

А.С. Серебряков

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.315.61
ББК 31.23
С32

С32 **Серебряков А.С.** Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. — М.: Маршрут, 2005. — 280 с. ISBN 5-89035-210-5

В учебном пособии рассмотрены основные физические явления, происходящие в диэлектриках при воздействии на них электрического поля: поляризация, электропроводность, диэлектрические потери и пробой изоляции. Дан анализ процессов в комбинированных диэлектриках. Рассказано о важнейших физических свойствах электроизоляционных материалов. Рассмотрены основные механизмы старения изоляции и их влияние на ее срок службы. Приведены экспериментальные данные по старению изоляции тяговых электродвигателей в зависимости от их пробега, сведения о профилактическом контроле, диагностике и испытаниях изоляции электротехнических установок. Описано применение диэлектриков в наиболее распространенных изоляционных конструкциях. Предлагается словарь иностранных технических терминов, встречающихся в пособии.

Предназначено для студентов электротехнических, электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов и техникумов. Может быть полезным также для инженеров и техников, занятых проектированием, техническим обслуживанием и ремонтом электрических машин, аппаратов и изоляционных конструкций, а также работникам научно-исследовательских институтов и организаций, занимающимся разработкой и исследованием электротехнических изделий.

УДК 621.315.61
ББК 31.23

Рецензенты: канд. техн. наук доцент МГУПС(а) (МИИТ) Г.С. Касаткин; главный специалист Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» А.И. Баратов.

ISBN 5-89035-210-5

© Серебряков А.С., 2005
© УМЦ по образованию
на железнодорожном транспорте
© Издательство «Маршрут», 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие адресовано студентам технических вузов, которые, применяя знания основ химии, физики и электротехники, будут использовать его как базу для изучения таких специальных дисциплин, как «Электрические машины», «Электропривод», «Техника высоких напряжений», «Электрические аппараты» и др.

Материал учебного пособия соответствует Государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования (ОПД.Ф.05) по направлениям подготовки дипломированных специалистов 657700 «Системы обеспечения движения поездов» и 657600 «Подвижной состав железных дорог» (квалификация – инженер путей сообщения) для специальностей: 101800 «Электроснабжение железных дорог», 210700 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» и 181400 «Электрический транспорт железных дорог».

В пособии преимущественно используется *международная система единиц СИ*. Однако в связи с тем, что переход на эту систему в нашей стране еще полностью не закончен, и учитывая, что в специальных областях техники до принятия соответствующих международных решений допускаются к применению наравне с единицами СИ употреблявшиеся ранее единицы измерения, эти единицы измерения используются и в пособии.

Например, наряду с термодинамической температурой T , называемой также абсолютной температурой и измеряемой в кельвинах (К), допускается использовать и температуру Цельсия t , измеряемую в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Связь между ними определяется выражением: $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,16$ К. По размеру $1 \text{ К} = 1^{\circ}\text{C}$, поэтому температурный интервал, или разность температур Кельвина, выражают в кельвинах, а температурный интервал, или разность температур Цельсия, допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия. По величине они будут одинаковые.

Энергия в системе СИ измеряется в джоулях (Дж). В электротехнике допускается измерять энергию в электрон-вольтах (эВ). Соотношение между этими единицами такое: $1 \text{ эВ} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $1 \text{ Дж} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$.

Давление в системе СИ измеряется в паскалях (Па). В пособии атмосферное давление воздуха дается в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.). Соотношение между этими единицами следующее: 1 мм рт. ст. = 133,322 Па, 1 Па = $7,501 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. С учетом этих соотношений нормальное атмосферное давление, равное 760 мм рт. ст., составляет 0,1 МПа (0,1 мегапаскаля) или 101,3 кПа (101,3 килопаскаля).

Длина в системе СИ измеряется в метрах (м), время — в секундах (с), а для срока службы — в годах, масса — в килограммах (кг), сила — в ньютонах (Н), а плоский угол — в радианах (рад), причем 1 Н = 0,102 кгс, а 1 рад = $57^{\circ}17'44,8''$, $1^{\circ} = 0,017$ рад.

Сила тока измеряется в амперах (А), мощность — в ваттах (Вт), напряжение — в вольтах (В).

Автор выражает глубокую благодарность канд. техн. наук доценту Г.С. Касаткину и А.И. Баратову за ценные замечания, сделанные ими при рецензировании рукописи, а также научному редактору канд. техн. наук доценту Е.Г. Зарембо за помощь, оказанную при подготовке данного учебного пособия.

Ваши замечания и предложения по содержанию учебного пособия следует направлять по адресу: 107078, Москва, Басманный пер., д. 6, издательство «Маршрут».

Используемые в пособии множители и приставки для образования кратных и дольных единиц в системе СИ и их наименование

Наименование приставки	Русское обозначение приставки	Множитель (отношение к главной единице)	Наименование приставки	Русское обозначение приставки	Множитель (отношение к главной единице)
тера	Т	10^{12}	пико	п	10^{-12}
гига	Г	10^9	нано	н	10^{-9}
мега	М	10^6	микро	мк	10^{-6}
кило	к	10^3	милли	м	10^{-3}

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ПОСОБИИ

Русский алфавит

Z — суммарные затраты, отнесенные к единице времени, руб./год
 ТК — температурный (термический) коэффициент, K^{-1}

Латинский алфавит

A — постоянная интегрирования; постоянная величина, зависящая от свойств изоляции, год/(кВ)ⁿ

a — длина, м

b — ширина, м; реактивная проводимость, См

C — электрическая емкость, Ф; расчетные затраты, руб.

D — электрическая индукция, Кл/м²; диаметр шара шарового разрядника, м

DAR — коэффициент диэлектрической абсорбции

DD — коэффициент диэлектрического разряда

d — расстояние, толщина, м

E — напряженность электрического поля, В/м или кВ/мм

E_{гр} — электрическая прочность, В/м или кВ/мм

f — частота, Гц; дифференциальная функция распределения или плотность вероятности

g — активная проводимость, См

h — толщина, длина, м

I — ток, А

I_y — установившееся значение сквозного тока утечки, А

i — ток (мгновенное значение), А

i_{аб} — ток абсорбции, А

j — мнимая единица

k — коэффициент деления делителя напряжения; коэффициент пропорциональности

k_{тр} — коэффициент трансформации трансформатора

k_н — коэффициент нелинейности

k_з — коэффициент запаса

$k_{аб}$ — коэффициент абсорбции
 l — длина, м; линейные размеры, м; плечо диполя, м
 m — собственный электрический момент дипольной молекулы при отсутствии внешнего электрического поля, Кл·м
 N — число ЧР за единицу времени в изоляционной конструкции; число испытаний; значение переключателя плеча моста Шеринга
 n — число ЧР за половину периода питающего напряжения в единичном газовом включении; число конденсаторов в ГИН; показатель степени
 P — активная мощность, Вт; диэлектрические потери, Вт; поляризованность диэлектрика, Кл/м; вероятность безотказной работы, пробег, тыс. км
 P_1 — индекс поляризации
 p — давление, Па или мм рт. ст.; индуцированный дипольный момент, Кл·м
 Q — электрический заряд, Кл; вероятность отказа, добротность
 Q_0 — заряд на обкладках конденсатора в вакууме, Кл
 q — электрический заряд, Кл; качество изоляции
 R, r — (активное) сопротивление, Ом
 $R_{из}$ — сопротивление изоляции, определяемое только сквозным током, Ом
 R_S — поверхностное сопротивление, Ом
 R_V — объемное сопротивление, Ом
 S — площадь поверхности, м²; порядковый номер конденсатора в схеме умножения напряжения
 T — термодинамическая (абсолютная) температура, К
 $T_0 = 273,16$ К — реперная точка шкалы Кельвина; начальная известная или заданная температура, К или °С
 t — время, с; температура Цельсия, °С
 U — напряжение, В
 $U_{пр}$ — пробивное напряжение, В
 $U_{и}$ — ионизационный потенциал, В
 $U_{чр}$ — напряжение появления в изоляции частичных разрядов, В
 $U_{рм}$ — максимальное рабочее напряжение
 u — напряжение (мгновенное значение), В
 V — объем, м³
 W — энергия, Дж; накопленная частота

$W_{и}$ — энергия ионизации, эВ
 ΔW — ширина запрещенной зоны, эВ
 w — удельная энергия конденсатора, Дж/м³
 Y — полная проводимость, См
 Z — полное сопротивление, Ом
 Z_k — волновое сопротивление кабеля, Ом

Греческий алфавит

α — поляризуемость частицы, Ф·м²
 β — коэффициент импульса
 δ — угол диэлектрических потерь, рад (°); относительная плотность воздуха
 ϵ_k — относительная диэлектрическая проницаемость
 ϵ_0 — электрическая постоянная, Ф/м
 γ_S — удельная поверхностная проводимость, См
 γ_V — удельная объемная проводимость, См·м⁻¹
 η — коэффициент использования ГИН
 ϕ — угол сдвига между напряжением и током, рад (°); потенциал электрического поля
 λ — длина свободного пробега, м
 ν — коэффициент вариации
 ρ_S — удельное поверхностное сопротивление, Ом
 ρ_V — удельное объемное сопротивление, Ом·м
 σ — поверхностная плотность электрических зарядов, Кл/м²; среднеквадратическое отклонение; коэффициент теплоотдачи изоляционной конструкции, Вт/(м²·К)
 τ — постоянная времени, с; время релаксации, с; срок службы, год
 ω — угловая частота колебаний, с⁻¹

ВВЕДЕНИЕ

Повышение уровня жизни людей связано с их энергообеспеченностью. Средние энергозатраты на каждого жителя Земли в год составляют свыше 10 тыс. кВт·ч, или свыше 30 кВт·ч в сутки. Отсюда становится понятным, почему в развитых странах важнейшей базовой отраслью промышленности является производство энергии.

В настоящее время примерно одна десятая часть добытой энергии используется в виде электроэнергии, которая имеет ряд важных преимуществ перед механической, тепловой и другими видами энергии. Электроэнергия сравнительно просто преобразуется в другие виды энергии, она может со скоростью света передаваться на большие расстояния, ее производство, передача, распределение и преобразование основано на мощной научно-технической базе. Как показывают прогнозы, доля электроэнергии в структуре всей энергетики будет повышаться.

Сейчас наша страна производит одну шестую мировой электроэнергии при численности населения около одной двадцатой населения Земли. При таких масштабах производства электроэнергии очень важной становится проблема энергосбережения. Действительно, такой гигантский объем электроэнергии, выработанный на электростанциях, необходимо уберечь от потерь при транспортировке и преобразовании в другие виды энергии. Решить эту проблему помогают системы электрической изоляции, которые обеспечивают нормальную работу электроустановок, безопасность людей, а также предотвращают утечки и потери электроэнергии.

В масштабах всей страны потери составляют 130 млрд кВт·ч или около 8—9 % общей выработки электроэнергии. Только для покрытия этих потерь потребовалась бы работа всех электростанций Белоруссии, Казахстана и Азербайджана, вместе взятых. Уменьшение потерь электроэнергии, повышение надежности электрооборудования и сетей электроснабжения существенно зависят от качества и надежности систем электрической изоляции в машинах и устройствах для производства, распределения и преобразования электрической энергии.

В нашей стране ежегодно производится сложное электрооборудование на десятки миллиардов рублей. Например, современный

электровоз содержит более 250 тыс. электротехнических изделий и компонентов, в том числе более 130 км проводов и кабелей; и их стоимость составляет 60 % стоимости электровоза.

При работе электрооборудования на его изоляцию воздействуют самые разнообразные факторы: высокая или низкая температура, высокое напряжение, вибрация, радиация, химические вещества и т. д. Воздействие всех этих факторов не должно приводить к преждевременному выходу изоляции из строя, так как это может привести к крупным авариям. Таким образом, надежность, эффективность и экономичность работы электрооборудования во многом зависят от качества его изоляции.

Кроме электроэнергетики электрическая изоляция широко используется в разнообразных устройствах радиотехники, микроэлектроники и ЭВМ. В интегральных микросхемах используются слоистые структуры металл-диэлектрик-полупроводник. Индустрия современной информатики также является большим потребителем электроизоляционных материалов. Технические требования к этим материалам в электронной технике совершенно иные.

Чтобы успешно проектировать и эксплуатировать электротехнические установки, грамотно анализировать причины повреждений изоляции, нужно хорошо знать процессы, происходящие в изоляции и методы измерения ее основных параметров. Следует знать причины возникновения дефектов в изоляции и механизмы ее старения. Это необходимо для объективного контроля состояния изоляции, оценки степени ее старения и прогнозирования оставшегося ресурса ее работы. Такая проблема становится особенно актуальной для оборудования, выработавшего свой срок или срок службы которого приближается к расчетному.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА

1.1. Строение атомов и молекул

Мельчайшей частицей любого вещества является молекула, которая в свою очередь состоит из атомов. Основными элементарными частицами, из которых строятся все известные нам атомы, являются протоны, нейтроны и электроны. Протоны имеют положительный заряд, электроны — отрицательный. Заряды протона и электрона равны по величине и составляют $16 \cdot 10^{-20}$ Кл. Это элементарный, т. е. наименьший электрический заряд. Нейтроны, как говорит само название, являются нейтральными частицами, не имеющими заряда.

Согласно упрощенной модели Бора атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются электроны, компенсируя положительный заряд ядра. Ядро состоит из протонов и нейтронов. Электроны располагаются вокруг ядра несколькими слоями — оболочками на очень большом по сравнению со своими размерами расстоянии. Строение ядер атомов и периодичность заполнения оболочек электронами можно определять с помощью таблицы Д.И. Менделеева.

Атом имеет размеры порядка нанометра ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Молекулы различных веществ содержат различное число атомов. Например, гелий и аргон — одноатомные газы, водород и кислород — двухатомные, озон — трехатомный. В зависимости от строения внешних электронных оболочек атомов в молекулах могут образовываться различные виды связей.

Молекулы, в которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, являются *нейтральными*. Если же в отдельных молекулах (рис. 1.1) центры противоположных по знаку зарядов $+q$ и $-q$ не совпадают и находятся на некотором расстоянии l друг от друга, то такие молекулы называются *полярными*, или *дипольными*. Полярная молекула при отсутствии внешнего поля характеризуется *величиной собственного дипольного момента m* , который определяется произведением заряда q и расстояния l между центра-

ми положительного и отрицательного зарядов: $m = q \cdot l$. Электрический момент полярной молекулы является векторной величиной. За направление вектора m принимают направление от отрицательного заряда к положительному. При отсутствии внешнего электрического поля суммарный дипольный момент вещества равен нулю, так как диполи расположены хаотично. При приложении внешнего электрического поля диполи и их электрические моменты ориентируются по направлению поля.

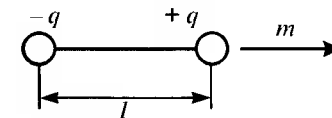


Рис. 1.1. Схема строения полярной молекулы

Нейтральный атом, получив некоторое количество энергии извне, может лишиться части электронов и превратиться в положительный ион и свободные электроны. Такой процесс носит название *ионизации*. Атом может и присоединять дополнительные электроны, превращаясь в отрицательный ион. Ионами могут быть и группы атомов, потерявших или присоединивших электроны.

1.2. Зонная теория твердых тел. Классификация веществ по электрическим свойствам

Все вещества в зависимости от их электрических свойств делятся на диэлектрики, проводники или полупроводники. Различие между ними наиболее наглядно можно показать с помощью энергетических диаграмм *зонной теории твердых тел* [1, 5].

Спектральный анализ отдельных атомов показывает, что для атома каждого вещества характерны вполне определенные спектральные линии. Это говорит о наличии определенных *энергетических состояний (уровней)* для разных атомов. Каждый уровень характеризуется величиной энергии, которую измеряют в электронвольтах (эВ).

Часть этих уровней заполнена электронами в нормальном, невозбужденном состоянии атома. На других уровнях электроны могут находиться только после того, как атом подвергается внешнему энергетическому воздействию и становится возбужденным. Стремясь снова вернуться к устойчивому состоянию, атом излучает избыток энергии, и электроны возвращаются на свои прежние уровни, при которых энергия атома минимальна. Сказанное ил-

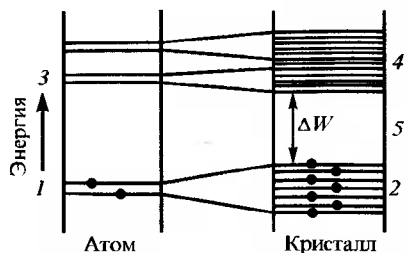


Рис. 1.2. Схема расположения энергетических уровней уединенного атома (слева) и твердого кристаллического тела — диэлектрика (справа)

атомов в твердом теле образуются целые полосы — *зоны энергетических уровней* (см. рис. 1.2). Нормальные энергетические уровни 1 образуют *заполненную электронами зону* 2. Уровни возбужденного состояния атома 3 образуют *свободную зону* 4. Между заполненной зоной и свободной зоной располагается *запрещенная зона* 5. Ширина ΔW запрещенной зоны измеряется в электрон-вольтах.

На рис. 1.3 показаны энергетические диаграммы диэлектрика (а), полупроводника (б) и проводника (в). Обозначения те же, что и на рис. 1.2.

Диэлектриками являются такие материалы, у которых запрещенная зона (а следовательно, и необходимая для ее преодоления энергия)

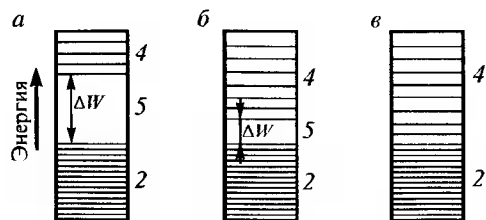


Рис. 1.3. Энергетические диаграммы твердых тел: диэлектрика (а), полупроводника (б) и проводника (в) с точки зрения зонной теории твердого тела

люстрируется энергетической диаграммой атома, показанной на рис. 1.2 [21].

Когда из отдельных атомов образуются молекулы, а из молекул образуется вещество, все имеющиеся у данного типа атома электронные уровни (как заполненные электронами, так и незаполненные) несколько смещаются вследствие действия соседних атомов друг на друга. Таким образом, из отдельных энергетических уровней уединенных

настолько велика, что в обычных условиях электроны не могут переходить в свободную зону и электронная электропроводность не наблюдается. Ширина запрещенной зоны у технических диэлектриков составляет $\Delta W = 3...7$ эВ. Таким образом, идеальные диэлектрики не проводят электрический ток, они являются изолято-

рами. Однако такими свойствами диэлектрик обладает до определенного предела. При воздействии очень высоких температур или сильных электрических полей связанные электроны могут переходить в свободную зону. В этом случае диэлектрик теряет свои изоляционные свойства, он перестает быть изолятором и становится проводником.

Полупроводники имеют более узкую запрещенную зону, которая может быть преодолена за счет небольших внешних энергетических воздействий, например температуры, света или других источников энергии. Для используемых в электронике полупроводников ширина запрещенной зоны лежит в пределах $\Delta W = 0,5...2,5$ эВ. Если подведенная извне энергия будет достаточно для переброса электронов через запрещенную зону, то, став свободными, электроны могут перемещаться и под действием электрического поля создавать электронную электропроводность полупроводника. При низких температурах полупроводники имеют мало свободных электронов, они плохо проводят электрический ток и практически являются изоляторами. С повышением температуры число носителей заряда растет и сопротивление полупроводников сильно уменьшается.

Проводниками являются материалы, у которых заполненная электронами зона вплотную прилегает к зоне свободных энергетических уровней или даже перекрывается ею. Вследствие этого электроны в материале могут переходить из заполненной в свободную зону даже при слабых напряженностях электрического поля.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Из каких частиц состоит атом? Какова модель атома?
2. Что такое нейтральные и полярные молекулы?
3. Чему равен дипольный момент?
4. Какие энергетические уровни, заполненные электронами, существуют в атомах и какие зоны — в твердых телах?
5. Чем отличаются энергетические диаграммы диэлектриков, полупроводников и проводников?

2. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

2.1. Диэлектрики в электрическом поле

Диэлектрик в рабочем состоянии всегда находится между металлическими проводниками, имеющими разные электрические потенциалы. Назначение диэлектрика — изоляция токоведущих частей. Таким образом, диэлектрик в рабочем режиме является средой, в которой действует электрическое поле, создаваемое токоведущими частями.

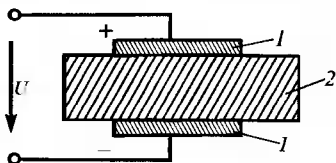


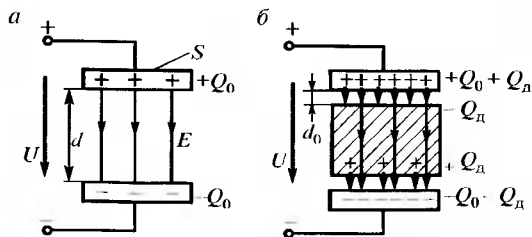
Рис. 2.1. Твердый диэлектрик между электродами:
1 — электрод; 2 — диэлектрик

Рассмотрим, как действует электрическое поле на диэлектрик. Будем считать диэлектрик идеальным, т. е. абсолютно непроводящим электрический ток. При таком допущении основным процессом, который возникает в диэлектрике при воздействии на него электрического поля, является поляризация диэлектрика. Что же представляет собой поляризация?

Поляризация — это ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул диэлектрика при воздействии на него электрического поля. Рассмотрим, к чему приводит такое смещение зарядов.

2.2. Поляризация диэлектрика и относительная диэлектрическая проницаемость

Представим себе конденсатор, образованный двумя обкладками, между которыми находится вакуум (рис. 2.2, а). Если к такому конденсатору подвести постоянное напряжение U , то постоянный ток



через конденсатор не пойдет, так как между его обкладками находится диэлектрик — вакуум.

Рис. 2.2. Электрическое поле в конденсаторе без диэлектрика (а) и с диэлектриком (б)

На обкладках конденсатора образуются заряды противоположных знаков $+Q_0$ и $-Q_0$. Величина этих зарядов связана с емкостью конденсатора соотношением:

$$Q_0 = C_0 U = \frac{\epsilon_0 S}{d} U, \quad (2.1)$$

где $C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ — емкость конденсатора, когда между его пластинами находится вакуум; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; S — площадь пластин конденсатора, m^2 . d — расстояние между обкладками конденсатора, м.

