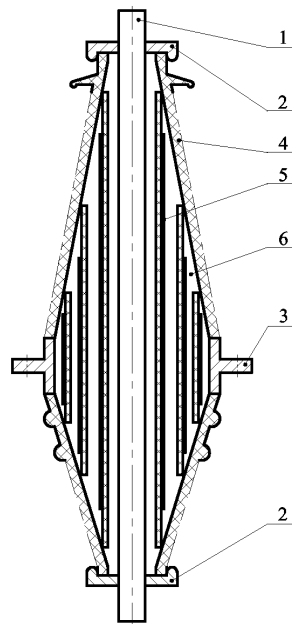


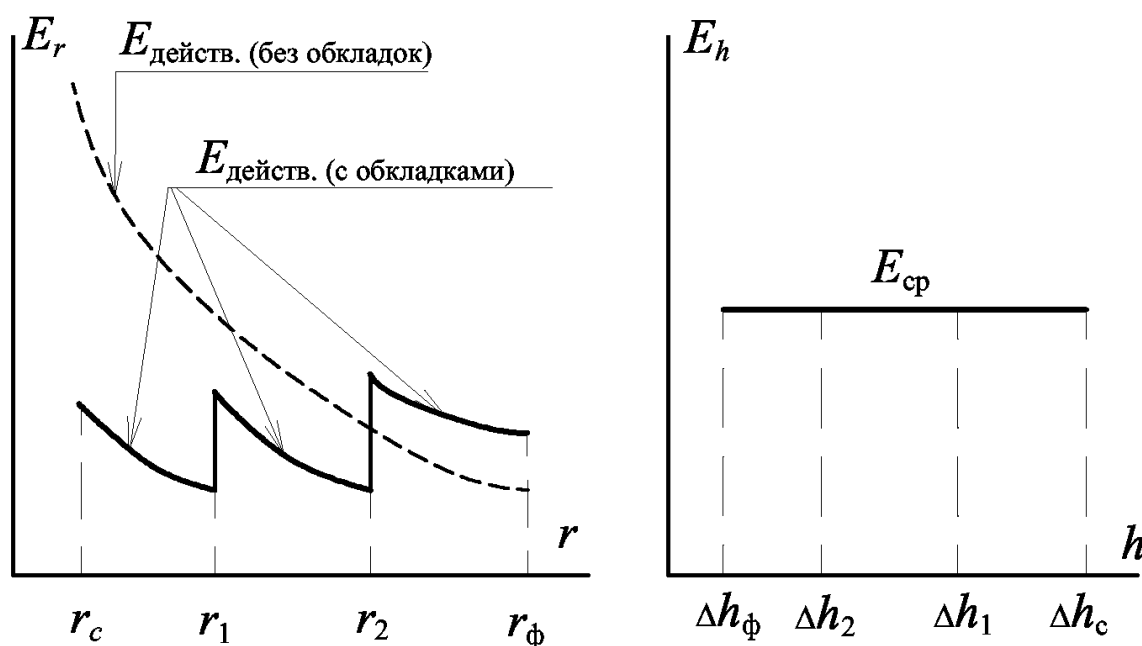
Рис. 2.3. Конструктивная схема маслобарьерного ввода: 1 — токопровод (стержень), 2 — высоковольтный фланец, 3 — заземленный фланец, 4 — фарфоровая рубашка, 5 — барьеры с обкладками, б—масло

Обкладки выравнивают поле в радиальном и аксиальном направлениях. Наиболее важно выровнять поле в аксиальном направлении для уменьшения длины ввода, для этого уступы делают одинаковыми. На рис. 2.4 приведены эпюры распределения напряженностей электрического поля в радиальном (а) и аксиальном (б) направлениях масло-барьерного ввода.

Токоведущий стержень обматывается несколькими слоями бумаги. Основную электрическую прочность изоляции ввода обеспечивает масло, находящееся внутри покрышки.

2) Бумажномасляный ввод конденсаторного типа на класс напряжения $U > 220$ кВ. Ввод изготавливается путем намотки на токоведущий стержень (или трубу) изоляционного тела из бумаги. Через каждые 2-4 мм намотки бумаги в тело закладываются конденсаторные обкладки из алюминиевой фольги для выравнивания поля в осевом и радиальном направлениях. После намотки тело пропитывается маслом в вакууме, а после сборки ввод герметизируется. Обкладки выравнивают поле в радиальном и аксиальном направлениях. Наиболее важно выровнять поле в аксиальном направлении для уменьшения длины ввода, для этого уступы делают одинаковыми. На рис. 2.4 приведены эпюры распределения напряженностей электрического поля в радиальном (а) и аксиальном (б) направлениях масло-барьерного ввода.

Токоведущий стержень обматывается несколькими слоями бумаги. Основную электрическую прочность изоляции ввода обеспечивает масло, находящееся внутри покрышки.



r_c — радиус первой обкладки (фольги); r_2 — радиус второй обкладки (фольги); r_ϕ — радиус обкладки у фланца (заземлена); Δh_c — длина уступа изоляции у стержня; Δh_1 — длина уступа на первом барьере; Δh_2 — длина уступа на втором барьере; Δh_ϕ — длина уступа на барьере у фланца

Изоляция трансформаторов

В силовых трансформаторах изоляция состоит из различных по конструкции элементов, работающих в разных условиях. Воздушные промежутки между вводами и по их поверхности — внешняя изоляция. Изоляционные участки расположенные внутри бака трансформатора и внутри вводов — внутренняя изоляция. Внутренняя изоляция подразделяется

на главную и продольную. Главная изоляция — между разными обмотками, стенками бака, магнитопроводом и др. Продольная изоляция между элементами одной и той же обмотки: между витками, слоями, катушками.

В высоковольтных силовых трансформаторах в качестве главной используется маслбарьерная изоляция. Продольная изоляция выполняется бумажно-масляной. Количество барьеров зависит от номинального напряжения трансформатора.

На рис. 2.6 приведено схематическое устройство главной изоляции высоковольтного трансформатора.

Высоковольтные обмотки выполняются катушечного типа или непрерывной цилиндрической многослойной намоткой.

Трансформаторы до 35 кВ выполняются с изолированной нейтралью. Трансформаторы свыше 110 кВ — с заземленной нейтралью.

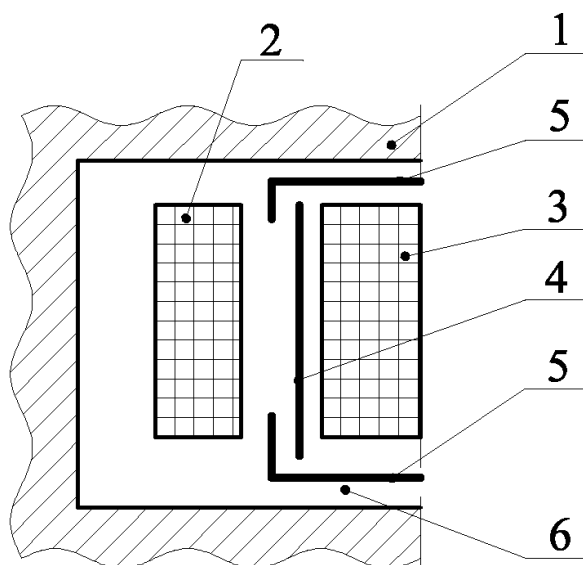


Рис. 2.6. Схема устройства изоляции высоковольтного трансформатора: 1 — магнитопровод, 2 — низковольтная обмотка (НВ), 3 — высоковольтная обмотка (ВВ), 4 — барьер, 5 — цитки электроизоляции, 6 — масло

Изоляция кабелей

Основное назначение кабелей — передача электрической энергии от подстанции к потребителям.

Силовые кабели высокого напряжения выполняются трех типов:

- 1) кабели с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой на напряжение до 35 кВ (рабочая напряженность $E_{\text{РАБ}} = 2 \dots 3$ кВ/мм);
- 2) кабели с бумажной изоляцией с пропиткой маслом под давлением — маслonaполненные кабели: 2...3 атм — низкое давление ($E_{\text{РАБ}} = 3 \dots 5$ кВ/мм); 4...5 атм — среднее давление ($E_{\text{РАБ}} = 6 \dots 8$ кВ/мм); 8... 15 атм — высокое давление ($E_{\text{РАБ}} = 10 \dots 15$ кВ/мм);
- 3) кабели с монолитной полимерной изоляцией (полиэтилен, фторопласт и др.).