Между обкладками конденсатора будет действовать электрическое поле. Линии напряженности электрического поля E будут начинаться на положительных зарядах и заканчиваться на отрицательных. Величина напряженности равна:

$$E = \frac{U}{d}. \quad (2.2)$$

С учетом (2.2) заряд на обкладках конденсатора можно выразить через напряженность электрического поля следующим образом:

$$Q_0 = \epsilon_0 S E. \quad (2.3)$$

Поверхностная плотность зарядов будет равна:

$$\sigma_0 = \frac{Q_0}{S} = \epsilon_0 E. \quad (2.4)$$

Если теперь между обкладками конденсатора поместить диэлектрик (рис. 2.2, б), то имеющиеся в диэлектрике связанные заряды смещаются в направлении действующих на них сил электрического поля. При снятии электрического поля заряды вернуться в свое прежнее состояние. Расстояние d_0 между обкладками конденсатора и диэлектриком будем считать ничтожно малым.

Связанные заряды диэлектрика смещаются таким образом, что на поверхности, обращенной к положительному электроду, образуется отрицательный заряд, а на поверхности, обращенной к отрицательному электроду, — положительный заряд. Поскольку заряды связанные, то разойтись, т. е. покинуть диэлектрик и перейти на электроды они не могут. Эти заряды остаются на поверхности диэлектрика. Наличие связанных зарядов $Q_д$ на поверхности диэлектрика приводит к тому, что на обкладках конденсатора появляется дополнительный заряд $Q_д'$

равный заряду на поверхности диэлектрика. Таким образом, суммарный заряд на обкладках конденсатора будет равен:

$$Q = Q_0 + Q_d. \quad (2.5)$$

Отношение зарядов $\frac{Q}{Q_0}$ является одной из важных электрических характеристик диэлектрика и называется *относительной диэлектрической проницаемостью* ϵ_r . Относительная диэлектрическая проницаемость есть величина безразмерная, поэтому ее значение не зависит от выбора системы единиц. Итак,

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}. \quad (2.6)$$

Из выражения (2.6) следует, что относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества больше единицы и равна единице только в случае вакуума. Отметим, что иногда слово «относительная» в названии ϵ_r опускают и называют ее просто диэлектрической проницаемостью.

Из выражения (2.6) следует, что заряд на обкладках конденсатора с диэлектриком равен:

$$Q = \epsilon_r Q_0 = \epsilon_r \epsilon_0 S E. \quad (2.7)$$

Поверхностная плотность зарядов на обкладках конденсатора будет равна:

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \epsilon_r \epsilon_0 E = \epsilon_r \sigma_0. \quad (2.8)$$

Заряд на поверхности диэлектрика:

$$Q_d = Q - Q_0 = \epsilon_r Q_0 - Q_0 = (\epsilon_r - 1) Q_0. \quad (2.9)$$

Плотность зарядов на поверхности диэлектрика:

$$\sigma_d = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E. \quad (2.10)$$

При рассмотрении явления поляризации вводится такое понятие, как *поляризованность диэлектрика* P . Поляризованность P равна пределу отношения электрического момента объема диэлектрика к этому объему, когда последний стремится к нулю:

$$P = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum p}{V}, \quad (2.11)$$

где P — индуцированный элемент, появляющийся у молекул при воздействии на диэлектрик внешнего электрического поля.

Поскольку, как это видно из рис. 2.2, б, положительные и отрицательные заряды в глубине диэлектрика взаимно компенсируют друг друга, электрический момент всего объема диэлектрика равен $\sum p = \sigma_d S h$, а объем между обкладками $V = S h$. Следовательно,

$$P = \sigma_d. \quad (2.12)$$

Поляризованность P есть векторная величина, которая в изотропном диэлектрике совпадает по направлению с вектором напряженности электрического поля E , а по величине равна поверхностной плотности связанных зарядов в диэлектрике.

Вектором электрической индукции называют вектор, равный:

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 \epsilon_r E. \quad (2.13)$$

Увеличение заряда на обкладках конденсатора связано с увеличением электрической емкости конденсатора. Можно записать, что $Q = C U$, где C — емкость конденсатора с диэлектриком. Следовательно, можно записать:

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C U}{C_0 U} = \frac{C}{C_0}. \quad (2.14)$$

Таким образом, относительная диэлектрическая проницаемость есть отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости конденсатора тех же размеров, если бы между обкладками находился вакуум. Емкость плоского конденсатора с диэлектриком можно выразить из (2.14):

$$C = \epsilon_r C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}. \quad (2.15)$$

Как видно из (2.15) емкость конденсатора зависит не только от геометрических размеров, но и от свойств диэлектрика.

В табл. 2.1 приведены значения ϵ_r для некоторых изоляционных материалов [3].

Таблица 2.1

Значения ϵ_r для некоторых изоляционных материалов

Материал	ϵ_r
Газы	1,000072—1,00138
Гетинакс	6—8
Фторопласт	1,9—2,1
Лакоткани	3—4

Окончание табл. 2.1

Материал	ϵ_r
Полиэтилен	2,3—2,4
Полистирол	2,4—2,6
Электрокартон	1,8—2,5
Масло трансформаторное	2,2
Совол	5
Оргстекло	4
Поливинилхлорид	3—5
Вода дистиллированная	80
Титанат кальция	150
Титанат бария	2000
Титанат бария с добавками	9000

Наличие диэлектрика между пластинами конденсатора увеличивает его электрическую емкость. На поверхностях диэлектрика, обращенных к электродам конденсатора, образуется поверхностный заряд, в глубине диэлектрика заряды компенсируют друг друга и электрический момент всего объема диэлектрика равен нулю.

Напряженность электрического поля, образованная связанными зарядами поляризованного диэлектрика, направлена навстречу основному полю конденсатора. Поэтому поле внутри диэлектрика ослабляется (см. рис. 2.2, б). В диэлектрике и в вакууме (или в воздухе) напряженности электрического поля оказываются различными: в вакууме (в воздухе) поле сильнее, а в диэлектрике — слабее. Напряженности поля обратно пропорциональны относительным диэлектрическим проницаемостям:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{д}}} = \frac{\epsilon_{\text{рд}}}{\epsilon_{\text{рв}}} = \epsilon_{\text{рд}}, \quad (2.16)$$

где $\epsilon_{\text{рв}} = 1$.

В общем случае:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{\text{р}2}}{\epsilon_{\text{р}1}}. \quad (2.17)$$

Согласно рис. 2.2, б, напряжение на конденсаторе равно $U = E_{\text{д}}d + E_{\text{в}}d_0$. При макроскопическом рассмотрении диэлектрика примем, что $d_0 = 0$.

Тогда $E_{\text{д}} = \frac{U}{d}$. Следовательно, при макроскопическом рассмотрении напряженность поля не зависит от свойств диэлектрика. От свойств диэлектрика зависят емкость конденсатора и его заряд.

Если расстояние в воздухе $d_0 \neq 0$, то напряжение с учетом того, что $E_{\text{в}} = \epsilon_{\text{рд}}E_{\text{д}}$, будет равно:

$$U = E_{\text{д}}d + E_{\text{в}}d_0 = E_{\text{д}}d + E_{\text{д}}\epsilon_{\text{рд}}d_0 = E_{\text{д}}(d + \epsilon_{\text{рд}}d_0). \quad (2.18)$$

Отсюда

$$E_{\text{д}} = \frac{U}{d + \epsilon_{\text{рд}}d_0}, \quad E_{\text{в}} = \frac{\epsilon_{\text{рд}}U}{d + \epsilon_{\text{рд}}d_0}. \quad (2.19)$$

Поскольку напряженность электрического поля $E_{\text{в}}$ в $\epsilon_{\text{рд}}$ раз больше, чем напряженность в диэлектрике, то в воздушном промежутке может возникнуть пробой. Этот пробой будет неполным или незавершенным, так как диэлектрик будет играть роль барьера. Такой пробой носит название частичного пробоя или частичного разряда (ЧР).

Отметим, что если между пластинами заряженного вакуумного конденсатора, отключенного от напряжения, вставить диэлектрик, то напряжение конденсатора уменьшится, как и напряженность поля между пластинами конденсатора.

Пример 2.1. Между пластинами плоского конденсатора находится диэлектрик-гетинакс толщиной $d = 2$ мм. К конденсатору приложено напряжение $U = 100$ В. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора σ и на диэлектрике $\sigma_{\text{д}}$, а также поляризованность диэлектрика P . Относительная диэлектрическая проницаемость гетинакса $\epsilon_r = 8$.

Решение. Поверхностная плотность заряда на диэлектрике и его поляризуемость определяются:

$$\sigma_{\text{д}} = P = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 E = (8 - 1) \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{100}{2 \cdot 10^{-3}} = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2.$$

Поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора:

$$\sigma = \epsilon_r \epsilon_0 E = 8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{100}{2 \cdot 10^{-3}} = 3,54 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2.$$

2.3. Основные виды поляризации диэлектриков

В зависимости от строения диэлектрика различают два основных вида поляризации. К первому виду относится поляризация, совершающаяся практически мгновенно, вполне упруго, без

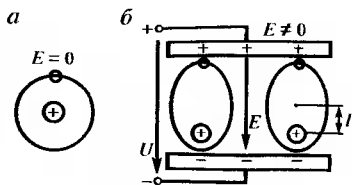


Рис. 2.3. Электронная поляризация диэлектрика. Положение орбит электронов при отсутствии (а) и при наличии (б) электрического поля

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов (рис. 2.3). При отсутствии электрического поля (рис. 2.3, а) центры положительного и отрицательного зарядов ядра совпадают. Атом нейтрален.

Под действием внешнего электрического поля E орбиты, по которым движутся отрицательные электроны, смещаются к положительному электроду. Центры положительного и отрицательного зарядов не совпадают. Нейтральный атом превращается в диполь (так называемый упругий диполь). Электрический момент, который приобретает поляризованный атом, называют индуцированным электрическим моментом P_d . Индуцированный электрический момент пропорционален напряженности электрического поля:

$$P_d = \alpha E, \quad (2.20)$$

где α — поляризуемость данной частицы.

Время установления электронной поляризации ничтожно мало и составляет около 10^{-15} — 10^{-16} с. Смещение и деформация электронных орбит атомов или ионов не зависят от температуры, но сама величина ϵ , при электронной поляризации несколько уменьшается при повышении температуры. Это связано с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением частиц в единице объема, т. е. уменьшением плотности вещества. Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерей энергии.

рассеяния энергии, т. е. без выделения тепла. Второй вид поляризации совершается замедленно и сопровождается рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. его нагреванием. Такой вид поляризации называют *релаксационной поляризацией*. Рассмотрим подробнее эти два вида поляризации.

К первому виду поляризации относятся электронная и ионная поляризации.

Ионная поляризация характерна для твердых тел с ионным строением, состоящих из положительных и отрицательных ионов. Под действием электрического поля ионы упруго смещаются друг относительно друга, что приводит к появлению дополнительного электрического момента. С повышением температуры поляризация несколько усиливается в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами из-за увеличения расстояния между ними при тепловом расширении. Время установления ионной поляризации больше, чем электронной, но оно также очень мало и имеет порядок 10^{-13} с. Относительная диэлектрическая проницаемость при электронной и ионной поляризации не зависит от частоты, поскольку время установления ее, как указывалось выше, очень мало.

Таким образом, хотя диэлектрик с электронной и ионной поляризацией не проводит электрический ток, но при приложении постоянного напряжения за короткое время поляризации (10^{-16} — 10^{-13}), т. е. за время заряда конденсатора с диэлектриком, наблюдается движение зарядов, которое может быть зафиксировано в виде короткого импульса электрического тока. Этот ток называют током переходного процесса. При переменном напряжении движение зарядов представляет собой переменный ток в соответствии с выражением:

$$i = C \frac{du}{dt}. \quad (2.21)$$

Поскольку поляризация происходит без потерь и поглощение энергии обратимо, диэлектрик, обладающий электронной или ионной поляризацией, может быть представлен идеальным конденсатором без потерь. В таком конденсаторе ток опережает напряжение на 90° (рис. 2.4, а).

Дипольно-релаксационная поляризация, или более кратко *дипольная поляризация*, отличается от электронной и ионной тем, что связана с потерями энергии при поляризации, т. е. с нагреванием диэлектрика. Этот вид

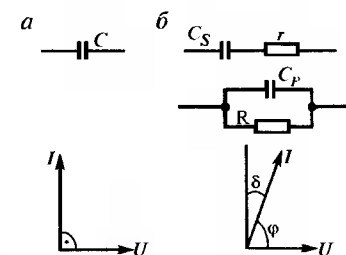


Рис. 2.4. Схема замещения диэлектрика без потерь (а) и с потерями (б)

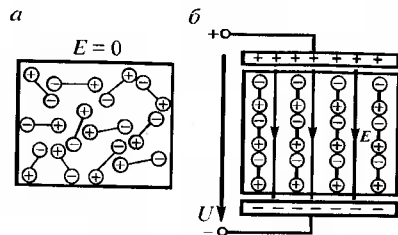


Рис. 2.5. Расположение диполей в полярном диэлектрике при отсутствии (а) и наличии (б) электрического поля

поляризации наблюдается в полярных веществах. В таких веществах молекулы или радикалы являются диполями (см. рис. 1.1) даже при отсутствии электрического поля. Они находятся в хаотическом тепловом движении, дипольные моменты их направлены в разные стороны и результирующий электрический момент всех этих диполей равен нулю (рис. 2.5, а).

Под действием сил электрического поля диполи поворачиваются, ориентируясь вдоль линий электрического поля, т. е. положительным полюсом к отрицательному электроду (рис. 2.5, б). Кроме ориентации диполи еще растягиваются электрическим полем, и величина дипольного момента при этом возрастает.

Дипольная поляризация возможна в том случае, когда молекулярные силы не мешают диполям ориентироваться вдоль поля. С увеличением температуры молекулярные силы ослабевают, вязкость вещества снижается. Эти факторы усиливают дипольную поляризацию. При дальнейшем увеличении температуры возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля и ослабляет дипольную поляризацию. В связи с этим относительная диэлектрическая проницаемость при дипольной поляризации с увеличением температуры сначала возрастает, а затем начинает падать (см. рис. 2.7, а). Диэлектрическая проницаемость полярных веществ тем больше, чем больше электрический момент диполей и число молекул в единице объема.

Поворот диполей в направлении поля в вязкой среде требует преодоления некоторого сопротивления. Диполи поворачиваются как бы с «трением». Поэтому дипольная поляризация связана с потерями энергии. Эта энергия затрачивается на преодоление сил внутреннего трения. В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что при повышенных частотах приложенного к диэлектрику напряжения диполи не успевают ориентироваться в направлении поля и дипольная поляризация может

полностью исключаться (см. рис. 2.7, б). Примером вещества с дипольно-релаксационной поляризацией является целлюлоза.

В схеме замещения диэлектрик с дипольной поляризацией может быть представлен в виде последовательно или параллельно включенных идеального конденсатора и резистора (см. рис. 2.4, б). Резистор учитывает потери в диэлектрике при поляризации. В такой схеме за счет потерь ток опережает напряжение на угол φ , меньший 90° . Угол δ , дополняющий угол φ до 90° , обозначается δ и называется *углом диэлектрических потерь*. Подробнее потери в диэлектрике при его поляризации будут рассмотрены в п. 4.

Кроме рассмотренных выше основных видов поляризации наблюдаются следующие виды поляризации, связанные с потерей электрической энергии.

Ионно-релаксационная поляризация относится к замедленной (неупругой) поляризации и наблюдается в некоторых ионных кристаллических неорганических веществах с неплотной упаковкой ионов. Ионы вещества, имеющие слабые связи, под действием внешнего электрического поля смещаются в направлении электрического поля. В результате в диэлектрике возникает различие в расположении центров положительного и отрицательного зарядов, т. е. появляется электрический момент. Процесс появления этого электрического момента и называют ионно-релаксационной поляризацией. С ростом температуры растет число ионов, перемещаемых в новые положения, поэтому возрастают поляризованность и диэлектрическая проницаемость.

Электронно-релаксационная поляризация возникает за счет возбуждения тепловой энергией избыточных электронов или дырок.

Миграционная поляризация наблюдается в технических диэлектриках неоднородной структуры, слои которой обладают различной проводимостью и относительной диэлектрической проницаемостью. В начальный момент времени за счет различия физических свойств плотность тока в слоях будет различной. Это приводит к образованию внутренних поглощенных зарядов на границах раздела разных слоев. Такую поляризацию называют миграционной или межслоевой.

Самопроизвольная или спонтанная поляризация наблюдается у сегнетоэлектриков. В веществах с самопроизвольной поляри-

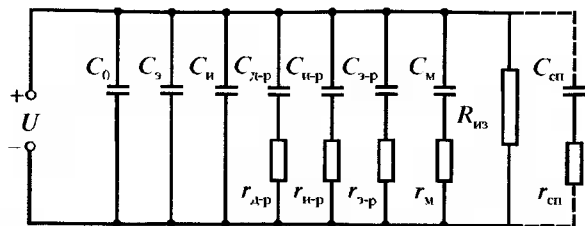


Рис. 2.6. Эквивалентная схема технического диэлектрика

зацией имеются отдельные области (домены), обладающие электрическим моментом еще в отсутствии внешнего поля. Однако ориентация электрических моментов в разных доменах различная, и результирующий момент равен нулю. Наложение внешнего поля способствует преимущественной ориентации электрических моментов отдельных доменов в направлении поля, что дает эффект очень сильной поляризации. При некотором значении напряженности внешнего поля наступает насыщение, и дальнейшее увеличение поля уже не вызывает возрастания диэлектрической проницаемости.

Технические диэлектрики, применяемые в современных системах изоляции, обладают, как правило, не одним, а одновременно несколькими видами поляризации. Следовательно, емкость конденсатора с диэлектриком обуславливается суммой различных механизмов поляризации. На рис. 2.6 показана схема замещения технического диэлектрика, обладающего различными механизмами поляризации в электрическом поле.

Схема состоит из параллельно включенных емкостных и активно-емкостных цепочек. Емкость C_0 соответствует собственной емкости электродов, если между ними нет диэлектрика, т. е. емкости электродов в вакууме. Емкости $C_з$ и $C_и$ соответствуют электронной и ионной поляризациям. Емкость $C_{д-р}$ и сопротивление $r_{д-р}$ соответствуют дипольно-релаксационной поляризации.

Емкость $C_{и-р}$ и сопротивление $r_{и-р}$ соответствуют ионно-релаксационной поляризации, а $C_{э-р}$ и $r_{э-р}$ — электронно-релаксационной поляризации. Емкость $C_м$ и сопротивление $r_м$ соответствуют миграционной поляризации, а $C_{сп}$ и $r_{сп}$ — спонтанной поляризации.

Все емкости эквивалентной схемы на рис. 2.6 зашунтированы сопротивлением $R_{из}$, представляющим собой сопротивление изоляции сквозному току утечки через диэлектрик. Ток утечки возникает за счет несовершенства диэлектрика. Как правило, ток утечки в диэлектриках очень мал и сопротивление изоляции $R_{из}$ составляет десятки и сотни МОм.

2.4. Диэлектрическая проницаемость газообразных, жидких и твердых диэлектриков

Газообразные вещества характеризуются весьма малой плотностью вследствие больших расстояний между молекулами. Поэтому поляризация всех газов незначительная, и относительная диэлектрическая проницаемость их близка к единице. Поляризация газа может быть чисто электронной или же дипольной, если молекулы газа полярны. Но даже и для полярных газов основное значение имеет электронная поляризация. Относительная диэлектрическая проницаемость газов тем выше, чем больше радиус молекулы.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и давления определяется изменением числа молекул в единице объема газа. Это число пропорционально давлению и обратно пропорционально абсолютной температуре. При повышении влажности воздуха при нормальных температуре и давлении относительная диэлектрическая проницаемость незначительно увеличивается. При повышенной температуре это увеличение становится более заметным. Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости обычно характеризуется выражением:

$$TK\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dt}. \quad (2.22)$$

Формула дает возможность вычислить относительное изменение диэлектрической проницаемости при повышении температуры на один градус. Эта величина носит наименование *температурного коэффициента диэлектрической проницаемости*. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости имеет единицу измерения град⁻¹. Если температура рассчитывается по Кельвину, то раз-

мерность записывают как K^{-1} . Величину $TK \epsilon_r$ для неполярного газа можно найти по выражению:

$$TK\epsilon_r = -\frac{(\epsilon_r - 1)}{T}. \quad (2.23)$$

Например, для воздуха при $t = 20^\circ C$

$$TK\epsilon_r = -\frac{1,00058 - 1}{293} = -2 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Жидкие диэлектрики могут быть построены из неполярных или полярных молекул. Значение относительной диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей невелико и обычно не превышает значения 2,5. Например, для трансформаторного масла $\epsilon_r = 2,1-2,4$. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярной жидкости связана с уменьшением числа молекул в единице объема. От частоты приложенного напряжения ϵ_r для неполярной жидкости не зависит.

Значение ϵ_r для полярных жидкостей лежит в пределах от 3,5 до 5. Например, совола имеет значение $\epsilon_r = 5$. Температурная зависимость ϵ_r для совола показана на рис. 2.7, а, из которого видно, что для полярных жидкостей эта зависимость имеет более сложный характер, чем для неполярных. Сильно полярные жидкости характеризуются очень высоким значением относительной диэлектрической проницаемости. Например, дистиллированная вода имеет $\epsilon_r = 80$. Однако практического применения в качестве диэлектрика вода не находит вследствие ее большой проводимости. При переходе воды из жидкого состояния в

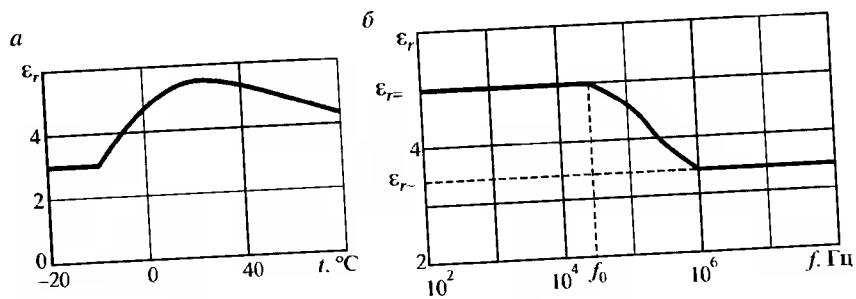


Рис. 2.7. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от температуры (а) и частоты (б) для полярной жидкости – совола

твердое относительная диэлектрическая проницаемость уменьшается от значения 80 до 2,85.

Значительное влияние на ϵ_r дипольной жидкости имеет частота (рис. 2.7, б). Пока частота мала и диполи успевают следовать за полем, ϵ_r близка к значению, измеренному при постоянном напряжении. Когда же частота становится настолько большой, что диполи уже не успевают следовать за изменением поля, диэлектрическая проницаемость уменьшается, стремясь к значению, обусловленному электронной поляризацией.