Кроме этого нашли применение кабели в трубах под давлением масла или газа. Разрабатываются криогенные кабели с охлаждением до температуры жидкого азота (77 К) или жидкого гелия (5 К). Кабели выполняются на напряжение до 500 кВ. Разрабатываются кабели на напряжение 750-1150 кВ.

На рис. 2.7 приведена схема устройства трехфазного кабеля с поясной изоляцией. Выпускаются на рабочее напряжение до 10 кВ. На 35 кВ выпускаются кабели с отдельно освинцованными жилами и броней из стальных лент типа АОСБ (А — алюминиевая жила, О — отдельно освинцованные жилы, СБ — броня стальными лентами).

На рис. 2.8 приведена схема устройства маслонаполненного кабеля на рабочее напряжение 110 кВ. Как правило, выполняются однофазными в свинцовой оболочке с броней из круглых или плоских проволок. Например, типа МССК-110 — М — маслонаполненный; С — среднего давления; С — свинцовый экран; К — броня круглой стальной проволокой.

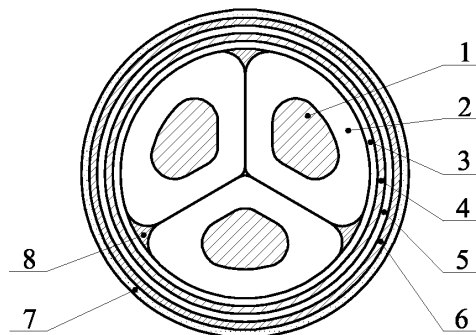


Рис. 2.7. Схема устройства изоляции кабелей до 35 кВ: 1 — жила, 2 — фазная изоляция, 3 — поясная изоляция, 4 — герметичное покрытие, 5 — подушка, 6 — броня, 7 — антикоррозионное покрытие, 8 — наполнитель (джут)

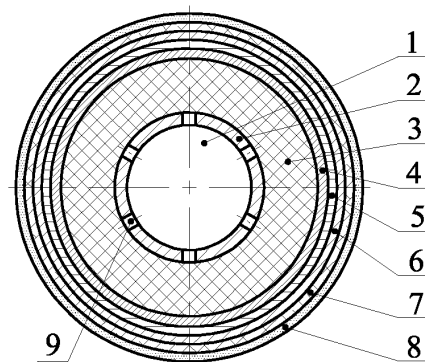


Рис. 2.8. Схема устройства изоляции кабеля 110 кВ: 1 — масляный канал, 2 — перфорированная токоведущая жила, 3 — бумажно-масляная изоляция, 4 — полупроводящий слой, 5 — герметичное покрытие, 6 — подушка, 7 — броня, 8 — антикоррозионное покрытие, 9 — отверстия для прохода масла в изоляцию

Изоляция электрических машин

К вращающимся машинам высокого напряжения относятся турбо- и гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и двигатели большой мощности с номинальным напряжением 3 кВ и выше. Они выполняют важные функции в энергосистемах и на промышленных предприятиях. К их изоляции предъявляются очень высокие требования. Гидрогенераторы разрабатываются и изготавливаются на напряжение до 220 кВ. Устройство изоляции вращающейся машины высокого напряжения определяется конструкцией ее статорной обмотки. Изоляция статорных обмоток подразделяется на главную (корпусную) и продольную. Главная — изоляция между проводниками обмотки и корпусом, а продольная — между витками одной катушки и катушками в одном пазу.

Большое значение имеет регулирование электрического поля в изоляции статорной обмотки. Основная задача регулирования электрических полей — устранение частичных разрядов в воздушных зазорах между поверхностью изоляции и стенками пазов и устранение скользящих разрядов по поверхности изоляции в местах выхода обмоток из паза статора, где поле получается резконеоднородным. Для этого используются полупроводящие покрытия из железистой асбестовой ленты и различные лаки. На рис. 2.9 приведено устройство высоковольтной изоляции в пазу электрической машины.

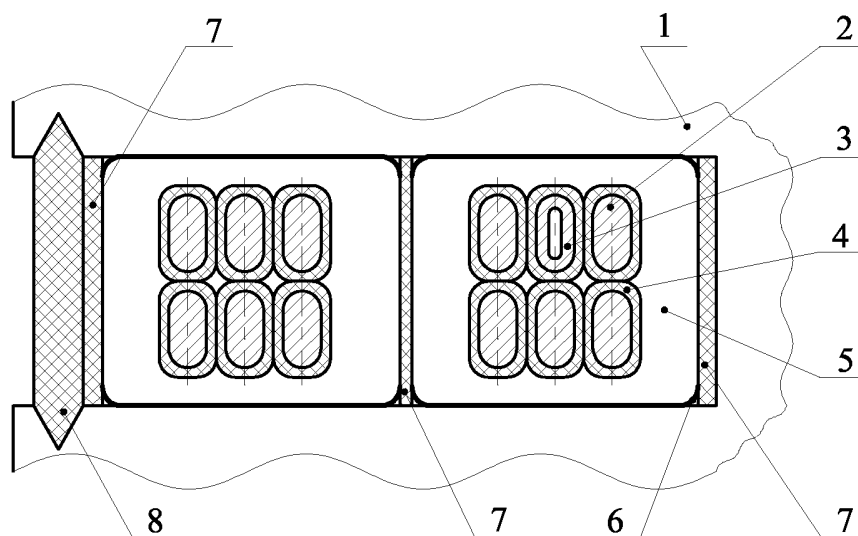


Рис. 2.9. Схема устройства высоковольтной изоляции электрической машины: 1 — статор, 2 — проводник сплошной, 3 — проводник полый, 4 — витковая (продольная) изоляция, 5 — главная корпусная изоляция, 6 — полупроводящее покрытие, 7 — прокладки, 8 — клин

Изоляционные материалы, которые используются в электрических машинах, изготавливают на основе слюды (миканит, микаленты, микафорий), широко используются компаунды (термопластичные), в качестве связующих применяют терморезистивные лаки и смолы.

Тема 8. Изоляция воздушных линий электропередачи. (4 часа).

Внешняя изоляция воздушных линий электропередачи и распределительных устройств (РУ), состоит из ряда чисто воздушных промежутков между проводами или шинами разных фаз и заземленными конструкциями, а также воздушных промежутков вдоль поверхностей изоляторов, на которых крепятся провода или шины. Кроме того, в РУ к ней относится внешняя изоляция оборудования, присоединенного к шинам подстанции.

Воздушные линии и РУ имеют и внутреннюю изоляцию. На линиях ее составляет внутренняя изоляция линейных изоляторов а в РУ — внутренняя изоляция различных изоляторов и высоковольтного оборудования: силовых и измерительных трансформатор, коммутационных аппаратов и т. д.

При использовании стандартного оборудования и изоляторов проектирование изоляции воздушных линий и РУ сводится к определению необходимых изоляционных расстояний по воздуху и выбору изоляторов для крепления проводов или шин.

Изоляцию линий электропередачи в пролетах между опорами образуют воздушные промежутки провод — земля, провод — провод и провод — трос. Первый из них имеет минимальную длину в середине пролета и выбирается с учетом возможного сокращения изоляционного расстояния при проезде под линией транспорта. Расстояния между фазами определяются необходимой электрической прочностью изоляции и требованиями безопасности при подъеме монтера на стойку- опоры для проведения работ под напряжением. По условиям безопасности расстояния от проводов (или арматуры) до ближайших частей опоры должны быть, например, на линиях 330 кВ не менее 2,8 м, а на линиях 500 кВ — не менее 5,3 м. При этом должна быть еще учтена возможность отклонения гирлянд изоляторов под действием ветра.