В твердых телах в зависимости от структуры диэлектрика возможны все виды поляризации. Поэтому ϵ_r твердых тел может принимать самые различные численные значения. Для твердых неполярных диэлектриков характерны те же зависимости, что и для неполярных жидкостей и газов. На рис. 2.8 показана температурная зависимость ϵ_r для парафина. При переходе парафина из твердого состояния в жидкое (температура плавления составляет $54^\circ C$) происходит резкое уменьшение ϵ_r вследствие сильного понижения плотности вещества.

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с неплотной упаковкой частиц, в которых наблюдается помимо электронной и ионной также и ионно-релаксационная поляризация, характеризуются в большинстве случаев большим положительным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости $TK \epsilon_r$. Примером может служить электротехнический фарфор, ϵ_r которого в зависимости от температуры приведена на рис. 2.9.

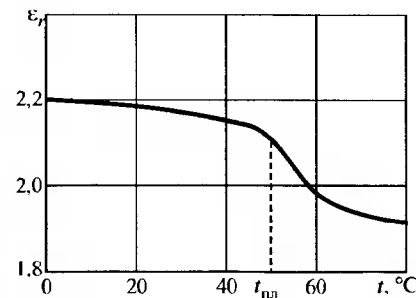
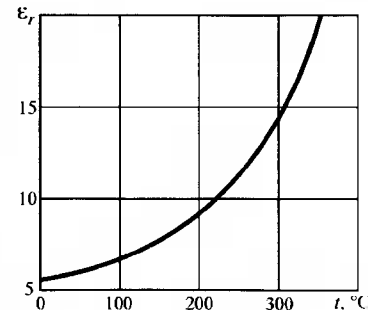


Рис. 2.8. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика-парафина

Рис. 2.9. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости электротехнического фарфора



Полярные органические диэлектрики характеризуются дипольной поляризацией. Диэлектрическая проницаемость указанных материалов в большой степени зависит от частоты приложенного напряжения, подчиняясь тем же закономерностям, какие наблюдаются для полярных жидкостей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое поляризация и какими параметрами она характеризуется?
2. Как определяется емкость плоского вакуумного конденсатора и емкость конденсатора тех же размеров с диэлектриком?
3. Какие бывают виды поляризации? В чем их особенности?
4. Как зависит ϵ_r при электронной и ионной поляризации от температуры и частоты?
5. Как зависит ϵ_r при дипольной поляризации от температуры и частоты?
6. Что такое температурный коэффициент диэлектрической проницаемости?

3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

3.1. Основные понятия

Электроизоляционные материалы, применяемые в технике, не являются идеальными диэлектриками в связи с присущей им небольшой электропроводностью. В технических диэлектриках всегда содержится небольшое количество свободных зарядов, которые под воздействием электрического поля создают слабые по величине сквозные токи проводимости, или токи утечки. Эти токи утечки сопровождаются выделением и нейтрализацией зарядов на электродах, между которыми расположен диэлектрик. Особенностью электропроводности диэлектриков является не только то, что она в основном носит не электронный, а ионный характер, но также и то, что в начальный период после включения постоянного напряжения сквозной ток сопровождается поляризационными токами, т. е. токами заряда емкостей в схеме замещения, показанной на рис. 2.6. Кроме того, возникают дополнительные токи поляризации, обусловленные неоднородностью структуры изоляции, когда на границе раздела диэлектриков с разными характеристиками накапливается поглощенный заряд — *заряд абсорбции*. Все эти токи создают так называемый *ток абсорбции*. Таким образом, полный ток i в диэлектрике (рис. 3.1) равен сумме токов утечки и абсорбции:

$$i = I_y + i_{аб}, \quad (3.1)$$

где I_y — ток утечки (сквозной ток), $i_{аб}$ — ток абсорбции.

Ток абсорбции изменяется с течением времени t по закону затухающей экспоненты:

$$i_{аб} = I_{аб.м} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где τ — постоянная времени заряда изоляции, $I_{аб.м}$ — максимальное значение тока абсорбции в начальный момент при $t = 0$.

Сопротивление изоляции после приложения напряжения определяют по формуле

$$R = \frac{U}{i} = \frac{U}{I_y + i_{аб}} = \frac{U}{I_y + I_{аб.м} \exp(-\frac{t}{\tau})}, \quad (3.2)$$

где U — приложенное напряжение.

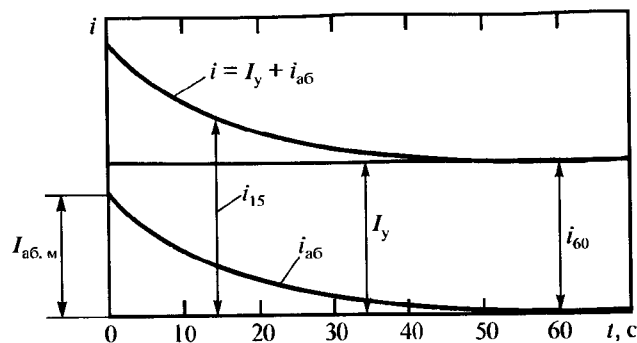


Рис. 3.1. Зависимость тока через диэлектрик от времени

Поскольку ток абсорбции со временем уменьшается, сопротивление изоляции возрастает. После завершения переходного процесса в установившемся режиме через диэлектрик протекает только ток сквозной проводимости I_y .

Ток абсорбции необходимо принимать во внимание при измерении проводимости диэлектрика, так как при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением регистрируется не только сквозной ток, но и сопровождающий его ток абсорбции. Вследствие этого может создаться неправильное представление о большой проводимости диэлектрика и его малом сопротивлении изоляции.

Истинное сопротивление диэлектрика, определяемое только сквозным током и называемое сопротивлением изоляции $R_{из}$, определяется по формуле:

$$R_{из} = \frac{U}{I_y}. \quad (3.3)$$

Следовательно, ток утечки и сопротивление изоляции нужно измерять спустя некоторое время после приложения напряжения, когда закончатся переходные процессы и ток абсорбции спадет до нуля. Обычно считают, что переходные процессы при заряде изоляции заканчиваются через 1 мин, поэтому за ток утечки принимают ток, измеренный через 1 мин после приложения напряжения. Его обозначают i_{60} и называют одноминутным значением тока утечки. Соответствующее ему сопротив-

ление R_{60} называют одноминутным значением сопротивления изоляции. Его определяют как

$$R_{60} = \frac{U}{i_{60}}. \quad (3.4)$$

Чтобы оценить величину тока абсорбции, протекающего в переходном режиме, измеряют ток утечки и сопротивление изоляции через 15 с после приложения напряжения, когда ток абсорбции еще не успевает уменьшиться до нуля. Сопротивление изоляции, измеренное через 15 с после приложения напряжения, называют пятнадцатисекундным значением сопротивления изоляции и обозначают R_{15} . Отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к пятнадцатисекундному значению называют коэффициентом абсорбции $K_{аб}$:

$$K_{аб} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}}. \quad (3.5)$$

Согласно действующим правилам, коэффициент абсорбции для неувлажненной изоляции при температуре 10—20 °С должен быть не менее чем 1,3. Для увлажненной изоляции коэффициент абсорбции близок к единице.

Заметим, что в США сопротивление изоляции измеряют через 1 мин и через 10 мин. В качестве установившегося значения берут десятиминутное значение сопротивления изоляции, а вместо коэффициента абсорбции вводят индекс поляризации P_1 как отношение десятиминутного значения сопротивления изоляции к одноминутному значению: $P_1 = \frac{R_{10}}{R_1}$.

В некоторых случаях (за рубежом) наряду с индексом поляризации P_1 вычисляют и нормируют коэффициент диэлектрической абсорбции (DAR), вычисляемый как отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к тридцатисекундному ее значению: $DAR = \frac{R_1}{R_{30}}$.

Сопротивление изоляции всех электротехнических изделий используется в качестве важнейшего критерия их работоспособности. Во всех технических нормативах оговариваются значения сопротивления изоляции или тока утечки при заданном напряжении.

Как видно из рис. 2.1, для твердого диэлектрика ток утечки может протекать через весь объем диэлектрика V , а также и по его поверхности S от одного электрода к другому электроду. В связи с этим для твердых электроизоляционных материалов различают объемный ток утечки I_V и поверхностный ток утечки I_S , а также *объемную* и *поверхностную* электропроводности и соответственно *объемное* и *поверхностное* сопротивления. Объемная электропроводность обусловлена свойствами самого диэлектрика. Поверхностная же электропроводность обусловлена присутствием на поверхности диэлектрика влаги и различных загрязнений. Поскольку вода отличается значительной электропроводностью, то достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы была обнаружена заметная электропроводность, определяемая в основном толщиной увлажненного слоя. Поскольку толщина адсорбированного слоя и его сопротивление связаны с природой материала, на поверхности которого находится этот слой, поверхностную электропроводность обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика. Поверхностная электропроводность тем ниже, чем меньше полярность вещества, чем чище поверхность диэлектрика и чем лучше она отполирована. Наиболее высокими значениями поверхностного сопротивления обладают неполярные диэлектрики, поверхность которых не смачивается водой (парафин, полиэтилен, фторопласт-4). Такие диэлектрики называются *гидрофобными*.

Пониженное значение поверхностного сопротивления можно наблюдать у полярных диэлектриков, частично растворимых в воде, у которых на поверхности образуется пленка электролита (керамика, резина, стекло). Такие диэлектрики называются *гидрофильными*. Кроме того, к поверхности полярных диэлектриков легко прилипают различные загрязнения.

Естественно, что гигроскопичность волокнистых материалов, имеющих объемно-пористую структуру, будет выше, а керамики, покрытой кремнийорганическими лаками, — ниже. Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Особенно резкое увеличение поверхностной электропроводности наблюдается при относительной влажности, превышающей 70—80 %.

На поверхности гидрофильного (смачиваемого) диэлектрика адсорбированная влага распределяется тонким непрерывным слоем, а на поверхности гидрофобного (несмачиваемого) диэлектрика влага распределяется отдельными «островками».

Образовавшийся на поверхности увлажненный и загрязненный слой имеет обычно небольшое сопротивление. Следовательно, поверхностный ток утечки может быть достаточно большим. Он может нагреть поверхность диэлектрика до температуры больше 100 °С. При такой температуре происходит вскипание воды на поверхности диэлектрика, образование микротрещин и разрушение поверхностного слоя изоляции. Для защиты поверхности гидрофильных материалов применяют грязеустойкие глазури и кремнийорганические лаки.

Для сравнительной оценки различных материалов по их объемной и поверхностной электропроводностям, пользуются значениями *удельного объемного сопротивления* ρ_V и *удельного поверхностного сопротивления* ρ_S .

В системе СИ удельное объемное сопротивление ρ_V численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит сквозь куб от одной его грани к противоположной. Единица измерения удельного объемного сопротивления Ом·м. Если для измерения берется не куб, а плоский образец материала, то при однородном поле удельное объемное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\rho_V = \frac{R_V S}{h}, \quad (3.6)$$

где R_V — объемное сопротивление образца, Ом; S — площадь электрода, м²; h — толщина образца, м.

Объемное сопротивление образца будет равно:

$$R_V = \rho_V \frac{h}{S}. \quad (3.7)$$

Удельное поверхностное сопротивление численно равно сопротивлению квадрата любых размеров, выделенного на поверхности исследуемого материала, если ток проходит через квадрат от одной его стороны до противоположной. Единица измерения удельного поверхностного сопротивления Ом. Если для измерения берется не квадрат, а прямоугольник, то удельное поверхностное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\rho_S = \frac{R_S d}{l}, \quad (3.8)$$

где R_S — поверхностное сопротивление образца материала между параллельно поставленными электродами шириной d , отстоящими друг от друга на расстоянии l .

Поверхностное сопротивление будет равно:

$$R_S = \rho_S \frac{l}{d}. \quad (3.9)$$

По удельному объемному сопротивлению можно определить удельную объемную проводимость $\gamma_V = \frac{1}{\rho_V}$, а по удельному поверхностному сопротивлению — удельную поверхностную проводимость $\gamma_S = \frac{1}{\rho_S}$. Удельная объемная проводимость γ_V измеряется в $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$, а удельная поверхностная проводимость γ_S — в сименсах (См).

Запишем закон Ома для объемного сопротивления:

$$I_V = \frac{U}{R_V} = \frac{U}{\rho_V \frac{h}{S}} = \frac{US}{\rho_V h}. \quad (3.10)$$

Разделив левую и правую части уравнения на величину площади S , получим:

$$\frac{I_V}{S} = \frac{U}{\rho_V h} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{E}{\rho_V} = \gamma_V E, \quad (3.11)$$

т. е. закон Ома в дифференциальной форме.

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению изоляции $R_{\text{из}}$, складывается из объемной и поверхностной проводимостей. Величина сопротивления изоляции находится как эквивалентное сопротивление параллельно включенных сопротивлений:

$$R_{\text{из}} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S}. \quad (3.12)$$

Пример 3.1. К диэлектрику прямоугольной формы размерами a , b и высотой h приложено постоянное напряжение $U = 1000$ В. Напряжение подводится к противоположным граням ab , покрытым слоями металла. Известны размеры диэлектрика: $a = 200$ мм, $b = 100$ мм, $h = 2$ мм, удельное объемное сопротивление $\rho_V = 2 \cdot 10^{10}$ Ом·м, а удельное поверхностное сопротивление $\rho_S = 8 \cdot 10^{10}$ Ом.

Требуется определить ток утечки, мощность потерь и удельные диэлектрические потери.

Решение. Ток утечки протекает как через объем диэлектрика, так и по поверхностям четырех боковых граней (через две грани a и через две грани b). Поэтому сопротивление между электродами определяется параллельным соединением объемного и поверхностного сопротивлений. Объемное сопротивление равно:

$$R_V = \rho_V \frac{h}{a \cdot b} = 2 \cdot 10^{10} \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 0,1} = 2 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 2 \text{ ГОм}.$$

Поверхностное сопротивление равно:

$$R_S = \rho_S \frac{h}{2(a+b)} = 8 \cdot 10^{10} \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2(0,2+0,1)} = 0,267 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 0,267 \text{ ГОм}.$$

Полное сопротивление изоляции равно:

$$R_{\text{из}} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S} = \frac{2 \cdot 10^9 \cdot 0,267 \cdot 10^9}{2 \cdot 10^9 + 0,267 \cdot 10^9} = 0,235 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 0,235 \text{ ГОм}.$$

$$\text{Ток утечки } I_y = \frac{U}{R_{\text{из}}} = \frac{1000}{0,235 \cdot 10^9} = 4,25 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 4,25 \text{ мкА}.$$

$$\text{Мощность потерь } P = UI_y = 1000 \cdot 4,25 \cdot 10^{-6} = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 4,25 \text{ мВт}.$$

$$\begin{aligned} \text{Удельные диэлектрические потери: } \Delta P &= \frac{P}{V} = \frac{P}{abh} \\ &= \frac{4,25 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,002} = 106 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}. \end{aligned}$$

Проводимость диэлектриков, как и их сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$, не является постоянной величиной. Они зависят от величины приложенного к образцу напряжения, температуры окружающей среды и влажности. Как правило, при увеличении приложенного напряжения и температуры проводимость диэлектриков увеличивается, а сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$ уменьшается. Увеличивается проводимость и с увеличением влажности.

При длительной работе под напряжением ток утечки через твердые и жидкие диэлектрики с течением времени может уменьшаться или увеличиваться. Уменьшение тока со временем говорит о том, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей и уменьшилась за счет электрической очистки

образца. Увеличение тока со временем говорит о протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения под действием напряжения. Это старение способно постепенно привести к разрушению диэлектрика, т. е. к его пробою.

Электропроводность изоляционных материалов в сильной степени зависит и от состояния вещества: газообразное, жидкое или твердое. Рассмотрим подробнее влияние состояния вещества на его электропроводность.

3.2. Электропроводность газов

Газы при *небольших напряженностях электрического поля* обладают исключительно малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа при малых напряженностях электрического поля может возникнуть только под действием внешних факторов (рентгеновские, ультрафиолетовые, космические лучи, радиоактивное излучение, а также термическое воздействие — сильный нагрев газа). При ионизации газа, обусловленной внешними факторами, происходит расщепление молекул на положительные и отрицательные ионы. Электропроводность газа, обусловленная действием внешних факторов, называется *несамостоятельной*.

Одновременно с процессом ионизации происходит и процесс рекомбинации, когда часть положительных ионов вновь соединяется с отрицательными частицами и образует нейтральные молекулы. Рекомбинация препятствует безграничному росту числа ионов в газе и объясняет установление определенной концентрации ионов, спустя короткое время после начала действия внешнего ионизатора. Предположим, что ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено электрическое напряжение. Под действием напряжения часть ионов будет перемещаться и нейтрализоваться на электродах, в цепи возникнет электрический ток. Другая часть ионов исчезнет за счет рекомбинации. Из сказанного следует, что электропроводность газов имеет смешанный характер — ионный и электронный.

Наиболее распространенным газообразным диэлектриком является воздух. В качестве примера на рис. 3.2 показана зависимость тока в воздухе от напряжения. В начале кривой до напряжения U_n ток пропорционален напряжению, т. е. выполняется закон Ома. При $U > U_n$ ток достигает насыщения и дальнейшее увеличение напряжения не вы-

зывает увеличения тока. Ток насыщения зависит от интенсивности внешней ионизации. Реальное значение плотности тока насыщения в воздухе в нормальных условиях весьма мало и составляет примерно 10^{-15} А/м². Поэтому воздух при напряжениях $U < U_{кр}$ можно рассматривать как весьма совершенный диэлектрик.

При *больших значениях напряженности электрического поля* (при $U > U_{кр}$) возможна ударная ионизация нейтральных молекул за счет соударений заряженных частиц с молекулами газа. Ударная ионизация возникает в тех случаях, когда кинетическая энергия заряженных частиц, движущихся под действием сильного электрического поля, достигает достаточно больших значений. Электропроводность газа, обусловленная ударной ионизацией, носит название *самостоятельной*. При возникновении самостоятельной проводимости ток вновь начинает увеличиваться с возрастанием напряжения.

Самостоятельная проводимость может возникнуть только в сильных электрических полях. В слабых электрических полях ударная ионизация отсутствует, и самостоятельная электропроводность не наблюдается.

3.3. Электропроводность жидкостей

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В неполярных жидкостях электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей, в том числе влаги. Напомним, что диссоциация есть разложение молекул на несколько более простых частиц — молекул, атомов, радикалов или ионов, а также разложение сложных молекул на более простые. В полярных жидкостях электропроводность определяется не только примесями, но иногда и диссоциацией молекул самой жидкости. Ток в жидкости может быть обусловлен как передвижением ионов, так и перемещением относительно крупных заряженных коллоидных частиц.

Полярные жидкости всегда имеют повышенную проводимость по сравнению с неполярными. Сильнополярные жидкости,

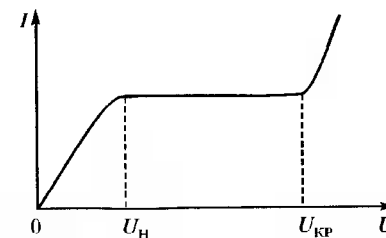


Рис. 3.2. Зависимость тока в воздухе от напряжения

например вода, обладают настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью. В табл. 3.1 приведены значения удельного объемного сопротивления и диэлектрической проницаемости некоторых жидкостей при температуре 20 °С.

Таблица 3.1

Сравнительные значения ρ_v и ϵ_r для различных жидкостей

Жидкость	Особенности строения жидкости	Удельное сопротивление ρ_v , Ом·м, при $t = 20$ °С	Диэлектрическая проницаемость ϵ_r
Трансформаторное масло	Неполярная	10^{10} – 10^{13}	2,2
Совол	Полярная	10^8 – 10^{10}	4,5
Дистиллированная вода	Сильнополярная	10^3 – 10^4	80

Очистка жидких диэлектриков от содержащихся в них примесей заметно повышает их удельное сопротивление. При длительном пропускании электрического тока через нейтральный жидкий диэлектрик можно наблюдать возрастание сопротивления за счет переноса свободных ионов к электродам (*электрическая очистка*).

Удельная проводимость любой жидкости сильно зависит от температуры. С увеличением температуры возрастает подвижность ионов в связи с уменьшением вязкости и может увеличиваться степень тепловой диссоциации. Оба эти фактора повышают проводимость. Зависимость удельной проводимости жидких диэлектриков от температуры может быть выражена следующей формулой:

$$\gamma = \gamma_0 \exp[\alpha(T - T_0)], \quad (3.13)$$

где α — постоянная величина для данной жидкости, γ_0 — удельная проводимость при температуре T_0 , T — температура, °С.

При больших напряженностях электрического поля электропроводность жидкостей увеличивается за счет увеличения числа движущихся под влиянием поля ионов.

В коллоидных системах наблюдается *электрофоретическая электропроводность*, при которой носителями заряда являются группы молекул — *молионы*, несущие на себе электрические заряды. При наложении электрического поля молионы приходят в движение, что и выражается внешне как явление *электрофореза*.

3.4. Электропроводность твердых тел

Электропроводность твердых тел обуславливается передвижением как ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей. У некоторых твердых диэлектриков электропроводность может быть вызвана наличием свободных электронов. Электронная электропроводность наиболее заметна при сильных электрических полях. Вид электропроводности устанавливается экспериментально, используя закон Фарадея. Ионная электропроводность сопровождается переносом вещества. При электронной электропроводности это явление не наблюдается. При прохождении электрического тока через твердый диэлектрик содержащиеся в нем ионы могут частично удаляться, выделяясь на электродах, как это имеет место в жидкостях.

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена главным образом перемещением ионов. При низких температурах передвигаются слабозакрепленные ионы, в частности ионы примесей. При высоких температурах освобождаются и некоторые ионы из узлов кристаллической решетки.

Для приближенных расчетов удельной проводимости в зависимости от температуры T можно пользоваться также, как и для жидких диэлектриков, выражением (3.13). В ряде случаев более простой и дающей хорошее совпадение с практикой оказывается формула для удельной проводимости

$$\gamma = \gamma_0 \cdot 2^{\frac{T-T_0}{\Delta T}} \quad (3.14)$$

и сопротивления изоляции

$$R = R_0 \cdot 2^{\frac{T-T_0}{\Delta T}}, \quad (3.15)$$

где ΔT — постоянный коэффициент, значение которого изменяется от 10 до 18 °С, γ и R — удельная проводимость и сопротивление изоляции при температуре T , γ_0 и R_0 — удельная проводимость и сопротивление изоляции при температуре T_0 .

На рис 3.3 показана зависимость тока утечки через изоляцию тягового электродвигателя от температуры при различных значениях испытательного напряжения постоянного тока.