Изоляция линий на опорах включает в себя, помимо изоляторов ряд воздушных промежутков, число которых зависит от конструкции опор и определяется возможными путями развития разряд. Так, на металлических и железобетонных опорах может происходить пробой воздушного промежутка между проводом и одним элементов конструкции опоры или перекрытие гирлянды. На линиях с деревянными опорами, кроме изоляторов, дополнительной изоляцией служат деревянные стойки и траверсы.

Пути, по которым может произойти развитие разряда во внешней изоляции РУ, определяются взаимным расположением шин и заземленных конструкций (порталов и т. д.), размещением и конструктивными особенностями высоковольтного оборудования.

На воздушных линиях и в РУ в настоящее время применяются фарфоровые и стеклянные изоляторы нескольких типов. В последние годы большое внимание уделяется разработке траверс из изоляционных материалов, применение которых позволит уменьшить габариты и стоимость опор воздушных линий электропередачи. Наиболее перспективными материалами для этих целей считаются эпоксидные компаунды, армированные для повышения механической прочности стекловолокном. Основная трудность

состоит в создании компаундов с достаточно высокой трекинговой стойкостью. У нас в стране ведутся также разработки элементов опор из изоляционного бетона.

Некоторые конструкции изоляционных траверс проходят уже проверку в условиях эксплуатации. При проектировании воздушных линий 330 кВ и более высоких классов напряжения считается допустимым 0,1—0,2 отключения на⁵ 100 км линии в год; для линий . более низкого напряжения допускается большее число отключений.

К внешней изоляции РУ предъявляются более высокие требования в отношении надежности, так как при аварийном отключении шин подстанции ущерб значительно больше, чем при отключении линии. Вместе с тем внешняя изоляция РУ работает в условиях более благоприятных, нежели изоляция линий: относительно небольшая площадь РУ надежно защищается от прямых ударов молнии, амплитуды волн грозовых перенапряжений, приходящих с воздушных линий, ограничиваются вентильными разрядниками. Последние устанавливаются для защиты внутренней изоляции наиболее дорогостоящего оборудования — силовых трансформаторов, реакторов и т. д., но защищают и внешнюю изоляцию РУ. В случае закрытых РУ, когда ошиновка и высоковольтное оборудование размещаются в специальных помещениях, исключается возможность сильного загрязнения и увлажнения поверхностей изоляторов.

РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ И АППАРАТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Электрическая прочность внешней изоляции линейных и аппаратных изоляторов, существенно зависит от состояния их поверхностей и от вида воздействующего напряжения.

Перекрытие изолятора наружной установки может произойти и при рабочем напряжении, если его поверхности достаточно сильно загрязнены и увлажнены. В таких условиях на линиях 330 кВ и более высоких классов напряжения на ближайших к проводам изоляторах гирлянд рабочее напряжение будет достаточным для появления короны. Однако на таких линиях применяются расщепленные провода, емкость изоляторов относительно которых значительно больше. Поэтому распределение напряжения вдоль гирлянды получается более равномерным, и корона при «хорошей» погоде на изоляторах отсутствует.

В случае необходимости дополнительной мерой регулирования распределения напряжения по изоляторам гирлянды может служить специальная арматура в виде колец, восьмерок или овалов, укрепляемая на конце гирлянды со стороны провода. Такая арматура увеличивает емкость изоляторов по отношению к проводу, благодаря чему падение напряжения на ближайших к проводу изоляторах уменьшается.

Приведенные выше рассуждения относятся к гирляндам, изоляторы которых имеют сухие и чистые поверхности. При смачивании изоляторов дождем, а также при загрязнении их проводящими осадками распределение