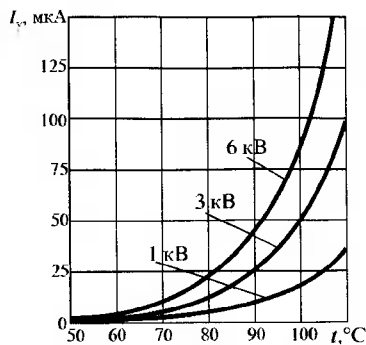


Рис. 3.3. Зависимость тока утечки через изоляцию тягового электродвигателя от температуры при различных значениях испытательного напряжения постоянного тока

сти γ от E , β — коэффициент, характеризующий материал.

При напряженностях поля, близких к пробивным значениям, более точной оказывается формула Френкеля

$$\gamma_E = \gamma \exp(\beta_1 \sqrt{E}), \quad (3.17)$$

где β_1 — коэффициент, характеризующий материал.

Значения удельного объемного сопротивления твердых пористых диэлектриков при различной относительной влажности воздуха и температуре приведено в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения удельного объемного сопротивления ρ_v твердых пористых диэлектриков при различной относительной влажности воздуха и температуре

Материал	Значения ρ_v , Ом·м при относительной влажности воздуха		
	70% ($t = 20^\circ\text{C}$)	0% ($t = 100^\circ\text{C}$)	0% ($t = 20^\circ\text{C}$)
Мрамор	$10^6 - 10^8$	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{12} - 10^{14}$
Дерево	$10^6 - 10^7$	$10^{10} - 10^{11}$	$10^{11} - 10^{12}$
Фибра	$10^6 - 10^7$	$10^8 - 10^9$	$10^{11} - 10^{12}$

Электропроводность диэлектрика зависит от величины напряженности электрического поля. При больших напряженностях электрического поля от 10 до 100 кВ/мм в кристаллических диэлектриках резко возрастает электронный ток, электропроводность диэлектрика резко возрастает, а сопротивление изоляции падает. Зависимость удельной проводимости от напряженности электрического поля может быть выражена эмпирической формулой Пуля

$$\gamma_E = \gamma \exp(\beta E), \quad (3.16)$$

где E — напряженность поля, γ — удельная проводимость в области независимости γ от E , β — коэффициент, характеризующий материал.

3.5. Процесс саморазряда изоляции

С учетом электропроводности изоляции схема замещения ее может быть представлена как параллельное соединение активного сопротивления R и емкости C (рис. 3.4, а). Если зарядить конденсатор C , зашунтированный резистором R , до напряжения U_0 (переключатель P в положении 1), а затем отключить его от источника напряжения и оставить разомкнутым (переключатель P в положении 2), то конденсатор C будет постепенно разряжаться на резистор R .

Напряжение на конденсаторе при этом будет изменяться по закону затухающей экспоненты (рис. 3.4, б):

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (3.18)$$

Величина $\tau = RC$ называется постоянной времени саморазряда конденсатора. Она измеряется в секундах и равна тому промежутку времени, в течение которого напряжение на конденсаторе уменьшится в $e = 2,718$ раза и составит $0,368 U_0$. Постоянная времени может быть представлена как подкасательная к кривой саморазряда. Чем больше постоянная времени, тем медленнее идет процесс саморазряда. Кривая саморазряда на рис. 3.4, б построена для напряжения $U_0 = 1000$ В и постоянной времени саморазряда $\tau = RC = 20$ с.

Представим себе, что в качестве изолятора используется диэлектрик прямоугольной формы, площадь поперечного сечения которого S , а толщина h . Будем учитывать только объемную проводимость

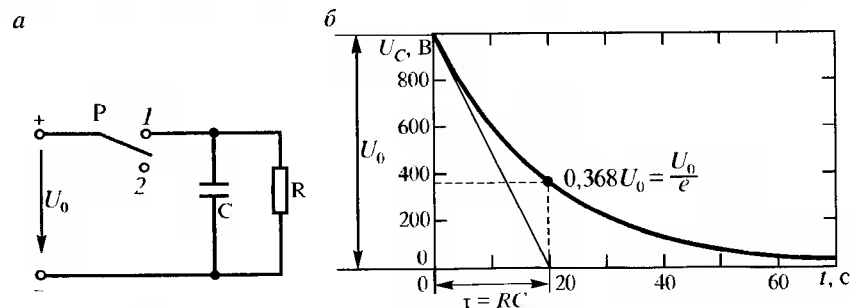


Рис. 3.4. Схема для измерения напряжения саморазряда (а) и зависимость напряжения саморазряда от времени (б)

и соответственно только объемное сопротивление, т. е. считать, что полное сопротивление изоляции равно объемному сопротивлению. Тогда с учетом формул (3.7) и (2.15) будем иметь:

$$\tau = R_V C = \rho_V \frac{h}{S} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{h} = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_V. \quad (3.19)$$

Важный вывод: постоянная времени саморазряда изоляции не зависит от геометрических размеров изоляции, а определяется исключительно свойствами изоляции. Более строгий анализ показывает, что постоянная времени не зависит и от формы изоляции. Постоянная времени саморазряда изоляции является важным параметром, определяющим качество изоляции. Чем выше значение τ , тем выше качество изоляции.

Значение постоянной времени несложно измерить на практике. Приведем порядок постоянных времени для некоторых электротехнических изделий. Постоянная времени тягового двигателя электровоза составляет в среднем 40—80 с, кабеля с бумажно-масляной изоляцией — 10 ч, а пленочного полистирольного конденсатора — примерно один месяц.

Пример 3.2. Конденсатор из пленочного диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3$ теряет при саморазряде за время 25 мин половину своего заряда. Полагая, что ток утечки происходит только через пленку диэлектрика, определить его удельное сопротивление.

Решение. Напряжение на конденсаторе при саморазряде изменяется в соответствии с формулой (3.18). Если в уравнении (3.18) будем выражать время в минутах, то напряжение на 25-й минуте будет равно

$u_{25} = U_0 e^{-\frac{25}{\tau}}$. Нам известно, что $u_{25} = 0,5 \cdot U_0$, следовательно, мы можем записать: $0,5 = e^{-\frac{25}{\tau}}$ или $2 = e^{\frac{25}{\tau}}$. Отсюда: $\tau = \frac{25}{\ln 2} = 36,067$ мин или

2164 с. Используя формулу (3.19), определяем удельную объемную проводимость: $\rho_V = \frac{\tau}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{2164}{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 8,15 \cdot 10^{13}$ Ом·м.

3.6. Нормы сопротивления изоляции

Правила устройства электроустановок нормируют сопротивление изоляции при контрольных и типовых испытаниях, например, сопротивление изоляции $R_{из}$ для электрических машин при рабочей температуре рассчитывается по формуле:

$$R_{из} = \frac{U_H}{1000 + 0,01 P_H}, \quad (3.20)$$

где U_H — номинальное напряжение в вольтах; P_H — номинальная мощность электрической машины в кВт.

Сопротивление изоляции, рассчитанное по этой формуле, получается в мегаомах. Для машин малой и средней мощности сопротивление изоляции практически вычисляется по формуле:

$$R_{из} = \frac{U_H}{1000}, \quad (3.21)$$

что соответствует величине сопротивления 1 МОм на 1000 В рабочего напряжения. Если величину сопротивления выражать в килоомах, то формула (3.21) примет вид: $R_{из} = U_H$, что соответствует величине сопротивления 1 кОм на один вольт рабочего напряжения. Чем больше величина сопротивления $R_{из}$ при заданном значении U_H , тем лучше изоляция, поэтому отношение $\frac{R_{из}}{U_H}$ может служить некоторой оценкой состояния изоляции.

Например, для тяговых электродвигателей, находящихся в эксплуатации, предложены критерии оценки изоляции (табл. 3.3) [18].

Таблица 3.3

Оценки для сопротивления изоляции тяговых электродвигателей, находящихся в эксплуатации

$\frac{R_{из}}{U_H}$, кОм/В	Качество изоляции
< 1	Неудовлетворительное
1	Удовлетворительное
10	Хорошее

Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции обмоток машин постоянного тока

Температура обмоток, °С	Сопротивление изоляции R_{60} , МОм при номинальном напряжении машин, В				
	230	460	650	750	900
10	2,7	5,3	8,0	9,3	10,8
20	1,85	3,7	5,45	6,3	7,5
30	1,3	2,6	3,8	4,4	5,2
40	0,85	1,75	2,5	2,9	3,5
50	0,6	1,2	1,75	2,0	2,35
60	0,4	0,8	1,15	1,35	1,6
70	0,3	0,5	0,8	0,9	1,0
75	0,22	0,45	0,65	0,75	0,9

У электрических машин высокого напряжения, кроме величины сопротивления изоляции нормируется и коэффициент абсорбции $K_{аб} = \frac{R_{60}}{R_{15}}$, который должен быть не менее чем 1.3.

Следует иметь в виду, что при изменении температуры изменяется и величина сопротивления изоляции: она уменьшается в 2 раза при повышении температуры на каждые ΔT °С в соответствии с формулой (3.15). Например, для изоляции некоторых типов тяговых электродвигателей ΔT можно принять равным 10 °С, т. е. считать, что сопротивление изоляции уменьшается в 2 раза при увеличении температуры на каждые 10 °С (см. рис. 3.3). Таким образом, зная величину сопротивления изоляции $R_{из0}$ при температуре T_0 , можно определить величину сопротивления изоляции $R_{из}$ при температуре T по формуле:

$$R_{из} = \frac{R_{из0}}{2^{\frac{T-T_0}{10}}}$$

Здесь температурный интервал можно выражать как в Кельвинах, так и в градусах Цельсия.

Пример 3.3. Сопротивление изоляции тягового электродвигателя при температуре 10 °С было равно 48 МОм. Чему будет равно сопротивление изоляции этой же электрической машины при температуре 40 °С, если $\Delta T = 10$ °С?

Решение. Величину сопротивления изоляции $R_{из}$ найдем по формуле:

$$R_{из} = \frac{R_{из0}}{2^{\frac{T-T_0}{10}}} = \frac{48}{2^{\frac{40-10}{10}}} = \frac{48}{2^3} = \frac{48}{8} = 6 \text{ МОм.}$$

Отметим, что для других типов тяговых двигателей величина ΔT оказывается равной 18 °С.

Читателю предлагается самому убедиться в том, что приводимые в Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей [30] наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции обмоток машин постоянного тока R_{60} в зависимости от температуры обмоток связаны зависимостью, для которой $\Delta T = 18$ °С (табл. 3.4).

3.7. Методы измерения сопротивления изоляции

Измерение сопротивления изоляции электрооборудования можно производить амперметром и вольтметром или с помощью специального прибора — мегаомметра. Существуют мегаомметры с ручным и моторным приводом, а также мегаомметры со статическим преобразователем напряжения. Последние иногда называют электронными мегаомметрами. Они получают питание от сети или от внутренних батарей.

Измерительным элементом мегаомметров с ручным и моторным приводом является логометр, показания которого в широких пределах пропорциональны отношению токов, протекающих в двух его подвижных обмотках, расположенных под углом. На рис. 3.5 показана принципиальная схема мегаомметра МС06. По обмотке напряжения 1 проходит ток, пропорциональный напряжению источника питания 2, а по токовой обмотке 3 — протекающий через изоляцию. Поэтому показания логометра пропорциональны сопротивлению изоляции [4, 6].

В качестве источника питания служит электромеханический генератор с ручным приводом. Поскольку изменения напряжения источника питания могут вызвать значительные емкостные токи, эти колебания напряжения могут отмечаться как колебания сопротивления изоляции. Кроме того, следует учесть, что величина сопротивления изоляции зависит от величины приложенного к ней на-

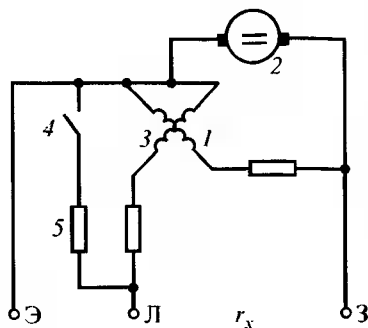


Рис. 3.5. Упрощенная схема мегаомметра с электромеханическим генератором для измерения сопротивления изоляции

должно быть достаточно высоким, чтобы можно было выявить как можно больше дефектов. Однако оно не должно превышать значений, при которых возможен пробой неповрежденной изоляции. У отечественных мегаомметров источники питания выполнены на напряжениях 100, 500, 1000 или 2500 В.

Мегаомметр имеет три зажима с надписями: Л, З, Э («Линия», «Земля», «Экран»). Зажим «Экран» служит для того, чтобы результаты измерений не искажались поверхностными токами утечки. Схема измерения сопротивления изоляции с помощью мегаомметра и

пряжения. Для уменьшения колебаний напряжения электромеханического генератора с ручным приводом рукоятку следует вращать равномерно с частотой 120 мин^{-1} . При этой частоте вращения вступает в работу регулятор скорости генератора мегаомметра.

Для расширения пределов измерения с помощью переключателя 4 параллельно токовой обмотке может быть подключен шунтирующий резистор 5. Напряжение мегаомметра нужно выбирать в соответствии с рекомендациями Правил устройства электроустановок (ПУЭ). Оно

должно быть достаточно высоким, чтобы можно было выявить как можно больше дефектов. Однако оно не должно превышать значений, при которых возможен пробой неповрежденной изоляции. У отечественных мегаомметров источники питания выполнены на напряжениях 100, 500, 1000 или 2500 В.

Мегаомметр имеет три зажима с надписями: Л, З, Э («Линия», «Земля», «Экран»). Зажим «Экран» служит для того, чтобы результаты измерений не искажались поверхностными токами утечки. Схема измерения сопротивления изоляции с помощью мегаомметра и защитного кольца, соединенного с экраном, приведена на рис. 3.6.

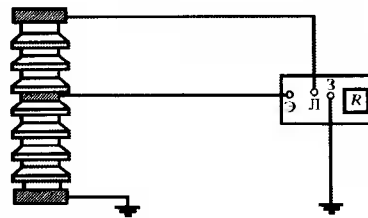


Рис. 3.6. Схема измерения сопротивления изоляции мегаомметром с защитой от поверхностных токов утечки

тотой 50 или 60 Гц. Допустимы колебания питающего напряжения в пределах 187...242 В. Предусмотрена также возможность питания от встроенных химических источников тока напряжением 10...14 В. Ресурс встроенного источника тока в нормальных условиях применения не менее 250 измерений. Режим работы мегаомметров повторно-кратковременный: одно измерение — двухминутная пауза. Время заряда емкости объекта величиной не более 0,5 мкФ не превышает 15 с.

Основным элементом мегаомметра (см. рис. 3.7) является преобразователь высокого напряжения ПВН. Он преобразует с помощью генератора Ройера постоянное напряжение встроенных батарей (или выпрямленное напряжение сети) в стабильное переменное напряжение высокой частоты, которое затем подается на высоковольтный умножитель напряжения. С выхода умножителя напряжения снимают постоянное напряжение нужной величины.

Поскольку напряжение мегаомметра стабилизированное, отпадает необходимость в применении логометра. Вместо токовой обмотки, последовательно с измеряемым сопротивлением изоляции, включен операционный усилитель У с обратной связью (логарифмический усилитель). К выходу усилителя подключен магнитоэлектрический измерительный прибор ИП, шкала которого проградуирована в мегаомах и килоомах. В качестве измерительного прибора используется микроамперметр М903. За счет соответствующей обратной связи напряжение на выходе усилителя обратно пропорционально току на входе, а показание измерительного прибора пропорционально сопротивлению изоляции.

В последнее время отечественная промышленность освоила выпуск мегаомметров М1, М1-ЖТ и М2 для измерения сопротивления изоляции при напряжении 1 и 2,5 кВ. Пределы измерения сопротивления изоляции от 10 кОм до 200 ГОм.

Мегаомметр М1 предназначен для измерения сопротивления изоляции промышленного электрооборудования. Мощность источника рабочего напряжения 3 Вт.

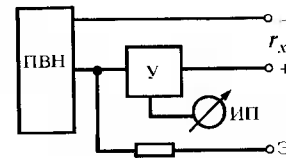


Рис. 3.7. Упрощенная схема мегаомметра со статическим источником питания

Мегаомметр М1-ЖТ предназначен для измерения сопротивления изоляции электрооборудования железнодорожного транспорта. Мощность источника рабочего напряжения 3 Вт.

Мегаомметр М2 имеет повышенную мощность источника питания (15 Вт) и предназначен для измерения сопротивления изоляции электрооборудования генераторов без демонтажа системы охлаждения и цепей вторичной коммутации.

Мегаомметр М1-ЖТ имеет внутреннюю энергонезависимую память, позволяющую автоматически записывать до 450 измерений с возможностью переноса данных на персональный компьютер.

Питание мегаомметров осуществляется от сети 220 В частотой 50...60 Гц или от встроенной аккумуляторной батареи напряжением 12 В. Полностью заряженная батарея обеспечивает не менее 150 измерений. Предел измерения выбирается автоматически.

Приборы снабжены буквенно-цифровым индикатором на жидкокристаллическом дисплее. На индикатор выводятся: дата, текущее значение времени измерения и сопротивление изоляции, напряжение, подаваемое на измеряемый объект, и коэффициент абсорбции.

Из зарубежных измерительных приборов следует отметить цифровые высоковольтные измерители сопротивления изоляции 6210 IN, 6211 IN и 6212 IN с установкой напряжения от 500 до 10000 В, а также цифровые измерители сопротивления изоляции 2801 IN (напряжения 250, 500 и 1000 В), 2803 IN (напряжения 500, 1000, 2500 и 5000 В) и 2804 IN (напряжения 1000, 2500, 5000 и 10000 В). Указанные измерители способны создать ток в нагрузке до 1 мА. Для измерения сопротивления изоляции низкоомных цепей с током через изоляцию до 200 мА служит цифровой измеритель сопротивления изоляции 1851 IN.

Большими возможностями обладают мегаомметры С.А 6545 и С.А 6547. Они имеют большой жидкокристаллический дисплей с цифровым и аналоговым отображением информации. На экране отображается график $R(t)$ и автоматически вычисляются параметры:

индекс поляризации $P_1 = \frac{R_{10\min}}{R_{1\min}}$, коэффициент диэлектрической

абсорбции $DAR = \frac{R_{1\min}}{R_{30}}$ и коэффициент диэлектрического разряда DD

(Dielectric Discharge), который вычисляется как величина, обратно пропорциональная постоянной времени разряда. Приборы имеют

встроенный микропроцессор и позволяют измерить сопротивление изоляции до 10 ТОм при постоянном и переменном напряжении до 5 кВ. Прибор С.А 6547 имеет память и порт связи для передачи данных из памяти в компьютер.

Качество изоляции может считаться хорошим, если указанные выше параметры имеют значения: $P_1 = 2...4$, $DAR = 1,25...1,6$, $DD < 2$. Качество изоляции плохое, если $P_1 = 1...2$, $DAR < 1,25$, $DD > 4$.

Для измерения объемного и поверхностного сопротивлений может быть использован переносной тераомметр типа МОМ-4, предназначенный для измерения электрического сопротивления с дополнительным охраняемым (экранирующим) электродом.

Принципиальная схема тераомметра при измерении поверхностного сопротивления приведена на рис. 3.8. Принцип работы тераомметра заключается в том, что измеряемое сопротивление R_x соединяется последовательно с известным эталонным резистором R_3 , образуя делитель напряжения, питаемый от стабилизированного источника напряжения U_0 . Напряжение с нижнего плеча делителя напряжения подается на вход усилителя $У$ с обратной связью. На выходе усилителя включен микроамперметр, проградуированный в килоомах и тераомах. Регулируемый резистор R_k служит для коррекции (настройки чувствительности) измерительного прибора. Величина измеряемого сопротивления определяется по формуле:

$$R_x = \frac{U_0 R_3}{U_3} - R_3. \quad (3.22)$$

Если имеется регулируемый источник постоянного напряжения, то для оценки состояния изоляции можно снять ее вольт-амперную характеристику. Резкий излом в характеристике говорит о неудовлетворительном состоянии изоляции или об ее увлажнении. Критерием увлажненности может быть отношение одноминутных значений сопротивлений изоляции, измеренных при напряжениях,

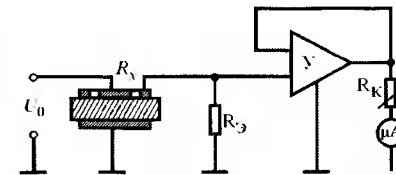


Рис. 3.8. Принципиальная схема тераомметра при измерении поверхностного сопротивления

равных $0,5U_H$ и $2U_H$. Это отношение называют коэффициентом нелинейности K_H :

$$K_H = \frac{R_{0,5U_H}}{R_{2U_H}}$$

Для неувлажненной изоляции коэффициент нелинейности должен быть не более чем 2,3.

3.8. Сушка изоляции

Изоляция обмоток электрических машин может увлажняться при транспортировке, хранении, монтаже, ремонте или длительной остановке. Вследствие этого перед включением машины в работу необходимо проверить состояние ее изоляции. Если полученные данные говорят об увлажнении изоляции и ее неудовлетворительном состоянии, то изоляцию необходимо подвергнуть сушке.

Удаление влаги из изоляции обмотки электрической машины происходит за счет диффузии, вызывающей перемещение влаги в направлении потока тепла. Нагревание не должно производиться очень быстро, иначе температура внутренних частей может достигнуть опасной величины, в то время как нагрев наружных частей будет значительно меньше. Местный перегрев может настолько повредить изоляцию, что значительно сократится ее срок службы. Во избежание таких перегревов скорость подъема температуры обмотки во время сушки не должна превышать 4°C в час. Контрольные измерения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции рекомендуются производить не реже чем через 2 ч при температуре обмоток, близкой к рабочей температуре. Сушку прекращают после того, как величина сопротивления изоляции будет при постоянной температуре практически неизменной в течение 2 ч и величина коэффициента абсорбции будет иметь значение не ниже чем 1,3.

Сопротивление изоляции обмоток электрической машины в начале сушки снижается, а затем возрастает и, достигнув некоторой величины, становится постоянной.

Для поддержания изоляции машин сухой во время длительных остановок при колебаниях температуры воздуха и большой его влажности машины необходимо подогревать. Мощность по-

догревателей выбирают приблизительно из расчета 1 кВт на 5 т веса электрических машин (или на 500 кВт мощности).

Основными способами сушки электрических машин являются: сушка наружным обогревом, сушка индукционными потерями, сушка током. Указанные способы сушки требуют значительных затрат электроэнергии. Однако существует еще один способ, который практически не требует затрат электроэнергии. Это сушка с помощью *осмоса*. При этом способе на изоляцию подают напряжение, и сушка происходит за счет медленной диффузии (проникновения) капиллярной влаги через изоляцию как через мембрану или диафрагму наружу. Многие изоляционные материалы — резина, бумага, электрокартон, фарфор, фторопласт — обладают свойствами диафрагмы, что позволяет осуществить электроосмос.