напряжения определяется главным образом проводимостями по поверхностям изоляторов и чаще всего имеет более равномерный характер. Для линейных и аппаратных изоляторов всех типов и классов напряжения достаточно полной характеристикой электрической прочности их внешней изоляции при воздействии кратковременных перенапряжений являются значения испытательных напряжений — импульсных и промышленной частоты, прикладываемых при сухом состоянии поверхностей и под дождем. Число аварийных отключений из-за перекрытия изоляторов всех видах воздействующих напряжений и всех возможных изменениях метеорологических условий должно быть достаточно мало. В связи со случайным характером процессов, приводящих к перекрытиям и аварийным отключениям, задача выбора изоляторов для линий и РУ в полном объеме должна решаться, очевидно, статистическими методами с использованием функции распределения максимальных значений перенапряжений, параметров, характеризующих метеорологические условия, и т.д. Однако опыт проектирования и эксплуатации линий и РУ показывает, что определяющим является условие выбора изоляторов по рабочему напряжению. Число же отключений при перенапряжениях либо оказывается незначительным, либо его целесообразнее ограничивать до приемлемых значений с помощью средств грозозащиты, дугогасящих аппаратов, АПВ и др.

Методика определения степени загрязненности атмосферы, учитывающая все возможные источники загрязнения — промышленные предприятия, засоленные почвы и засоленные водоемы, подробно изложена в «Руководящих указаниях по выбору и эксплуатации изоляции в районах с загрязненной атмосферой». Первая, наименьшая степень загрязненности атмосферы соответствует районам с обычными полевыми загрязнениями: леса, тундра, лесотундра, луга, болота; вторая степень — земледельческим районам, в которых применяются химические удобрения, гербициды и другие; химические вещества.

Степень загрязненности атмосферы вблизи промышленных предприятия устанавливается в зависимости от вида производства.

расстояния между источником загрязнений и воздушной линией или открытым РУ. По опасности уносов для внешней изоляции промышленные предприятия подразделяются на группы А, Б, В, Г и Д в порядке возрастания опасности. Для отдельных видов предприятий и производств установлены так называемые минимальные защитные интервалы M , т. е. размеры зоны, окружающей предприятие, за пределами которой степень загрязненности атмосферы не превышает I и II. Величина M в зависимости от вида и объема производства лежит в пределах от 300 до 9000 м.

Рекомендуемые ПУЭ числа изоляторов в гирляндах для линий и РУ разных классов напряжения с изоляцией нормального исполнения приведены в табл. 6-3. Для районов с другими условиями загрязнения числа изоляторов в гирляндах определяются по (6-8) и нормам на Y_3 .

Следует отметить, что принятая в настоящее время методика выбора числа изоляторов в гирляндах по условию (6-8) не исключает проверку электрической прочности гирлянд при перенапряжениях и разных метеорологических условиях. Такая проверка может быть проведена, например, по (6-9) с учетом (6-5), а также соотношений между мокроразрядным напряжением гирлянды и ее разрядным напряжением при коммутационных импульсах. Она необходима при проектировании линий и РУ, расположенных в районах с чистой атмосферой, для которых число изоляторов в гирляндах, выбранное по рабочему напряжению; может быть уменьшено по сравнению с данными табл. 6-3.

При грозových перенапряжениях характер распределения приложенного напряжения изменяется: на первый план выступает соотношение емкостей гирлянды и траверсы. В этом случае траверса воспринимает значительно большую долю напряжения, и импульсная прочность линейной изоляции существенно повышается. Для ориентировочных расчетов дополнительную импульсную прочность, создаваемую деревянной траверсой, принимают равной 100 кВ на 1 м пути разряда по этой траверсе.

Сравнение показывает, что 50%-ное импульсное разрядное напряжение изоляции на деревянных опорах выше, чем на металлических или железобетонных. В рассматриваемом примере эта разница составляет около 130 кВ (50%-ное импульсное разрядное напряжение гирлянд из семи изоляторов ПФ6-А, которые применяются на линиях 110 кВ с металлическими опорами, равно 570 кВ). В связи с этим линии на деревянных опорах обладают лучшими грозозащитными характеристиками, чем линии на металлических и железобетонных опорах.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НА ОПОРАХ МИНИМАЛЬНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАССТОЯНИИ

Воздушные промежутки между проводами и заземленными частями опор должны иметь электрическую прочность не меньше, чем гирлянды изоляторов. Если воздушная линия проходит в местности с очень низкой грозовой деятельностью и редко подвергается грозovým перенапряжениям, то импульсная прочность ее изоляции, не имеет значения. В таких случаях минимальные изоляционные расстояния на опорах выбираются так, чтобы их прочность не была ниже мокроразрядных напряжений гирлянд, т. е. выбираются по значению внутренних перенапряжений. На линиях электропередачи, подверженных грозovým перенапряжениям, воздушные промежутки должны иметь и импульсные разрядные напряжения не ниже, чем у гирлянд изоляторов. В последнем случае для линий напряжением до 500 кВ импульсная прочность оказывает влияние на величину изоляционных расстояний.