Электроосмотический перенос влаги происходит при очень малых плотностях тока — не более 1 mA/m^2 , поэтому выделяемая мощность при этом способе сушки ничтожно мала и десорбция влаги происходит без повышения температуры изоляционного слоя. Время высушивания изоляции зависит от объема увлажненного слоя и измеряется минутами, часами, а иногда десятками часов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем вызван сквозной ток утечки через диэлектрик и какой характер он носит?
2. Что такое ток абсорбции и коэффициент абсорбции?
3. Как измеряют сопротивление изоляции?
4. Что такое объемное и поверхностное удельное сопротивление?
5. Что такое напряжение саморазряда?
6. Чему равна постоянная времени саморазряда?
7. Что называется самостоятельной и несамостоятельной проводимостью газа?
8. Как устанавливаются нормы изоляции?
9. Как производят сушку изоляции?

4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

4.1. Основные понятия

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика. Потери мощности в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку диэлектрики не являются идеальными и в них всегда присутствует сквозной ток, обусловленный электропроводностью. При постоянном напряжении потери вызываются только одной сквозной проводимостью (объемной и поверхностной), а при переменном напряжении к ним добавляются потери на поляризацию, связанные с преодолением сил внутреннего трения при повороте дипольных молекул диэлектрика. Потери на переменном напряжении всегда больше, чем на постоянном. Эти потери пропорциональны активной составляющей тока (см. рис. 2.4, б).

Активная составляющая тока выражается через тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. Угол диэлектрических потерь δ дополняет угол сдвига φ между напряжением и током до 90° . Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол δ и его тангенс. При отсутствии потерь угол $\delta = 0$, а угол $\varphi = 90^\circ$. В технике используют не сам угол δ , а его тангенс. Значения $\operatorname{tg}\delta$ для качественных диэлектриков, работающих на высоких частотах при высоких напряжениях, составляют тысячные и даже десятитысячные доли. Для диэлектриков, применяемых в менее ответственных случаях, $\operatorname{tg}\delta$ составляет сотые доли. Иногда $\operatorname{tg}\delta$ выражают в процентах. Отметим, что $\operatorname{tg}\delta$ может характеризовать не только конкретный электротехнический материал, но и изоляционную конструкцию машины, аппарата или прибора в целом. Удельными диэлектрическими потерями называют потери в диэлектрике, отнесенные к единице объема. Недопустимо большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению. Кроме того, большие потери снижают качественные показатели изделия. Природа диэлек-

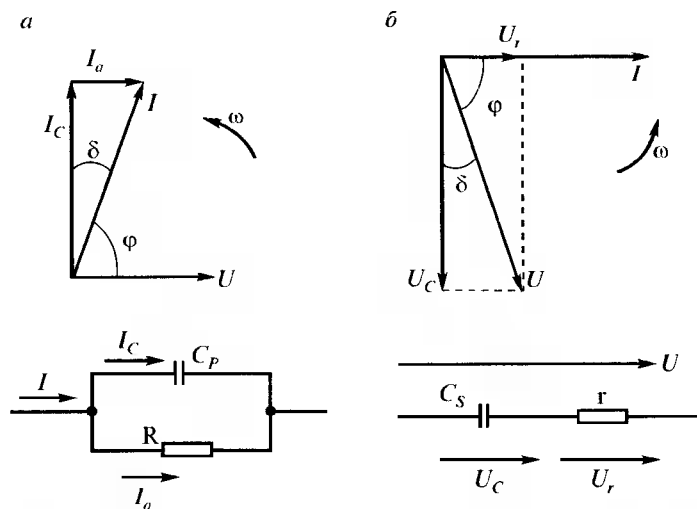


Рис. 4.1. Векторные диаграммы и эквивалентные схемы диэлектрика с потерями: а — параллельная; б — последовательная

трических потерь в электроизоляционных материалах различна в зависимости от строения вещества.

Рассмотрим схему замещения конденсатора с диэлектриком, обладающим потерями, при воздействии на такой конденсатор переменного напряжения. Схема замещения может быть представлена цепочкой с параллельным или последовательным соединением идеального конденсатора без потерь и резистора (рис. 4.1). Параметры схемы следует выбирать с таким расчетом, чтобы активная мощность, выделяемая в резисторе, была бы равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а ток в цепи был бы равен току в конденсаторе и опережал бы напряжение на тот же угол, что и в конденсаторе. Такие эквивалентные схемы не дают объяснения механизма диэлектрических потерь и введены лишь условно для получения основных расчетных соотношений в диэлектрике.

На рис. 4.1 приведены векторные диаграммы для параллельной и последовательной схем замещения диэлектрика с потерями.

Для параллельной схемы замещения из векторной диаграммы на рис. 4.1, *a* с учетом того, что $\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_C}$, получим:

$$P_a = UI_a = UI_C \operatorname{tg}\delta = U^2 \omega C_p \operatorname{tg}\delta. \quad (4.1)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_C} = \frac{\frac{U}{R}}{U\omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R}. \quad (4.2)$$

Из уравнений (4.1) и (4.2) определим параметры параллельной схемы замещения:

$$C_p = \frac{P_a}{U^2 \omega \operatorname{tg}\delta}, \quad (4.3)$$

$$R = \frac{1}{\omega C_p \operatorname{tg}\delta} = \frac{U^2 \omega \operatorname{tg}\delta}{\omega P_a \operatorname{tg}\delta} = \frac{U^2}{P_a}. \quad (4.4)$$

Для последовательной схемы замещения из векторной диаграммы на рис. 4.1, *b* имеем:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_r}{U_C} = \frac{Ir}{I \frac{1}{\omega C_S}} = \omega C_S r. \quad (4.5)$$

$$P_a = U_r I = Ir \frac{U}{z} = \frac{U}{z} r \frac{U}{z} = \frac{U^2}{z^2} r = \frac{U^2 r}{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C_S}\right)^2} = \frac{U^2 r}{r^2 \left(1 + \left(\frac{1}{\omega C_S r}\right)^2\right)} = \frac{U^2}{r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right)} = \frac{U^2 \operatorname{tg}^2 \delta}{r(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)} = \frac{U^2 \omega C_S \operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}.$$

Или окончательно

$$P_a = \frac{U^2 \omega C_S \operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (4.6)$$

Из уравнений (4.6) и (4.5) определим параметры последовательной схемы замещения:

$$C_S = \frac{P_a(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}{U^2 \omega \operatorname{tg}\delta}, \quad (4.7)$$

$$r = \frac{\operatorname{tg}\delta}{\omega C_S} = \frac{U^2 \operatorname{tg}^2 \delta}{P_a(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}. \quad (4.8)$$

Разделим друг на друга выражения (4.3) и (4.7), тогда

$$\frac{C_p}{C_S} = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad (4.9)$$

а затем выражения (4.4) и (4.8):

$$\frac{R}{r} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (4.10)$$

Из выражений (4.9) и (4.10) найдем соотношения между параметрами параллельной и последовательной схемами замещения:

$$C_p = \frac{C_S}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad (4.11)$$

$$R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right), \quad (4.12)$$

$$C_S = C_p(1 + \operatorname{tg}^2 \delta), \quad (4.13)$$

$$r = \frac{R}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}}. \quad (4.14)$$

Следует иметь в виду, что параметры эквивалентной схемы (C_p , R и C_S , r) в общем случае относятся только к какой-то одной частоте и их нельзя считать постоянными для всех частот. Для диэлектриков с малыми потерями в формулах (4.11) и (4.13) можно пренебречь значением $\operatorname{tg}^2 \delta$ по сравнению с единицей и считать, что

$C_p \approx C_S = C$. Выражение для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут одинаковы для обеих схем:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (4.15)$$

Сопротивление R в параллельной схеме, как следует из выражения (4.12) во много раз больше сопротивления r .

Выражение для удельных диэлектрических потерь, т. е. мощности, рассеиваемой в единицу объема диэлектрика, имеет вид:

$$\Delta P = \frac{P}{V} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{V}. \quad (4.16)$$

Для диэлектрика прямоугольной формы, имеющего площадь электродов S и толщину d между электродами, на которые подается напряжение U , объем выражается формулой $V = Sd$, а емкость $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$. Тогда выражение для удельных потерь можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{P}{V} = \frac{U^2 \omega \epsilon_0 \epsilon_r S \operatorname{tg} \delta}{d S d} = \frac{U^2 \omega \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta}{d^2} = \\ &= \omega \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta E^2 = \gamma_a E^2. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Здесь γ_a — удельная объемная активная проводимость данного диэлектрика при переменном напряжении. Обычно $\gamma_a > \gamma$. Уравнение (4.17) представляет собой закон Джоуля—Ленца в дифференциальной форме. При постоянном напряжении этот закон для удельных потерь запишется: $\Delta P = \frac{E^2}{\rho} = \gamma E^2$.

Как следует из формулы (4.17), потери мощности в диэлектрике пропорциональны частоте, $\operatorname{tg} \delta$ и квадрату напряженности электрического поля. Повышенное значение $\operatorname{tg} \delta$ приводит к повышенным потерям в диэлектрике. Отсюда следует, что $\operatorname{tg} \delta$ является важной характеристикой диэлектрика и на практике его необходимо постоянно измерять для контроля состояния изоляции. Если $\operatorname{tg} \delta$ становится выше нормы, то дальнейшая эксплуатация изоляции недопустима.

Пример 4.1. К диэлектрику прямоугольной формы размерами a , b и высотой h приложено переменное напряжение с действующим значением $U = 1000$ В и частотой $f = 100$ Гц. Напряжение подводится

к противоположным граням ab , покрытым слоями металла. Известны размеры диэлектрика: $a = 200$ мм, $b = 100$ мм, $h = 2$ мм, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 2,4$, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ при 20 °С. Коэффициент, характеризующий температурную зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\alpha = 18 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Требуется определить мощность потерь и удельные диэлектрические потери при температурах 20 °С и 100 °С.

Решение. Определим емкость плоского конденсатора, образованного металлическими гранями, между которыми находится диэлектрик, полагая, что ϵ_r не зависит от температуры:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{h} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r ab}{h} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,4 \cdot 0,2 \cdot 0,1}{2 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} = 212 \cdot 10^{-12} = 212 \text{ пФ}. \end{aligned}$$

Мощность диэлектрических потерь при температуре 20 °С будет равна:

$$\begin{aligned} P_{a20} &= U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_0 = U^2 2\pi f C \operatorname{tg} \delta_0 = 1000^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 2,12 \cdot \\ &\cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 26,7 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} = 26,7 \text{ мкВт}. \end{aligned}$$

Удельные диэлектрические потери при температуре 20 °С:

$$\Delta P_{20} = \frac{P_{a20}}{V} = \frac{P_{a20}}{abh} = \frac{26,7 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,002} = 0,667 \text{ Вт/м}^3.$$

Тангенс дельта изменяется с температурой по экспоненциальному закону: $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(T-T_0)}$. Тогда мощность диэлектрических потерь при температуре 100 °С будет равна:

$$\begin{aligned} P_{a100} &= U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(T-T_0)} = U^2 2\pi f C \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(T-T_0)} = \\ &= 1000^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 2,12 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(18 \cdot 10^{-3} \cdot 80) = \\ &= 112,7 \text{ мкВт}. \end{aligned}$$

Удельные диэлектрические потери при температуре 100 °С:

$$\Delta P_{100} = \frac{P_{a100}}{V} = \frac{P_{a100}}{abh} = \frac{112,7 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,002} = 2,815 \text{ Вт/м}^3.$$

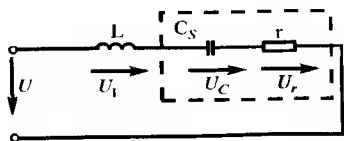


Рис. 4.2. Резонансный контур, включающий конденсатор с потерями

В высокочастотной технике вместо параметра $\text{tg}\delta$ пользуются понятием добротности диэлектрика, которую обозначают Q . Поясним сказанное. Пусть конденсатор с диэлектриком является частью резонансного контура (рис. 4.2). Конденсатор с диэлектриком представим последовательной схемой замещения. Условием резонанса в данном контуре является равенство реактивных сопротивлений катушки индуктивности и конденсатора: $X_L = X_C$. В момент резонанса полное сопротивление равно активному сопротивлению r и входное напряжение равно напряжению на сопротивлении r . Отношение напряжения на конденсаторе к входному напряжению в момент резонанса называется добротностью контура Q :

$$Q = \frac{U_C}{U} = \frac{U_C}{U_r} = \frac{I \frac{1}{\omega C_S}}{I r} = \frac{1}{\omega C_S r} = \frac{1}{\text{tg}\delta}. \quad (4.18)$$

Следовательно, добротность Q является величиной, обратной $\text{tg}\delta$.

Например, если $\text{tg}\delta = 0,02$, то добротность $Q = \frac{1}{\text{tg}\delta} = \frac{1}{0,02} = 50$. И наоборот, если $Q = 100$, то $\text{tg}\delta = \frac{1}{Q} = \frac{1}{100} = 0,01 = 1\%$. На этом принципе основан метод измерения $\text{tg}\delta$ на высоких частотах с помощью приборов, называемых куметрами.

4.2. Виды диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

1. Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией.
2. Диэлектрические потери, обусловленные сквозной проводимостью.

3. Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

4. Ионизационные диэлектрические потери.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особенно отчетливо наблюдаются в диэлектриках дипольной структуры, обладающих релаксационной поляризацией. В температурной зависимости мощности потерь и $\text{tg}\delta$ релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества (рис. 4.3, а). При этой температуре время релаксации, или, другими словами, время ориентации диполей диэлектрика, совпадает с периодом изменения приложенного переменного электрического поля. Полярные молекулы в течение одного полупериода питающего напряжения поворачиваются на максимальный угол, а в течение другого полупериода, когда направление электрического поля противоположное, ориентируются также в противоположном направлении. Таким образом, полярная молекула, непрерывно следуя за изменением электрического поля, поворачивается на максимальный угол, диэлектрические потери P и $\text{tg}\delta$ достигают максимума. При меньшей температуре вязкость диэлектрика увеличивается, и время релаксации диполей становится значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения. Движение частиц будет менее интенсивным, и потери уменьшатся. При высокой температуре время релаксации частиц будет значительно меньше полупериода изменения приложенного переменного напряжения. В результате чего потери также снизятся. Дальнейшее возрастание $\text{tg}\delta$ с повышением температуры объясняется ростом электропроводности.

Характер зависимости рассеиваемой мощности и $\text{tg}\delta$ от частоты при дипольно-релаксационной поляризации представлен на

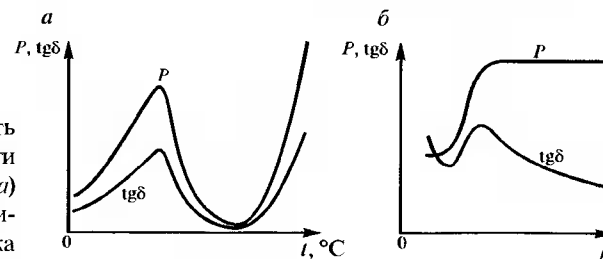


Рис. 4.3. Зависимость рассеиваемой мощности и $\text{tg}\delta$ от температуры (а) и частоты (б) для дипольного диэлектрика

рис. 4.3, б. Потери возрастают с частотой до тех пор, пока поляризация успевает следовать за изменением поля. Когда же частота становится настолько велика, что дипольные молекулы уже не успевают полностью ориентироваться в направлении поля, то потери становятся постоянными и $\operatorname{tg}\delta$ в соответствии с формулой (4.15) уменьшается по гиперболической зависимости. При малых частотах $\operatorname{tg}\delta$ возрастает в соответствии с формулой:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_C} = \frac{P_a}{U^2 \omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R}.$$

При частоте, стремящейся к нулю, $\operatorname{tg}\delta$ стремится к бесконечности. Физический смысл этого следующий: емкостная составляющая тока стремится к нулю, а активная составляющая, обусловленная потерями от электропроводности, не равна нулю. Деление конечной величины на бесконечно малую величину дает величину бесконечно большую.

К диэлектрическим потерям, обусловленным поляризацией, относятся также резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках с особой четкостью при строго определенной частоте. Это явление наблюдается в диапазоне световых частот и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией и наблюдаемые в сегнетоэлектриках, связаны с явлением спонтанной поляризации.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную объемную или поверхностную электропроводность. Если учитывать только объемную электропроводность, то $\operatorname{tg}\delta$ может быть в этом случае вычислен для параллельной схемы замещения по формуле:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_C} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \rho \frac{d}{S}} = \frac{1}{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \epsilon_r f \rho} = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon_r f \rho}, \quad (4.19)$$

где f — частота в Гц, ρ — удельное объемное сопротивление в Ом·м.

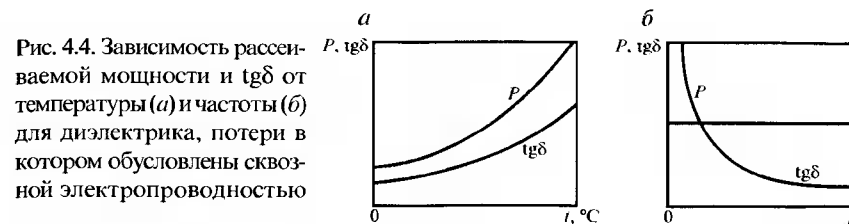


Рис. 4.4. Зависимость рассеиваемой мощности и $\operatorname{tg}\delta$ от температуры (а) и частоты (б) для диэлектрика, потери в котором обусловлены сквозной электропроводностью

Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью диэлектрика, возрастают с температурой (рис. 4.4, а) по экспоненциальному закону:

$$P_t = P_0 \exp(\alpha t), \quad (4.20)$$

где P_t — потери при температуре t °С, P_0 — потери при температуре 0 °С, α — постоянная материала. Изменяется $\operatorname{tg}\delta$ в зависимости от температуры по тому же закону, что и потери в диэлектрике.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, не зависят от частоты поля, поэтому $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается с частотой (рис. 4.4, б) по гиперболическому закону в соответствии с выражением (4.19).

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках из пропитанной бумаги и ткани, а также в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в производных слюды — микаленте, микалексе и т. п. Ввиду разнообразия структуры неоднородных диэлектриков и особенностей содержащихся в них компонентов общей формулы расчета диэлектрических потерь в этом случае не существует.

В электроизоляционной технике применяется большое количество композиционных материалов, обладающих неоднородной структурой. В одних случаях это определяется требованиями механической прочности (волокнистость), в других — удешевлением стоимости и приданием необходимых свойств (наполнители в пластмассах и резинах), в третьих — использованием ценных отходов (сланцевые материалы). Потери и $\operatorname{tg}\delta$ в таких материалах имеют сложные зависимости.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии или твердым диэлектрикам, имеющим газовые включения. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих

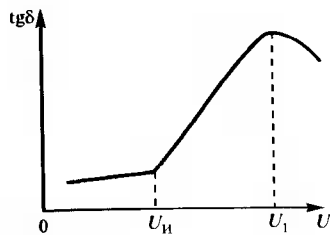


Рис. 4.5. Зависимость $\text{tg}\delta$ от напряжения для изоляции с воздушными включениями

значение, соответствующее началу ионизации данного газа (рис. 4.5). Ионизационные потери могут быть вычислены по формуле:

$$P_{\text{и}} = Af(U - U_{\text{и}})^3. \quad (4.21)$$

где A — постоянный коэффициент, f — частота приложенного напряжения, $U_{\text{и}}$ — напряжение, соответствующее началу ионизации. Формула справедлива при $U > U_{\text{и}}$ и линейной зависимости $\text{tg}\delta$ от E . Ионизационное напряжение $U_{\text{и}}$ зависит от давления, при котором находится газ. С увеличением давления газа величина напряжения начала ионизации возрастет, так как увеличивается плотность газа, и уменьшится длина свободного пробега носителей зарядов, вызывающих ударную ионизацию молекул газа.

4.3. Диэлектрические потери в газообразных, жидких и твердых диэлектриках

Диэлектрические потери в газах при напряженностях поля E , лежащих ниже значения, необходимого для развития ударной ионизации молекул газа, очень малы. Источником диэлектрических потерь газа в этом случае может быть в основном только электропроводность, так как ориентация дипольных молекул газа при их поляризации не сопровождается диэлектрическими потерями. Как известно, все газы отличаются весьма малой электропроводностью, и в связи с этим угол диэлектрических потерь будет ничтожно мал, особенно при высоких частотах. Величина $\text{tg}\delta$ может быть вычислена по формуле (4.19).

Удельное объемное сопротивление газов составляет примерно 10^{16} Ом·м, $\epsilon \approx 1$. Следовательно, $\text{tg}\delta$ при частоте $f = 50$ Гц при отсутствии ионизации составит менее чем $4 \cdot 10^{-8}$. При напряжениях, когда в неоднородном электрическом поле напряженность поля в отдельных местах превзойдет некоторое критическое значение,

молекулы газа ионизируются, вследствие чего в газе возникают потери на ионизацию и $\text{tg}\delta$ начинает резко возрастать.

По резкому возрастанию $\text{tg}\delta$ с напряжением можно судить о наличии газовых включений или каверн в твердой изоляции. На рис. 4.5 показана зависимость $\text{tg}\delta$ от величины приложенного напряжения. При напряжении $U_{\text{и}}$ начинается ионизация газа в порах твердого вещества или в газовых включениях между слоями многослойной изоляции. Как видно из рис. 4.5, при $U > U_{\text{и}}$ $\text{tg}\delta$ заметно возрастает. Напряжение $U_{\text{и}}$ называется *напряжением ионизации*. При напряжениях свыше U_1 , когда газ во включениях уже ионизирован и энергия на процесс ионизации больше не затрачивается, $\text{tg}\delta$ уменьшается. Зависимость $\text{tg}\delta = f(U)$ называют *кривой ионизации*. При высоких частотах ионизация и потери в газах возрастают.

Ионизация газа, заполняющего закрытые поры в твердой изоляции, нередко приводит к разрушению изоляции. Воздушные включения или каверны могут образоваться, например, в недостаточно пропитанной волокнистой изоляции или при неплотном прилегании электродов к диэлектрику. Газовые полости могут образоваться также при эксплуатации в результате растрескивания изоляции под действием механических сил, вибрации и резких перепадов температуры. Возникновение ионизации в газовых включениях объясняется малой диэлектрической проницаемостью воздуха ($\epsilon_r = 1$) и малой электрической прочностью воздуха по сравнению с прочностью твердой изоляции. Процесс ионизации газовых включений называют *незавершенным, неполным или частичным разрядом* (сокращенно ЧР). Название ЧР происходит от того, что разряды локализуются в ограниченной части объема изоляции, не достигая одновременно обоих электродов. Ионизация воздуха сопровождается образованием озона и окислов азота, что вызывает постепенное химическое разложение органической изоляции, содержащей газовые включения. Процесс со временем заканчивается полным пробоем изоляции.