Разумеется, минимальные изоляционные расстояния определяются с учетом отклонения гирлянд от вертикального положения под действием ветра

При выборе длины воздушного промежутка по грозovým перенапряжениям расчетное значение разрядного напряжения принимается равным 50%-ному импульсному, разрядному напряжению гирлянды изоляторов. Поправка на

метеорологические условия не вносятся, поскольку импульсные прочностные воздушных промежутков и гирлянд изоляторов в зависимости от этих условий изменяются примерно одинаково.

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ РАССТОЯНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

При определении изоляционных расстояний по воздуху между токоведущими частями, а также от токоведущих до заземленных элементов распределительного устройства необходимо руководствоваться, испытательными напряжениями, установленными для электрооборудования; при этом для РУ напряжением до 220 кВ за основу нужно принимать импульсные испытательные напряжения, а для РУ 330 и 500 кВ — испытательные напряжения промышленной частоты. Определение необходимой длины воздушных промежутков производится по экспериментальным кривым разрядных напряжений.

Поскольку ошиновка РУ весьма протяженна и вероятность пробоя воздушных промежутков при такой протяженности ошиновки повышается, вводится коэффициент запаса. Изоляционные расстояния между фазами принимаются на 10% больше, чем между фазой и землей. Если ошиновка гибкая, то изоляционные расстояния должны быть увеличены с учетом возможных сближений проводов в пролете под действием ветра или изменений температуры.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Своевременное выявление дефектных изоляторов и замена их новыми имеют большое значение для надежной эксплуатации линий электропередачи. Один из методов обнаружения состоит в измерении распределения напряжения по гирлянде изоляторов, которое может производиться при рабочем напряжении. Затем полученное опытным путем распределение напряжения сравнивается с нормированным распределением для исправных гирлянд. Если на каком-либо изоляторе падение напряжения оказывается ниже нормы, то это указывает на неисправность изолятора.

Для определения падений- напряжения на изоляторах гирлянды применяются штанги с измерительным искровым промежутком. При измерениях расстояние между электродами промежутка может изменяться с помощью шнура из изоляционного материала. На конце штанги имеется указатель расстояния, отградуированный в киловольтах. Включенный последовательно с искровым промежутком конденсатор должен выдерживать напряжение наиболее нагруженного изолятора и предназначен для предотвращения перекрытия гирлянды в случаях, когда штанга наложена на хороший изолятор, а в гирлянде имеются один или несколько поврежденных.

В последнее время для контроле линейных изоляторов разрабатываются методы, основанные на индикации частичных разрядов которые возникают в головке поврежденных фарфоровых изоляторов.

2.1.7 Методические рекомендации по выполнению КП и КР

В рабочей программе не предусмотрено выполнение КП и КР

2.1.8 Методические указания по выполнению лабораторных работ

2.1.9 Методические указания по выполнению практических занятий

В рабочей программе не предусмотрено проведение практических занятий

2.1.10 Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ

2.1.11 Перечень программных продуктов

При изучении дисциплины предусматривается использование пакетов прикладных программ Mathcad.

2.1.12 Методические указания по применению современных информационных технологий.

При подготовки к занятиям студенты используют

2.1.13 Методические указания профессорско-преподавательскому составу

2.1.14 Комплекты заданий для лабораторных работ

2.1.15 Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний

Тестовые задания для оценки качества знаний по дисциплине

1. Стимер это.....

.....

.....