На линиях электропередач высокого напряжения потери на ионизацию воздуха у поверхности проводов (явление короны) снижает КПД линии.

Диэлектрические потери в неполярных жидкостях обусловлены только электропроводностью, если жидкость не содержит

примесей с дипольными молекулами. Удельная проводимость нейтральных чистых жидкостей чрезвычайно мала, благодаря чему малы и диэлектрические потери. Примером может служить тщательно очищенное трансформаторное масло, $\text{tg}\delta$ которого при частоте 50 Гц составляет около 0,001.

Диэлектрические потери в полярных жидкостях связаны с дипольно-релаксационной поляризацией. Дипольные молекулы, следуя за изменением электрического поля, поворачиваются в вязкой среде и вызывают потери электрической энергии. Эти потери значительно превосходят потери, обусловленные электропроводностью. Например, полярная жидкость совол имеет при частоте 50 Гц значение $\text{tg}\delta = 0,02$.

Потери в полярных жидкостях сильно зависят от температуры, так как с температурой изменяется вязкость жидкости, а время релаксации диполей прямо пропорционально вязкости. При увеличении температуры вязкость диэлектрика уменьшается по экспоненциальному закону. Если вязкость жидкости достаточно велика, молекулы не успевают следовать за изменением поля и дипольная поляризация практически исчезает. Диэлектрические потери при этом будут малы. Если вязкость жидкости мала и ориентация молекул происходит без трения, то дипольные потери также будут малы. При средней вязкости дипольные потери могут быть существенными и при некотором значении вязкости имеют максимум.

Применяемые в технике жидкие диэлектрики часто являются полярными или представляют собой смеси неполярных и полярных веществ (например, масляно-канифольные компаунды). На рис. 4.6 представлена зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры для масляно-канифольного компаунда при двух значениях частоты ω . В другом масштабе эти же кривые представляют зависимость от температуры диэлектрических потерь P_a .

При повышении частоты максимум $\text{tg}\delta$ смещается в область более высокой температуры. Это объясняется тем, что большая частота требует меньшего времени релаксации, необходимого для получения максимума угла потерь, а для этого должна быть меньше вязкость, т. е. выше температура. Минимум значения $\text{tg}\delta$ на рис. 4.6 соответствуют температурам, при которых вязкость жидкости становится настолько малой, что ориентация диполей происходит прак-

тически без трения. Потери в этом случае очень малы. Дальнейшее увеличение $\text{tg}\delta$ с повышением температуры объясняется ростом электропроводности. Именно она определяет механизм диэлектрических потерь при повышенных температурах.

Зависимости рассеиваемой мощности P_a и $\text{tg}\delta$ от частоты при дипольно-релаксационной поляризации приведены на рис. 4.3, б.

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках зависят от структуры диэлектриков. В твердых диэлектриках возможны все виды диэлектрических потерь.

В случае неполярных молекул в веществах, не имеющих примесей, диэлектрические потери ничтожно малы. К таким диэлектрикам относятся неполярные полимеры — полиэтилен, политетрафторэтилен (фторопласт-4), полистирол и др. Они находят применение в качестве высокочастотных диэлектриков.

Диэлектрики с полярными молекулами представляют собой главным образом органические вещества. К ним относятся материалы на основе целлюлозы (бумага, картон); полярные полимеры: полиметилметакрилат (органическое стекло), полихлорвинил, полиамиды (капрон), полиуретаны, каучуковые материалы (эбонит), фенолоформальдегидные смолы (бакелит) и др. Потери в этих диэлектриках существенно зависят от температуры (см. рис. 4.3, а). При некоторых температурах, как у полярных жидкостей, обнаруживаются максимум и минимум потерь. Возрастание потерь после минимума объясняется увеличением потерь от сквозной электропроводности.

Диэлектрические потери твердых веществ ионной структуры связаны с особенностью упаковки ионов в кристаллической решетке. В веществах кристаллической структуры с плотной упаковкой ионов при отсутствии примесей, искажающих решетку,

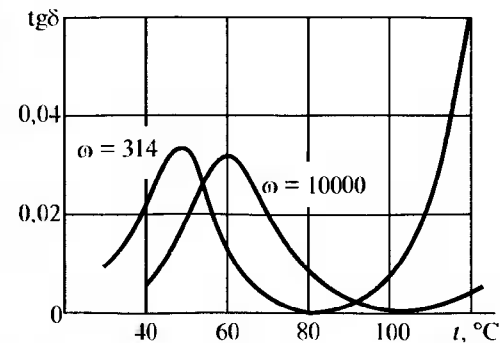


Рис. 4.6. Зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры при разных частотах для масляно-канифольного компаунда

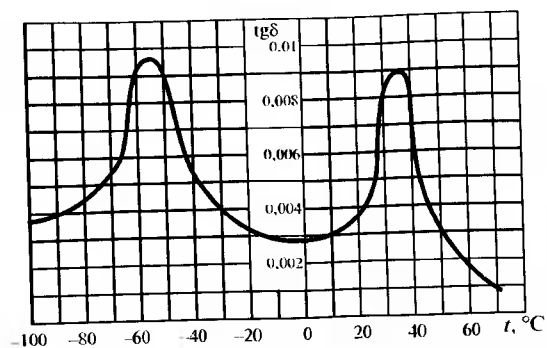


Рис. 4.7. Зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры для пропитанной компаундом конденсаторной бумаги

диэлектрические потери весьма малы. В веществах с неплотной упаковкой ионов наблюдается релаксационная поляризация, вызывающая повышенные диэлектрические потери.

Диэлектрические потери в аморфных веществах ионной структуры — неорганических стеклах — связаны с явлением поляризации и наличием электропроводности. Последняя проявляется обычно при температурах 50—100 °С.

Диэлектрические потери в сегнетоэлектриках выше, чем у обычных диэлектриков.

Диэлектрические потери в твердых веществах неоднородной структуры. К таким диэлектрикам принадлежат материалы, в состав которых входит не менее двух компонентов с разными электрическими свойствами. К числу неоднородных материалов следует отнести керамику, представляющую собой сложную многофазную систему, а также слюду, обладающую слоистой структурой. К диэлектрикам неоднородной структуры относится также и пропитанная бумага, которая кроме волокон целлюлозы содержит также пропитывающее вещество и оставшиеся незаполненными при пропитке воздушные включения.

В качестве примера на рис. 4.7 приведена зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры для конденсаторной бумаги, пропитанной компаундом (80 % канифоли и 20 % трансформаторного масла). Такая пропитанная бумага относится к диэлектрикам с неоднородной структурой, и диэлектрические потери определяются электрическими свойствами обоих компонентов. Как видно из рис. 4.7, зависимость $\text{tg}\delta$ от темпе-

ратуры имеет два максимума: первый (при низких температурах) характеризует дипольно-релаксационные потери самой бумаги (целлюлозы), второй (при более высокой температуре) обусловлен дипольно-релаксационными потерями пропитывающего компаунда.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое диэлектрические потери? Когда они больше — на постоянном или переменном напряжении?
2. Какая связь между добротностью резонансного контура и тангенсом угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$)?
3. Какие виды потерь существуют в электроизоляционных материалах?
4. Как зависит $\text{tg}\delta$ от частоты, когда потери в диэлектрике обусловлены поляризацией?
5. Как зависит $\text{tg}\delta$ от частоты, когда потери в диэлектрике обусловлены сквозной электропроводностью?
6. Как зависит $\text{tg}\delta$ от температуры, когда потери в диэлектрике обусловлены сквозной электропроводностью и поляризацией?
7. Как связаны с потерями и $\text{tg}\delta$ параметры схемы замещения диэлектрика?
8. Что такое ионизационная кривая? О чем можно судить по виду этой кривой?

5. ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

5.1. Общая характеристика явления пробоя

Диэлектрик, находясь между двумя разнополярными электродами (см. рис. 2.1), сохраняет свои изолирующие свойства лишь до тех пор, пока приложенное к нему напряжение не превысит некоторого критического значения. Если же напряжение превысит некоторое критическое значение, то диэлектрик теряет свойства изоляционного материала. Через диэлектрик будет протекать большой сквозной ток. Сопротивление диэлектрика уменьшится настолько, что произойдет короткое замыкание электродов. Это явление носит название *пробоя диэлектрика* или нарушения его электрической прочности. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется *пробивным напряжением*, а соответствующее значение напряженности электрического поля — *электрической прочностью диэлектрика*.

Пробивное напряжение обозначается $U_{пр}$ и на практике чаще всего измеряется в киловольтах. В однородном поле электрическая прочность определяется пробивным напряжением, отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (5.1)$$

где h — толщина диэлектрика.

Для практических целей значения электрической прочности диэлектриков принято выражать в кВ/мм. Механизм пробоя диэлектриков разный в зависимости от состояния вещества: газообразного, жидкого или твердого. В зависимости от состояния диэлектрика пробой может носить обратимый или необратимый характер. В некоторых случаях свойства диэлектрика после пробоя могут восстановиться (газообразные и жидкие диэлектрики). Такую изоляцию называют самовосстанавливающейся. В других случаях диэлектрик разрушается и требуется, как правило, дорогостоящая его замена (твердые диэлектрики). Такую изоляцию называют несамовосстанавливающейся. В пробитом твердом диэлектрике можно обнаружить прожженное отверстие — след пробоя. Если к такому образцу

твердой изоляции повторно приложить напряжение, то пробой произойдет при значительно меньшем напряжении по сравнению с напряжением первого пробоя. Точно так же, как различают токи утечки через объем диэлектрика и по его поверхности, пробой диэлектрика может произойти или через его толщину, или по его поверхности (см. рис. 2.1). В последнем случае его называют *поверхностным пробоем* или *перекрытием по поверхности*. В этом случае пробиваются воздух или жидкость, окружающие твердый диэлектрик. Напряжение поверхностного перекрытия зависит от свойств твердого диэлектрика и окружающей среды. Чтобы избежать таких пробоев, в изоляционных конструкциях их поверхность делается ребристой, что удлиняет путь поверхностного разряда, а следовательно, повышает и напряжение разряда. Ребра образуют также участки на поверхности, защищенные от смачивания во время дождя.

В соответствии с этими двумя видами пробоя изоляцию электрических установок принято делить на *внутреннюю* и *внешнюю*. *Внешней изоляцией* называются части изоляционной конструкции, в которых изолирующей средой является атмосферный воздух и поверхностные части изоляционных конструкций, которые соприкасаются с воздухом. Электрическая прочность внешней изоляции зависит от атмосферных условий и состояния поверхности изолятора. *Внутренней изоляцией* называют части изоляционной конструкции, в которых изолирующей средой являются жидкие, твердые или газообразные диэлектрики или их комбинации, не имеющие прямых контактов с атмосферным воздухом.

Отметим еще одну особенность пробоя разных диэлектриков. Пробой газов обуславливается ударной ионизацией. Это явление чисто электрическое, поэтому все численные данные по пробоям газов относятся к максимальным (амплитудным) значениям напряжения.

Пробой жидких диэлектриков происходит в результате ионизационных и тепловых процессов. Пробой твердых диэлектриков может вызываться как электрическим, так и тепловым процессами, возникающими под действием поля. Явление электрического пробоя связано с электронными процессами в диэлектрике, возникающими в сильных электрических полях и приводящими к внезапному резкому возрастанию тока. Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в

электрическом поле, что приводит к росту активного тока и дальнейшему увеличению температуры диэлектрика вплоть до его термического разрушения. Другими словами, в основе теплового пробоя лежит нарушение равновесия между теплотой, выделяющейся в диэлектрике, и теплотой, которая отводится в окружающую среду.

При длительном действии напряжения пробой может быть вызван электрохимическими процессами, происходящими в диэлектрике под воздействием электрического поля. Эти процессы вызывают электрическое старение изоляции.

Поскольку в разрушении жидких и твердых диэлектриков существенную роль играют тепловые процессы, в случае приложения к диэлектрикам переменного напряжения численные значения пробивного напряжения относятся к действующим значениям. Рассмотрим подробнее пробой в газообразных, жидких и твердых диэлектриках.

5.2. Пробой газов

Во многих видах электроустановок изолирующей средой у поверхности изоляторов и между открытыми токоведущими частями служит воздух. Воздух и другие газообразные диэлектрики используют в изоляции конденсаторов, кабелей и распределительных устройств электростанций. Конструкции этих электротехнических изделий проектируются с учетом электрической прочности газов, в атмосфере которых они работают.

Воздух обладает высокими изоляционными свойствами, но его электрическая прочность в нормальных условиях ($t_0 = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 760$ мм рт. ст.) невелика по сравнению с прочностью большинства жидких и твердых диэлектриков и составляет $E_{\text{пр}} = 3 \dots 4$ кВ/мм.

В любом газе, в том числе и в воздухе, под воздействием внешних ионизаторов, которыми являются рентгеновское, космическое, тепловое излучения, возникает небольшое количество свободных зарядов — положительных и отрицательных ионов, а также электронов. Эти свободные заряды, также как и нейтральные молекулы газа, находятся в беспорядочном тепловом движении. Если к газовому промежутку приложить электрическое поле, то заряды начинают перемещаться в направлении поля или в проти-

воположном направлении в зависимости от знака заряда. При этом заряженная частица газа приобретает дополнительную энергию:

$$W = qU_\lambda, \quad (5.2)$$

где q — заряд, U_λ — падение напряжения на длине свободного пробега λ .

Если поле достаточно однородно, то можно положить $U_\lambda = E\lambda$, где E — напряженность поля. Следовательно,

$$W = Eq\lambda. \quad (5.3)$$

Когда заряженная частица при своем движении сталкивается с нейтральной молекулой, то добавочная энергия заряженных частиц сообщается молекулам, с которыми они сталкиваются. Если эта энергия достаточно велика, происходит возбуждение атомов и молекул, связанное с переходом электронов на более удаленную от ядра орбиту или даже ионизация молекул, т. е. расщепление их на электроны и положительные ионы. Условием, определяющим возможность ионизации, является

$$W \geq W_{\text{и}} \text{ или } Eq\lambda \geq W_{\text{и}}, \quad (5.4)$$

где $W_{\text{и}}$ — энергия ионизации. Энергия W включает в себя и энергию теплового движения, обычно небольшую при нормальной температуре.

Энергию ионизации обычно выражают через *ионизационный потенциал* $U_{\text{и}}$:

$$W_{\text{и}} = qU_{\text{и}}. \quad (5.5)$$

Следовательно, условие ионизации можно записать так:

$$Eq\lambda \geq qU_{\text{и}} \text{ или } E\lambda \geq U_{\text{и}}. \quad (5.6)$$

Ионизационный потенциал различных газов лежит в пределах от 4 до 25 В, что соответствует энергии ионизации от 4 до 25 эВ. Поскольку значения q и λ при заданных значениях давления газа и его температуры есть величины постоянные, ионизация начинается при определенной напряженности поля. Эта напряженность поля E называется *начальной напряженностью*. Ее можно определить как

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{и}}}{\lambda}. \quad (5.7)$$

Скорость электрона (км/с), проходящего без столкновений, и разность потенциалов U (вольт) связаны выражением $v \approx 600\sqrt{U}$.

Подставляя в эту формулу ионизационные потенциалы, видим, что электрон ионизирует газовые молекулы, когда скорость его движения свыше 1000 км/с.

Движущиеся в электрическом поле положительные ионы при соударении с нейтральными частицами газа не вызывают их ионизации. В процессе ионизации принимают участие только электроны. Это объясняется тем, что электроны имеют большую подвижность, чем ионы. Соответственно и длина свободного пробега у электронов больше, чем у ионов.

В ряде случаев электрон, разогнанный полем, может не ионизировать молекулу, а лишь привести ее в возбужденное состояние. В следующий момент эта возбужденная молекула отдает свою избыточную энергию в форме излучения — испускает фотон. Этот фотон, двигаясь в направлении поля, поглощается какой-либо другой молекулой, которая при этом может ионизироваться. Такая внутренняя *фотонная ионизация* газа, благодаря большой скорости распространения излучения, приводит к особенно быстрому развитию электропроводящего канала — *стримера*. По этому каналу и происходит разряд.

На рис. 5.1 представлена схема развития разряда в газовом промежутке. Из него становится понятным, почему рост стримера (проводящего канала) происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. Здесь лавины показаны в виде заштрихованных конусов, а линиями изображены пути фотонов.

Внутри каждого конуса газ ионизируется ударами электронов. Вновь отщепленные электроны, разгоняемые полем, в свою очередь, также ионизируют встречаемые ими частицы газа. Таким образом, лавинообразно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число положительных ионов, движущихся к катоду.

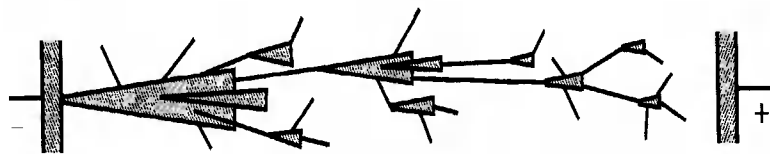


Рис. 5.1. Распространение стримера при пробое газа

Начало линий исходит из атомов, которые были возбуждены ударами электронов и вслед за этим испустили фотон. Двигаясь со скоростью 300 тыс. км/с, фотоны обгоняют лавину и в каком-то месте (в конце линии) впереди развивающейся лавины ионизируют частицу газа, что порождает новую лавину перед первой лавиной. Таким образом, фотон как бы намечает канал повышенной проводимости газа, т. е. стример. Затем отдельные лавины, нагоняя друг друга, сливаются, образуя сплошной канал ионизированного газа — газоразрядную плазму. По этому каналу и происходит пробой газового промежутка.

Одновременно с ростом стримера, направленного от катода к аноду, начинается образование встречного лавинного потока положительно заряженных частиц, направленных к катоду. Положительный стример представляет собой канал газоразрядной плазмы. Под влиянием ударов положительных ионов на катоде образуется катодное пятно, излучающее электроны. В результате указанных процессов и возникает пробой газа. Обычно пробой газа совершается практически мгновенно. Длительность подготовки пробоя газа при длине промежутка 1 см составляет 10^{-7} — 10^{-8} с. Благодаря большой скорости развития пробоя газов при повышении переменного напряжения, пробой происходит при условии достижения определенной величины не действующим, а амплитудным значением. При синусоидальном переменном напряжении измеренное действующее значение переменного тока следует умножить на коэффициент амплитуды, равный для синусоиды $\sqrt{2}$. Если форма напряжения несинусоидальная, то следует измерять непосредственно амплитуду напряжения. При небольших изменениях частоты от 50 до 60 Гц электрическая прочность воздуха не меняется. При переходе к более высоким частотам $E_{пр}$ падает с ростом частоты сначала быстро, а потом медленно, достигая минимума при частоте 1 МГц. Падение электрической прочности связано с образованием объемных зарядов. При дальнейшем увеличении частоты $E_{пр}$ снова начинает расти, так как при очень малом времени полупериода пробой затрудняется.

Чем больше напряжение, приложенное к газовому промежутку, тем быстрее может развиваться пробой. Зависимость времени пробоя от величины приложенного напряжения, показанная на рис. 5.2, называется вольтсекундной характеристикой.

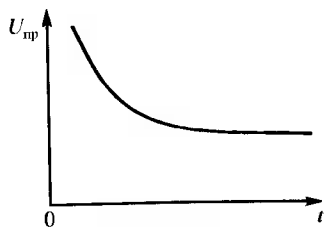


Рис. 5.2. Вольтсекундная характеристика воздушного промежутка

Итак, хотя электрический пробой происходит за очень малое время, но оно все же конечно, и если длительность воздействия напряжения очень мала, то пробивное напряжение повышается. Это повышение обычно характеризуется коэффициентом импульса:

$$\beta = U_{пр} / U_{пр50}, \quad (5.8)$$

где $U_{пр}$ — пробивное напряжение при данном импульсе, $U_{пр50}$ — пробивное напряжение при постоянном или переменном напряжении частотой 50 Гц. Коэффициент импульса в резко неоднородных электрических полях может достигать до 1,5 и даже до 2.

Явление пробоя зависит от степени однородности электрического поля, в котором происходит пробой. Рассмотрим сначала пробой газа в однородном поле.

Однородное поле можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между сферами большого диаметра при малом расстоянии между ними. В таком поле пробой наступает практически мгновенно при достижении строго определенного напряжения, зависящего от температуры и давления газа. Как только напряжение достигнет значения $U_{пр}$, между электродами возникает искра, которая затем переходит в дугу, если источник напряжения имеет достаточную мощность. Дуговой разряд характеризуется большой плотностью тока и малым падением напряжения между электродами. При дуговом разряде имеет место термическая ионизация газа. Появление искры при известном расстоянии между электродами используется на практике для определения значения приложенного напряжения. Так, например, измеряют высокие напряжения с помощью шаровых разрядников.

Электрическая прочность воздуха зависит от расстояния между электродами h (рис. 5.3). При малых расстояниях между элект-

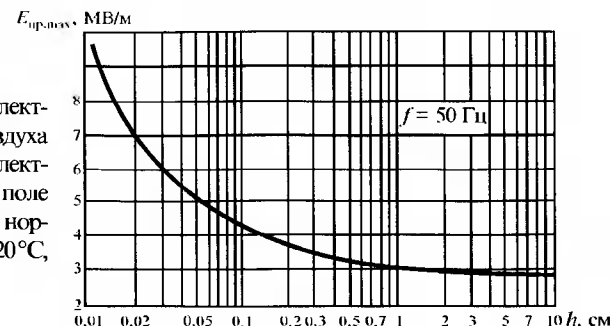


Рис. 5.3. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле при частоте $f = 50$ Гц и нормальных условиях: $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 760$ мм рт. ст.

родами наблюдается значительное увеличение электрической прочности, которое объясняется уменьшением длины свободного пробега в соответствии с формулой (5.7).

При постоянной температуре электрическая прочность газа в сильной степени зависит от его плотности, т. е. от давления. На рис. 5.4 приведена зависимость электрической прочности от давления. На рисунке показана точка, соответствующая нормальному давлению $p_0 = 760$ мм рт. ст. При больших давлениях повышается плотность газа, и расстояние между отдельными молекулами становится меньше. Тем самым уменьшается и длина свободного пробега электронов и, как это следует из формулы (5.7), увеличивается напряженность поля. При уменьшении давления плотность газа уменьшается, длина свободного пробега увеличивается и электрическая прочность падает. При очень малых давлениях, т. е. при больших разрежениях, близких к вакууму, электрическая прочность снова возрастает. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разрежении и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами. Большую электрическую прочность

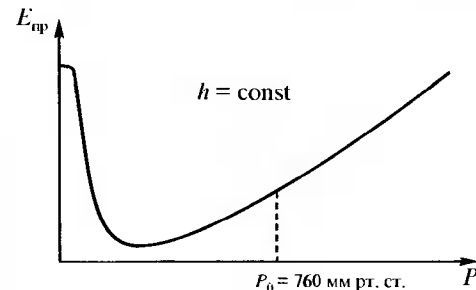


Рис. 5.4. Зависимость электрической прочности газа от давления

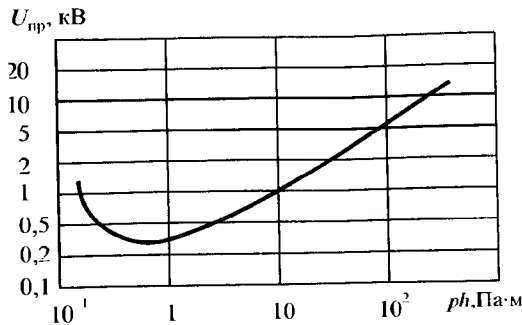


Рис. 5.5. Иллюстрация закона Пашена для воздуха

вакуума используют в технике при конструировании вакуумных выключателей и вакуумных конденсаторов для больших напряжений высокой частоты. Газы при больших давлениях также применяют в технике в качестве изоляции.

Рассмотрение одновременного влияния на пробой газов давления p и расстояния между электродами h привело к установлению зависимости пробивного напряжения газа не от величин p и h в отдельности, а от произведения этих величин ph . Это положение известно под названием закона Пашена, который гласит:

При неизменной температуре пробивное напряжение газа в однородном поле является функцией произведения давления на расстояние между электродами.

На рис. 5.5 дана иллюстрация закона Пашена для воздуха.

При небольших отклонениях температуры и газа от нормальных условий ($t_0 = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 760$ мм рт. ст.) пробивное напряжение пропорционально относительной плотности газа δ . При нормальных условиях относительная плотность $\delta = 1$, а при отклонении от нормальных она рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{(273 + t_0)p}{(273 + t)p_0} = \frac{(273 + 20)p}{(273 + t)760} = 0,386 \frac{p}{273 + t}. \quad (5.9)$$

Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ при данных температуре t и давлении p можно определить как

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} \delta, \quad (5.10)$$

где $U_{\text{пр}0}$ — пробивное напряжение при нормальных условиях.

Формулой (5.10) можно пользоваться, если δ лежит в пределах 0,95...1,05. В противном случае нужно по величине δ находить поправку по соответствующим таблицам.

Пример 5.1. Пробивное напряжение шаров диаметром 12,5 см при расстоянии между шарами 1 см и нормальных условиях равно 31,7 кВ. Как изменится пробивное напряжение при температуре 27°C и атмосферном давлении 739 мм рт. ст.?

Решение. Относительная плотность воздуха при указанных атмосферных условиях будет равна:

$$\delta = \frac{(273 + t_0)p}{(273 + t)p_0} = \frac{(273 + 20) \cdot 739}{(273 + 27) \cdot 760} = \frac{293 \cdot 739}{300 \cdot 760} = 0,95.$$

Если относительная плотность лежит в пределах 0,95...1,05, то пробивное напряжение найдем по формуле:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} \delta = 31,7 \cdot 0,95 = 30,105 \text{ кВ.}$$

5.3. Пробой газов в неоднородном поле

Пробой газа в неоднородном поле подчиняется другим закономерностям. Неоднородное поле возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, а также между проводами линий электропередач (ЛЭП). Пробой газа в неоднородном поле всегда предшествует *корона* — частичный (незавершенный) разряд, возникающий в местах, где напряженность поля достигает критических значений, достаточных для местного (неполного) или локального пробоя. При дальнейшем возрастании напряжения коронный разряд переходит в искровой, а затем в дуговой. Следует иметь в виду, что в зоне ионизации воздуха всегда возникает озон и окислы азота, которые при наличии влаги образуют азотистую и азотную кислоту. Эти продукты ионизации могут вызвать коррозию окружающих металлических деталей и разрушить расположенные вблизи диэлектрики. Поэтому корона на ЛЭП является нежелательным явлением. Кроме того, потери мощности на корону могут быть достаточно большими. Потери выражаются формулой:

$$P_K = Af(U - U_{\text{и}})^2. \quad (5.11)$$

где A — постоянный коэффициент, f — частота, U — рабочее напряжение, $U_{\text{и}}$ — напряжение начала ионизации.

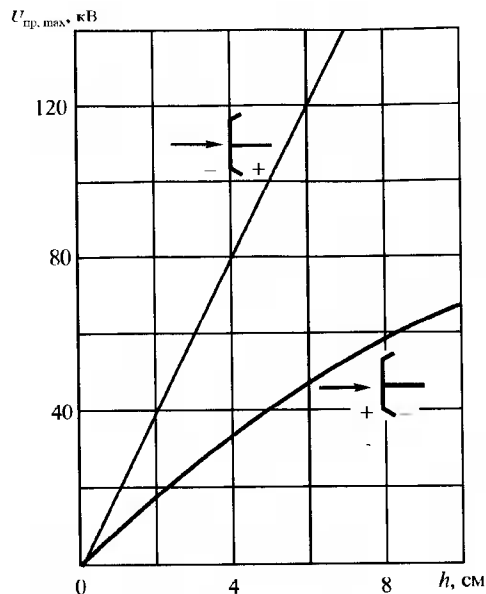


Рис. 5.6. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами в неоднородном поле

Электронные ионы так быстро уйти не успевают. Они образуют вблизи острия «облако» из положительно заряженных ионов — так называемый *объемный положительный заряд* (рис. 5.7).

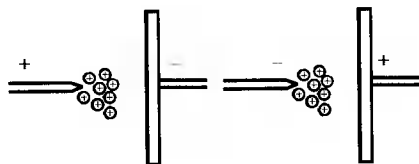


Рис. 5.7. Образование положительного объемного заряда на острие при разной полярности электродов

Величина пробивного напряжения между электродами *острие—плоскость* зависит от полярности электродов (рис. 5.6). Влияние полярности можно объяснить следующим образом.

Ионизация газа и возникновение короны при любой полярности электродов начинается вблизи острия, где существует наибольшее значение напряженности электрического поля. Ионизированное пространство вблизи иглы содержит отрицательные электроны и положительные ионы. Электроны, как более подвижные частицы, быстро уходят из этой области, а малоподвижные положи-

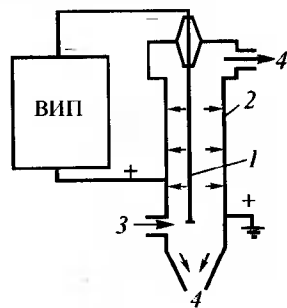


Рис. 5.8. Схема электрофильтра

При положительной полярности этот заряд служит продолжением острия. Это сокращает протяженность разрядного промежутка и облегчает его пробой. Пробой наступает при меньшем напряжении, чем в случае отрицательной полярности на острие, когда объемный положительный заряд экранирует острие от плоскости, заряженной положительно. При отрицательной полярности на острие пробой происходит при большем напряжении.

Повышенное значение электрической прочности при отрицательной полярности на острие используют в технике. Например, в электрофильтрах, улавливающих твердые или жидкие частицы, используется неоднородное поле и коронный разряд. На рис. 5.8 представлена схема электрофильтра, состоящего из центрального коронирующего электрода (1) и осадительного электрода (2). К коронирующему и осадительному электроду подсоединяются выводы высоковольтного источника питания ВИП. Величина напряженности электрического поля вдоль текущего радиуса x изменяется по закону:

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (5.12)$$

где r_1, r_2 — радиусы внутреннего и внешнего электродов.

Максимальное значение напряженности имеет у коронирующего электрода, где и возникает коронный разряд. Электрические заряды, двигаясь под действием электрического поля к осадительному электроду, встречают на своем пути частицы загрязненного газа (3), подлежащие улавливанию, и соединяются с ними. Частицы, получившие заряд, начинают двигаться к осадительному электроду и осаждаются на нем. На выходе (4) получают очищенный газ.

Степень очистки, или КПД электрофильтра, зависит от квадрата приложенного напряжения. Чтобы добиться лучшей очистки, надо подать большее напряжение. Это возможно в том случае, когда коронирующий электрод имеет отрицательную полярность.

Разряд в воздухе у поверхности твердого диэлектрика, называемый в технике *поверхностным разрядом (перекрытием)*, возникает обычно при более низких напряжениях, чем в том случае, когда между электродами находится только воздух. На разряд-

ное напряжение влияют форма и частота электрического поля, состояние поверхности диэлектрика и давление воздуха. Разрядное напряжение снижается с увеличением влажности воздуха.

5.4 Пробой жидких диэлектриков

Пробой жидких диэлектриков происходит при более высоких напряжениях, т. е. жидкие диэлектрики имеют более высокую электрическую прочность, которая объясняется значительно меньшей длиной свободного пробега электронов.

Природа пробоя жидких диэлектриков во многом зависит от их чистоты. Электрическая форма пробоя наблюдается в предельно чистых жидких диэлектриках. Электрический пробой жидких диэлектриков развивается за время 10^{-8} — 10^{-5} с. Другие виды пробоя жидкости завершаются за более длительное время.

Процесс электрического пробоя начинается с инъекции в жидкий диэлектрик электронов с катода и образования электронных лавин. В ходе распространения лавин возникают стримероподобные образования, которые в результате процессов фотоионизации перемещаются от катода к аноду со скоростью 10^5 м/с. Пробой завершается, когда плазменный канал замыкает электроды.

Чистые жидкие диэлектрики получить очень трудно. Постоянными примесями в них являются газы, вода и твердые частицы. Наличие примесей и определяет в основном явление пробоя жидких диэлектриков и вызывает большие затруднения при создании точной теории пробоя этих жидкостей.

В жидкостях, содержащих газы, пробой начинается с ионизации газовых включений. В результате ионизации температура стенок газовых включений возрастает. Это приводит к вскипанию микрообъемов жидкости, примыкающих к включению. Объем газа увеличивается, включения сливаются, образуя между электродами «мостик», по которому происходит разряд в газе. Газовые пузырьки в трансформаторном масле могут образовываться при быстром повышении температуры и под воздействием продолжительного нагрева, вызванного перегрузкой трансформатора по току. Поэтому при эксплуатации трансформаторов следует избегать воздей-

ствия опасных тепловых перегрузок. Опыты, проводившиеся в США, показали, что газ из изоляции может выделяться уже при температуре выше 100 °С. Исследования показали, что выделение пузырьков в масло снижает электрическую прочность на 20—50 %.

Механизм пробоя увлажненных жидкостей зависит от содержания в них воды и от ее состояния. Вода, содержащаяся в жидких диэлектриках, может быть в эмульсионном состоянии, когда образуются сферические капли воды с диаметром 10^{-6} м. В электрическом поле сферические капли воды вытягиваются вдоль линий электрического поля. При этом они образуют эллипсоиды вращения, которые, сливаясь и притягиваясь друг к другу, замыкают электроды «мостиками» с малым электрическим сопротивлением, по которым и происходит разряд. Этим процессом объясняется значительное уменьшение электрической прочности трансформаторного масла даже при его незначительном увлажнении.

На рис. 5.9 приведена зависимость электрической прочности трансформаторного масла от содержания в ней воды. Испытания проводились в стандартном разряднике при расстоянии между электродами $h = 2,5$ мм.

Вода может попасть в трансформаторное масло при его транспортировке и хранении, а также в процессе эксплуатации. При сушке увлажненного масла его электрическая прочность восстанавливается. Для сушки масла применяются фильтр-прессы, центрифуги и адсорбенты.

Для уменьшения попадания влаги из воздуха в трансформаторное масло воздух над уровнем масла в трансформаторах и в баках для его хранения сообщается с наружным воздухом через воздухоочистительные фильтры. Эти фильтры заполняются сили-

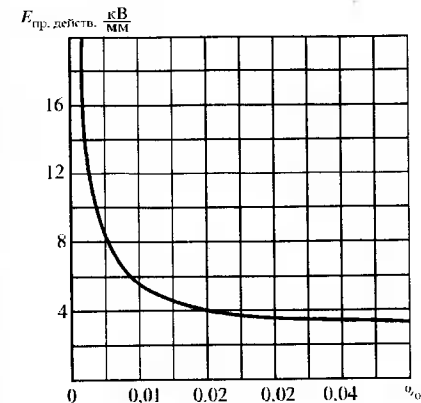


Рис. 5.9. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от содержания воды в масле

кагелем или другими веществами, поглощающими из воздуха влагу и химически активные загрязнения. Часто промежуток над маслом в герметичном баке трансформатора вместо воздуха заполняют азотом, чтобы исключить доступ влаги к маслу. Применяемые в настоящее время меры по защите масла от увлажнения (азотная защита, непрерывное осушение масла, очистка, регенерация и газохроматографический анализ) оказываются вполне достаточными для решения этой проблемы.

В жидкостях, загрязненных твердыми частицами (сажа, волокно и другие продукты разрушения твердой изоляции, эксплуатирующейся в масле), эти частицы поляризуются в электрическом поле, располагаясь вдоль его линий. При этом они образуют в межэлектродном пространстве «мостики» с пониженным электрическим сопротивлением, по которым и происходит разряд. Процесс подготовки разряда протекает в этом случае в течение длительного времени (до 10^3 с и более). Большое влияние на электрическую прочность масла оказывает размер частиц. В табл. 5.1 приведена классификация уровня загрязнения трансформаторного масла твердыми частицами. Определение размеров и количества частиц загрязнений осуществляется при помощи фотометрических анализаторов.

Таблица 5.1

Классификация уровня загрязнения трансформаторного масла твердыми частицами

Число частиц на 100 мл при размерах 5/15 мкм	Уровень загрязнения
250/32	Загрязнение отсутствует
1000/130	Низкое загрязнение — приемка на заводе
$32 \cdot 10^3 / 4 \cdot 10^3$	Нормальное загрязнение (типичный уровень при эксплуатации)
$130 \cdot 10^3 / 16 \cdot 10^3$	Высокое загрязнение
Еще больше	Крайнее загрязнение указывает на недостатки эксплуатации

Итак, наличие в трансформаторном масле частиц влаги или загрязнений заметно снижает его электрическую прочность. Продукты, загрязняющие масло, образуются при работе масла в трансформаторе, когда происходит процесс его постепенного старения.

Чтобы не допустить заметного ухудшения свойств трансформаторного масла, принимают меры по снижению попадающих в него загрязняющих продуктов — газов, кислот и смол.

Количество кислоты в масле характеризуется *кислотным числом*, равным количеству граммов едкого калия (KOH), необходимого для нейтрализации всех свободных кислот, содержащихся в 1 кг испытуемого материала. Кислотное число нормировано стандартом. Оно не должно превышать в процессе эксплуатации для разных марок масла значение 0,03—0,1.

Для регенерации стареющего масла, т. е. удаления из него продуктов старения и восстановления исходных свойств, применяют обработку масла адсорбентами, поглощающими воду и другие полярные вещества. Для такой обработки масло сливают из трансформатора, а после регенерации заливают вновь. Можно также ввести непрерывный процесс регенерации масла в работающем трансформаторе. Для этой цели трансформатор снабжают термосифонным фильтром со слоем адсорбента. За счет естественной циркуляции масла через термосифонный фильтр, оно непрерывно очищается. Фильтры периодически заменяют новыми, заполненными свежим адсорбентом. Рекомендуются также добавление к трансформаторному маслу ингибиторов (антиокислительных присадок), замедляющих процесс старения масла в 2—3 раза.

5.5. Пробой твердых диэлектриков

Для твердых диэлектриков различают четыре вида пробоя:

1. Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков.
2. Электрический пробой неоднородных диэлектриков.
3. Электротепловой (сокращенно тепловой) пробой.
4. Электрохимический пробой.

Каждый из указанных выше пробоев может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля, наличия в диэлектрике дефекта, условий охлаждения и времени действия напряжения.

Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков характеризуется весьма быстрым развитием. Он протекает

за время меньше чем 10^{-7} — 10^{-8} с и не обусловлен тепловой энергией. По своей природе этот пробой является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твердом теле в результате ударной ионизации создается электронная лавина.

Электрический пробой неоднородных диэлектриков характерен для технических диэлектриков, содержащих газовые включения, являющиеся слабыми местами твердой изоляции. Пробой в этих случаях также развивается очень быстро.

Электротепловой (сокращенно *тепловой*) *пробой* твердых диэлектриков сводится к разогреву материала в электрическом поле за счет диэлектрических потерь до температур, соответствующих полной или местной потере электроизоляционных свойств. Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество теплоты, выделяющейся в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превысит количество теплоты, которое может рассеиваться в данных условиях. При этом нарушается тепловое равновесие, и процесс приобретает лавинообразный характер. Пробивное напряжение при тепловом пробое зависит от условий охлаждения и температуры окружающей среды. Электротепловой пробой, как правило, происходит в том месте диэлектрика, где условия теплоотвода наихудшие. При пробое толстых образцов теплоотвод от внутренних областей затруднителен, поэтому они перегреты больше, чем слои, расположенные ближе к электродам. При увеличении толщины образца перегревание внутренних слоев увеличивается, и электрическая прочность уменьшается. Напряжение теплового пробоя связано и с нагревостойкостью материала. При малой нагревостойкости пробивные напряжения ниже. *Нагревостойкостью* называют способность диэлектрика выдерживать в течение времени, равном сроку его нормальной эксплуатации, определенную повышенную температуру без существенного ухудшения его свойств.

В отличие от электрического пробоя электрическая прочность при тепловом пробое является характеристикой не только электротехнического материала, но и изделия из него. Электрическая прочность связана с условиями охлаждения и температурой окружающей среды. Рассмотрим методику упрощенного расчета пробивного напряжения изоляционной конструкции при тепловом пробое.

Температура изолятора в электрическом поле устанавливается тогда, когда тепловыделение оказывается равным теплоотдаче в окружающую среду. В большинстве случаев теплоотвод обусловлен конвекцией воздуха. Обычно при расчете изоляторов выбирают рабочее напряжение, соответствующее установившейся температуре, чтобы температура нагрева не превосходила некоторого заданного значения, опасного с точки зрения нагревостойкости диэлектрика.

Мощность диэлектрических потерь P_a , выделяемая в изоляционной конструкции, будет равна [34]:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(T-T_0)}, \quad (5.13)$$

где U — приложенное напряжение, ω — угловая частота, C — емкость изоляционной конструкции, T — рабочая температура нагретого за счет диэлектрических потерь изолятора, T_0 — температура окружающей среды, $\operatorname{tg} \delta_0$ — тангенс угла диэлектрических потерь в диэлектрике при температуре T_0 , α — температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь. Температурным изменением ϵ_r , а следовательно, и емкости C пренебрегаем. В формуле (5.13) учтено, что $\operatorname{tg} \delta$ изменяется с ростом температуры по экспоненциальному закону.

Мощность, отводимая от диэлектрика, выражается формулой

$$P_T = \sigma S(T - T_0), \quad (5.14)$$

где σ — коэффициент теплоотдачи изоляционной конструкции из данного диэлектрика, S — площадь охлаждения изоляционной конструкции.

Приравняем тепловыделение P_a количеству тепла P_T , отводимого при заданной температуре с поверхности изолятора:

$$U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(T-T_0)} = \sigma S(T - T_0). \quad (5.15)$$

Из формулы (5.15) при известном значении рабочей температуры можно найти величину напряжения, при котором выполняется тепловой баланс:

$$U = \sqrt{\frac{\sigma S(T - T_0)}{\omega C \delta_0}} e^{-0,5\alpha(T-T_0)}. \quad (5.16)$$

Можно решить и обратную задачу: по известному рабочему напряжению определить рабочую температуру. Для наглядности решения указанных выше задач построим на одном графике зависимости от рабочей температуры T , выделяемой $P_a(T)$ и отводимой $P_T(T)$ мощностей (рис. 5.10). Первая зависимость представляет собой

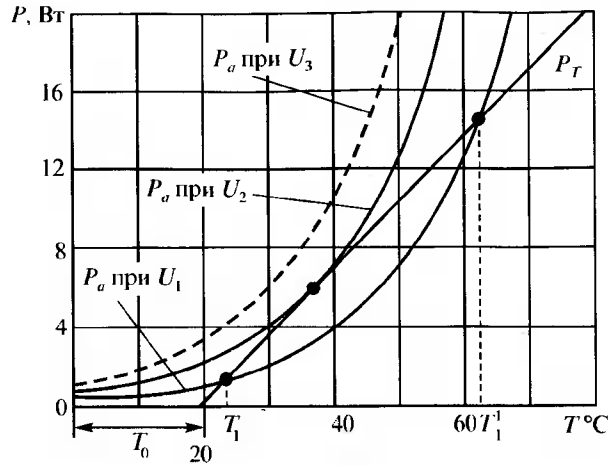


Рис. 5.10. Графическая иллюстрация к расчету пробивного напряжения при тепловом пробое

экспоненту тепловыделения, а вторая — прямую теплопередачи. Как видно из рис. 5.10, при некотором значении напряжения U_1 равновесие выделяемого и отводимого тепла может наступить при двух значениях температуры t_1 и t_1^1 . При температуре t_1 равновесие будет устойчивым, так как $\frac{dP_T}{dT} > \frac{dP_a}{dT}$, а при t_1^1 — неустойчивым, так как $\frac{dP_T}{dT} < \frac{dP_a}{dT}$. Поясним сказанное. Если при температуре T_1 по каким-либо причинам, например за счет нагрева солнечными лучами, произойдет хотя бы незначительное повышение температуры, то тепловыделение будет меньше, чем теплопередача, и система вернется в свое устойчивое состояние при температуре T_1 . Если же небольшой разогрев произойдет при температуре T_1^1 , то даже незначительное увеличение температуры приведет к тому, что тепловыделение будет больше теплопередачи. Температура будет возрастать вплоть до разрушения диэлектрика. Если диэлектрик работает при температуре T_1 , то разность $T_1^1 - T_1$ есть запас термической устойчивости.

Как видно из рис. 5.10, при напряжении U_2 неустойчивое равновесие наступает только в одной точке. В ней запас по устойчивости равен нулю. Прямая теплопередачи в этом случае будет касательной к кривой тепловыделения. Напряжение U_2 следует считать критическим напряжением или напряжением теплового пробоя.