2. Перечислите основные недостатки масляно-барьерной изоляции
3. Расшифруйте марку кабеля МССК-110.
4. Какие способы применяются для регулирования электрических полей.
5. Перечислите виды разрядов
6. Напишите какие материалы применяются в масляно-барьерной изоляции.
7. С какой целью применяются конденсаторные обкладки во внутренней изоляции ?
8. Опишите физические процессы в диамагнетике, формирующие значение магнитной проницаемости.
9. Напишите закон Пашена
10. Что такое ячейка КРУЭ.
11. Какие виды диэлектрических потерь вы знаете?
12. Какой вид поля обладает наибольшей электрической прочностью ?
13. Какое стекло используется в качестве подвесных изоляторов?
14. На какой тип медных проводов не накладывается резиновая изоляция?

2.1.16 Контрольные вопросы к экзамену

1. Электрофизические процессы в газах.
2. Движение заряженных частиц в газе.
3. Основные свойства термической плазмы.
4. Разновидности разрядов в газах.
5. Канальная форма разряда.
6. коронный разряд.
7. Импульсная корона.
8. Ионизация и рекомбинация частиц в газах.
9. Лавина электронов и условие самостоятельности разряда.

10. Электропроводимость диэлектриков.
11. Поляризация диэлектриков. Диэлектрические потери.
12. Атмосферный воздух как диэлектрик.
13. Назначение изоляторов, их цели и конструкция.
14. Испытание внешней изоляции.
15. Развитие разряда и пробивные напряжения промежутков с однородным электрическим полем.
16. Развитие разряда, начальные и пробивные напряжения промежутков с неоднородным электрическим полем.
17. Вольт-секундная характеристика воздушных промежутков. Время разряда.
18. Разряд в длинных воздушных промежутках.
19. Влияние конструкции изоляторов на напряжение перекрытия.
20. Развитие разряда и напряжение перекрытия изоляторов при неблагоприятных погодных условиях.
21. Учет атмосферных условий при определении разрядных и испытательных напряжений.
22. Регулирование эл. полей во внешней изоляции электроустановок.
23. Внутренняя изоляция: понятие и общие свойства.
24. Зависимость эл. прочности внутренней изоляции от длительности воздействия напряжения.
25. Самовосстанавливающаяся и не самовосстанавливающаяся изоляция. Влияние на неё механических тепловых и др. воздействий.
26. Пробой жидких диэлектриков.
27. Пробой твёрдых диэлектриков. Разряд по поверхности твердого диэлектрика.
28. Маслобарьерная изоляция.
29. Твердая изоляция.
30. Бумажно-масленная изоляция.
31. Газовая и вакуумная изоляция. Элегазовая изоляция
32. Градирование изоляции.
33. Применение конденсаторных обкладок и полупроводниковых покрытий.
34. Допустимые напряжения на внутренней изоляции, факторы, влияющие на кратковременную эл. прочность внутренней изоляции.
35. Изоляция ВЛ на опорах.
36. Изоляционные расстояния в пролетах ВЛ.
37. Выбор линейной изоляции.
38. Изоляционные конструкции ОРУ.
39. Изоляционные промежутки в ОРУ.
40. Выбор наружной изоляции РУ подстанции.
41. Изоляционные конструкции с газовой изоляцией.
42. Экологическое влияние ВЛ и РУ.
43. Основные конструкции кабелей высокого напряжения.
44. Кабельные муфты. Испытание изоляции кабелей.

- 45.Классификация и особенности изоляции силовых трансформаторов.
Конструкция изоляции трансформаторов.
- 46.Испытания изоляции трансформаторов.
- 47.Изоляция ТТ.
- 48.Изоляция масляных и воздушных выключателей.
- 49.Изоляция вакуумных выключателей.
- 50.Изоляция элегазовых выключателей.
- 51.Изоляция герметизированных РУ, КРУЭ.
- 52.Изоляция вводов ВН.
- 53.Изоляция силовых конденсаторов.
- 54.Изоляция электрических машин высокого напряжения

2.1.17 Карта обеспеченности дисциплины кафедры

Вид нагрузки	профессорско-преподавательский состав
лекция	Соловьев В.В. , канд. техн. наук, доцент
лабораторные работы	Панькова Д.Н. ст преподаватель, Кривохижа Я.В. ст преподаватель
экзамен	Соловьев В.В. , канд. техн. наук, доцент