Напряжение теплового пробоя можно найти по двум условиям:

$$P_a = P_T \text{ и } \frac{dP_T}{dT} = \frac{dP_a}{dT},$$

$$\text{или } U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(T-T_0)} = \sigma S (T - T_0). \quad (5.17)$$

$$U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_0 \alpha e^{\alpha(T-T_0)} = \sigma S. \quad (5.18)$$

Разделив (5.17) на (5.18), получим:

$$\frac{1}{\alpha} = T - T_0. \quad (5.19)$$

Подставим (5.17) в (5.16):

$$U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_0 \alpha e = \sigma S. \quad (5.20)$$

Из выражения (5.20) найдем напряжение теплового пробоя

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sigma S}{\omega C \operatorname{tg} \delta_0 \alpha e}}. \quad (5.21)$$

Из формулы (5.21) видно, что напряжение теплового пробоя будет больше, если у изолятора высокая теплоотдача. Напряжение пробоя уменьшается с ростом частоты и тангенса угла диэлектрических потерь.

Отметим, что при напряжении $U_3 > U_2$ равновесие вообще не наступает, так как кривая тепловыделения не пересекает прямую теплопередачи. Возрастание температуры будет происходить вплоть до разрушения диэлектрика.

Напряжение U_1 будет не опасно для диэлектрика, если нагрев до температуры T_1 не приведет к механическому или термическому разрушению структуры материала.

Электрохимический пробой твердых диэлектриков имеет место при повышенных температурах и повышенной влажности воз-

6. ДВУХСЛОЙНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

6.1. Общие замечания

духа, когда в материале развиваются электролитические процессы, обуславливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции. Такое явление часто называют тепловым старением диэлектрика в электрическом поле. Оно приводит к постепенному снижению электрической прочности, заканчивающемуся пробоем при напряженности поля, значительно меньшей пробивной напряженности, полученной при кратковременном испытании. Старение наблюдается как в органических, так и в неорганических диэлектриках. Электрохимический пробой требует для своего развития длительного времени, так как он связан с явлением электропроводности, приводящим к медленному выделению в материале малых количеств химически активных веществ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое пробивное напряжение и электрическая прочность? В каких единицах измеряются эти величины?
2. Какие механизмы пробоя вам известны?
3. Что такое ударная ионизация?
4. Что такое стример?
5. Как электрическая прочность воздуха зависит от температуры и давления?
6. Как электрическая прочность воздуха зависит от расстояния между электродами?
7. Чем отличается пробой в однородном поле от пробоя в неоднородном поле?
8. Как влияет полярность электродов в неоднородном поле на величину пробивного напряжения?
9. Что такое коэффициент импульса?
10. Что такое вольтсекундная характеристика газового промежутка?
11. В чем сущность электротеплового пробоя?

В промышленной изоляции часто применяются комбинации диэлектриков, сочетание которых позволяет получить наиболее благоприятные свойства изоляционной конструкции. В комбинированной изоляции, состоящей из нескольких диэлектриков с разными электрическими характеристиками, наблюдается специфическое явление, которое заключается в том, что на границах раздела диэлектриков накапливаются заряды, называемые *зарядами абсорбции*. Это явление называется *структурной*, или *миграционной*, *поляризацией*.

Рассмотрим процесс структурной поляризации на простейшей модели неоднородного диэлектрика, состоящего из двух слоев, обладающих различными относительными диэлектрическими проницаемостями ϵ_{r1} и ϵ_{r2} и удельными объемными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 (рис. 6.1, а). Пусть толщина первого диэлектрика будет d_1 , а второго d_2 .

Под действием электрического поля в диэлектрике возникают два явления: электропроводность и поляризация. Электропроводность технических диэлектриков носит, как правило, примесный характер. Чем больше в изоляции загрязняющих примесей, тем выше ее электропроводность и ниже электрическая прочность. Поэтому проводимость или обратная ей величина, сопротивление утечки (R_y), могут служить косвенными показателями степени загрязнения изоляции и, следовательно, общего состояния изоляции [2].

При подключении двухслойного диэлектрика к постоянному напряжению, кроме постоянного тока утечки, вызванного электропроводностью, наблюдается в течение непродолжительного времени так называемый ток абсорбции $i_{аб}$, снижающийся со временем до

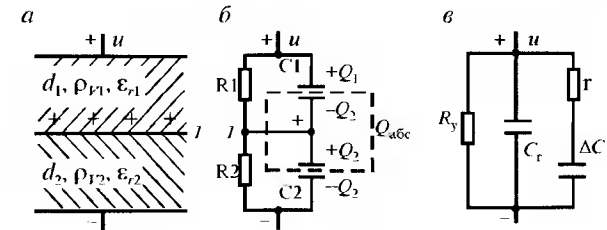


Рис. 6.1. Двухслойный диэлектрик и его схемы замещения

нуля по экспоненциальному закону. Ток абсорбции связан с образованием внутри диэлектрика объемных зарядов за счет разной поляризации слоев. Рассмотрим это явление с количественной стороны.

6.2. Заряд двухслойной изоляции

Представим двухслойную изоляцию в виде схемы замещения (рис. 6.1, б). Эта схема носит название двухслойного конденсатора Максвелла—Вагнера. Параметры этой схемы замещения выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} R_1 &= \rho_1 \frac{d_1}{S}, & R_2 &= \rho_2 \frac{d_2}{S}, \\ C_1 &= \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{S}{d_1}, & C_2 &= \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{S}{d_2}, \end{aligned} \quad (6.1)$$

где S — площадь электродов и границы раздела между слоями, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Если принять, что высоковольтный источник питания (ВИП) имеет бесконечную мощность (рис. 6.2), то в момент включения будет иметь место весьма кратковременный всплеск тока теоретически бесконечно большой амплитуды, и конденсаторы C_1 и C_2 «мгновенно» зарядятся. Напряжения на них в начальный момент распределятся обратно пропорционально емкостям слоев:

$$u_{10} = \frac{UC_2}{C_1 + C_2}, \quad u_{20} = \frac{UC_1}{C_1 + C_2}. \quad (6.2)$$

Заряды на конденсаторах C_1 и C_2 в начальный момент времени будут равны:

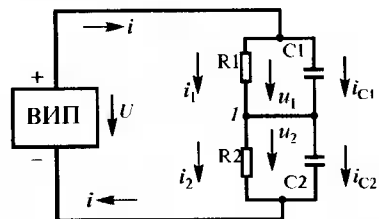


Рис. 6.2. Подключение неоднородной изоляции к источнику постоянного напряжения

$$\begin{aligned} Q_{10} &= C_1 u_{10} = \frac{UC_1 C_2}{C_1 + C_2}, \\ Q_{20} &= C_2 u_{20} = \frac{UC_1 C_2}{C_1 + C_2}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Нетрудно видеть, что $Q_{10} = Q_{20}$, т. е. отрицательный заряд на нижней обкладке конденсатора C_1 равен положительному заряду на

верхней обкладке конденсатора C_2 . Следовательно, заряд на границе раздела диэлектриков в первый момент равен нулю.

В конце переходного процесса напряжения на конденсаторах или напряжения на слоях будут прямо пропорциональны сопротивлениям R_1 и R_2 :

$$U_1 = \frac{UR_1}{R_1 + R_2}; \quad U_2 = \frac{UR_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.4)$$

Заряды на конденсаторах C_1 и C_2 будут определяться:

$$Q_1 = C_1 U_1 = \frac{UC_1 R_1}{R_1 + R_2}; \quad Q_2 = C_2 U_2 = \frac{UC_2 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.5)$$

Если $R_1 C_1 \neq R_2 C_2$, то $Q_1 \neq Q_2$. Следовательно, на границе раздела диэлектриков будет накапливаться заряд абсорбции $Q_{аб}$. Заряд абсорбции в установившемся режиме будет равен:

$$Q_{аб} = Q_2 - Q_1 = \frac{U}{R_1 + R_2} (R_2 C_2 - R_1 C_1). \quad (6.6)$$

В случае, если $R_1 C_1 = R_2 C_2$, заряд абсорбции будет равен нулю. Следовательно, условие $R_1 C_1 \neq R_2 C_2$ является условием неоднородности изоляции. Накопленный внутри объема изоляции заряд абсорбции нельзя мгновенно снять. Таким образом, заряд абсорбции и связанные с ним явления характеризуют неоднородность изоляции. При появлении некоторых дефектов и в процессе старения степень неоднородности изоляции изменяется. Также, как и величина зарядов абсорбции, которые могут служить показателем состояния изоляции и использоваться для целей контроля. Рассмотрим подробнее процесс накопления заряда абсорбции.

Заряд абсорбции накапливается за счет того, что в начальный момент после включения напряжения U , токи через резисторы R_1 и R_2 не равны по величине. Они определяются следующим образом (см. рис. 6.2):

$$i_{10} = \frac{u_{10}}{R_1} = \frac{UC_2}{R_1(C_1 + C_2)}; \quad i_{20} = \frac{u_{20}}{R_2} = \frac{UC_1}{R_2(C_1 + C_2)}. \quad (6.7)$$

Если $\frac{C_2}{R_1} > \frac{C_1}{R_2}$ или $R_2 C_2 > R_1 C_1$, то $i_{10} > i_{20}$. Это значит, что к границе слоев приходит больше зарядов, чем уходит от нее, и на

границе, разделяющей слои, начинает накапливаться заряд абсорбции $Q_{аб}$.

На схеме замещения рис. 6.1, б заряд абсорбции — это заряд в узле I , изображающем границу разделов между слоями изоляции при установившемся режиме. Он равен разности зарядов на электродах емкостей C_1 и C_2 , присоединенных к узлу I . В нашем случае этот заряд будет положительным. По мере накопления заряда абсорбции напряжение на конденсаторе C_1 будет уменьшаться, а на конденсаторе C_2 — возрастать. Соответственно меняются и токи утечки в слоях. Различие между токами i_1 и i_2 с течением времени уменьшается. Процесс накопления заряда абсорбции завершается при $t = \infty$, когда будет достигнуто ра-

венство $i_1 = i_2 = I_y = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{U}{R_y}$. Изменение токов происходит по экспоненциальному закону.

Ток переходного процесса представляет собой, как указывалось в (3.1), сумму двух составляющих: установившегося и свободного тока (тока абсорбции):

$$i = I_y + i_{св} = I_y + i_{аб} = I_y + Ae^{pt} = I_y + I_{аб.м}e^{pt}. \quad (6.8)$$

где $I_y = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{U}{R_y}$ — установившееся значение тока, A — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий (НУ) и равная максимальному значению тока абсорбции $I_{аб.м}$, p — корень характеристического уравнения, который можно определить, приравняв операторное сопротивление $Z(p)$ схемы на рис. 6.1, б нулю:

$$Z(p) = \frac{\frac{1}{pC_1}R_1 + \frac{1}{pC_2}R_2}{\frac{1}{pC_1} + R_1 + \frac{1}{pC_2} + R_2} = 0, \text{ откуда}$$

$$p = -\frac{R_1 + R_2}{R_1R_2(C_1 + C_2)}. \quad (6.9)$$

$$\text{Обозначим } \frac{R_1R_2(C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} = \tau, \quad (6.9, a)$$

тогда уравнение (6.8) можно записать:

$$i = I_y + I_{аб.м}e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6.10)$$

В уравнении (6.10) осталось неизвестным только значение максимального тока абсорбции $I_{аб.м}$. Определим его из НУ в момент $t = 0$:

$$i_{(0)} = I_y + I_{аб.м}e^0 = I_y + I_{аб.м}, \text{ откуда } I_{аб.м} = i_{(0)} - I_y.$$

Значение тока $i_{(0)}$ в момент $t = 0$ найдем из следующих соотношений.

По первому закону Кирхгофа:

$$i = i_1 + i_{C1} = i_2 + i_{C2}. \quad (6.11)$$

В момент $t = 0$:

$$i_{(0)} = i_{1(0)} + i_{C1(0)} = i_{2(0)} + i_{C2(0)}. \quad (6.12)$$

Токи через конденсаторы C_1 и C_2 будут выражаться:

$$i_{C1} = C_1 \frac{du_1}{dt}, \quad (6.13)$$

$$i_{C2} = C_2 \frac{du_2}{dt}. \quad (6.14)$$

По второму закону Кирхгофа:

$$u_1 + u_2 = U = \text{const}. \quad (6.15)$$

Возьмем производную от выражения (6.15) и учтем, что производная от постоянной величины равна нулю:

$$\frac{du_1}{dt} + \frac{du_2}{dt} = \frac{dU}{dt} = 0, \text{ следовательно,}$$

$$\frac{du_2}{dt} = -\frac{du_1}{dt}. \quad (6.16)$$

С учетом (6.16) можно найти соотношение токов в конденсаторах C_1 и C_2 :

$$\frac{i_{C1}}{i_{C2}} = -\frac{C_1}{C_2} \text{ или } i_{C2} = -i_{C1} \frac{C_2}{C_1}. \quad (6.17)$$

Подставим полученное значение тока i_{C2} в уравнение (6.11) и получим:

$$i_1 + i_{C1} = i_2 - i_{C1} \frac{C_2}{C_1} \text{ или } i_{C1} \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) = i_2 - i_1.$$

$$\text{Отсюда: } i_{C1} = \frac{(i_2 - i_1)C_1}{C_1 + C_2}. \quad (6.18)$$

В момент $t = 0$ ток i_{C1} будет равен:

$$i_{C1(0)} = \frac{(i_{2(0)} - i_{1(0)})C_1}{C_1 + C_2} = \frac{\left(\frac{UC_1^2}{(C_1 + C_2)R_2} - \frac{UC_2C_1}{(C_1 + C_2)R_1}\right)}{C_1 + C_2}$$

$$= \frac{U(C_1^2R_1 - C_1C_2R_2)}{(C_1 + C_2)^2 R_1R_2}. \quad (6.19)$$

Полный ток в момент $t = 0$:

$$i(0) = i_{1(0)} + i_{C1(0)} = \frac{UC_2}{(C_1 + C_2)R_1} + \frac{U(C_1^2R_1 - C_1C_2R_2)}{(C_1 + C_2)^2 R_1R_2}$$

$$= \frac{U(R_2C_2^2 + R_1C_1^2)}{(C_1 + C_2)^2 R_1R_2}. \quad (6.20)$$

Теперь можем найти максимальное значение тока абсорбции:

$$I_{аб.м} = i_{1(0)} - I_y = \frac{U(R_2C_2^2 + R_1C_1^2)}{(C_1 + C_2)^2 R_1R_2} - \frac{U}{R_1 + R_2}$$

$$= \frac{U(R_2C_2 - R_1C_1)^2}{(C_1 + C_2)^2 R_1R_2(R_1 + R_2)}. \quad (6.21)$$

Окончательное выражение для тока переходного процесса запишется:

$$i = I_y + I_{аб.м} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R_1 + R_2} + \frac{U(R_2C_2 - R_1C_1)^2}{(C_1 + C_2)^2 R_1R_2(R_1 + R_2)} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6.22)$$

Изменение во времени тока в неоднородной изоляции качественно такое же, как показано на рис. 3.1. Отличие заключается в количественных соотношениях. Процессы структурной поляризации протекают гораздо медленнее. Итак, процессы в неоднородном диэлектрике, происходящие при его включении на постоянное напряжение, проявляются во внешней цепи появлением тока абсорбции, который может быть зарегистрирован измерительным прибором. *Перед измерением токов утечки изоляция должна быть хорошо разряжена*, так как имеющийся в ней внутренний заряд может исказить процесс измерения.

Зная зависимость тока утечки i от времени t , можно найти и величину сопротивления изоляции R как функцию времени t :

$$R = \frac{U}{i} = \frac{U}{I_y + I_{аб.м} e^{-\frac{t}{\tau}}}. \quad (6.23)$$

Поскольку ток i со временем уменьшается, стремясь к значению I_y , то величина сопротивления R с течением времени возрастает, стремясь к установившемуся значению:

$$R_y = \frac{U}{I_y}. \quad (6.24)$$

В зависимости от соотношения I_y и $I_{аб.м}$ процесс увеличения R будет происходить по-разному. На рис. 6.3 показаны зависимости R от времени при одинаковом значении I_y и разных значениях максимального тока абсорбции $I_{аб.м}$. Постоянная времени $\tau = 12$ с. Как видно из рис. 6.3, *кривые имеют точку перегиба*, и значение со-

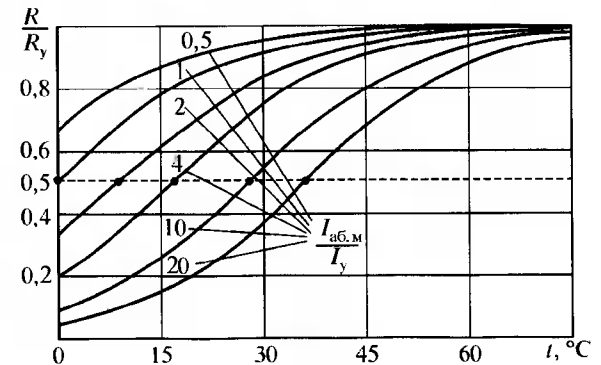


Рис. 6.3. Зависимость сопротивления изоляции от времени при разных значениях максимального тока абсорбции

противления в точке перегиба равно половине установившегося значения. Чем больше значение $I_{аб.м}$, тем дальше вправо сдвигается точка перегиба кривой изменения сопротивления. Если $I_{аб.м} < I_y$, то кривая R не имеет точки перегиба, или точка перегиба находится в области $t < 0$. Если $I_{аб.м} = I_y$, то точка перегиба наблюдается при $t = 0$. Если $I_{аб.м} > I_y$, то точка перегиба лежит вправо от оси ординат и наблюдается при $t > 0$ [13].

Отношение $I_{аб.м} / I_y$ характеризует состояние изоляции. Если изоляция увлажненная, то $I_{аб.м} / I_y$ также уменьшается. Опытным путем установлено, что для неувлажненной изоляции $I_{аб.м} / I_y > 1$, а для увлажненной < 1 . Таким образом, для исправной изоляции точка перегиба должна лежать правее оси ординат.

Состояние изоляции оценивают с помощью абсолютного значения сопротивления изоляции, а также с помощью коэффициента абсорбции $K_{аб}$, который равен отношению токов, измеренных через 15 и 60 с после приложения напряжения. Как показывает практика, при $t = 60$ с ток абсорбции в большинстве случаев падает почти до нуля и остается лишь сквозной ток утечки, т. е. $i_{60} = I_y$.

Поскольку сопротивление изоляции есть величина обратная току утечки, то коэффициент абсорбции определяют так же, как отношение одномоментного значения сопротивления изоляции R_{60} к пятнадцатисекундному значению R_{15} :

$$K_{аб} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{I_y + I_{аб.м} e^{-\frac{15}{\tau}}}{I_y} = \frac{R_{60}}{R_{15}}.$$

Для случая $I_{аб.м} = I_y$ и $\tau = 15$ с, что наиболее близко к постоянной времени изоляции крупных электрических машин, коэффициент абсорбции будет равен:

$$K_{аб} = \frac{I_y + I_y e^{-\frac{15}{\tau}}}{I_y} = \frac{I_y + I_y e^{-1}}{I_y} = 1 + 0,37 = 1,37.$$

Правила технической эксплуатации нормируют значение коэффициента абсорбции $K_{аб}$ для крупных электрических машин. Изоляция считается сухой, если $K_{аб} > 1,3$ при температуре 10—20 °С. Если $K_{аб} < 1,3$, то изоляция увлажненная и ее необходимо сушить.

В процессе эксплуатации происходит старение электрической изоляции, и коэффициент абсорбции снижается. Например, как показали исследования, проводимые в Нижегородском филиале РГОТУПС, у новых тяговых двигателей типа НБ-406 (или прошедших капитальный ремонт с полной заменой обмотки) среднее значение коэффициента абсорбции составляет 3,35, у двигателей, прошедших средний ремонт (промывка, пропитка и сушка изоляции), коэффициент абсорбции — 2,74, а у двигателей, поступивших в ремонт (до ремонта и неувлажненных), он равен 1,46 [15].

Пример 6.1. Корпусная изоляция тягового электродвигателя типа ДК-117 вагонов метрополитена представлена двухслойной схемой замещения с параметрами: $R_1 = 1,4$ ГОм, $R_2 = 13,6$ ГОм, $C_1 = 8$ нФ, $C_2 = 11,1$ нФ. Изоляция заряжается от источника напряжения 1000 В. Определить коэффициент абсорбции и величину сопротивления изоляции через 3 мин после начала процесса заряда.

Решение. Сопротивление утечки в установившемся режиме:

$$R_y = R_1 + R_2 = 1,4 + 13,6 = 15 \text{ ГОм} = 15 \cdot 10^9 \text{ Ом}.$$

Постоянная времени заряда изоляции:

$$\tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} = \frac{1,4 \cdot 10^9 \cdot 13,6 \cdot 10^9 (8 + 11,1) 10^{-9}}{15 \cdot 10^9} = 24,25 \text{ с}.$$

$$\text{Установившееся значение тока: } I_y = \frac{U}{R_y} = \frac{1000}{15 \cdot 10^9} =$$

$$= 70,1 \cdot 10^{-9} \text{ А} = 70,1 \text{ нА}.$$

Максимальное значение тока абсорбции:

$$I_{аб.м} = \frac{U(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)^2 (R_1 + R_2)} = \frac{1000(13,6 \cdot 11,1 - 1,4 \cdot 8)^2}{1,4 \cdot 10^9 \cdot 13,6 \cdot 10^9 (8 + 11,1)^2 10^{-18} 15 \cdot 10^9} =$$

$$= 187,5 \cdot 10^{-9} \text{ А} = 187,5 \text{ нА}.$$

$$\text{Ток заряда изоляции: } i = I_y + I_{аб.м} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Сопротивление изоляции в процессе заряда определится:

$$R = \frac{U}{i} = \frac{U}{I_y + I_{аб.м} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}$$

Найдем значения сопротивления через 15, 60 и 180 с после начала процесса заряда:

$$R_{15} = \frac{U}{70,1 \cdot 10^{-9} + 187,510^{-9} \exp\left(-\frac{15}{24,25}\right)} = 5,844 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 5,844 \text{ ГОм};$$

$$R_{60} = \frac{U}{70,1 \cdot 10^{-9} + 187,510^{-9} \exp\left(-\frac{60}{24,25}\right)} = 11,64 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 11,64 \text{ ГОм};$$

$$R_{180} = \frac{U}{70,1 \cdot 10^{-9} + 187,510^{-9} \exp\left(-\frac{180}{24,25}\right)} = 14,24 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 14,24 \text{ ГОм}.$$

Коэффициент абсорбции:

$$K_{аб} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{11,64}{5,844} = 2.$$

Как видно из расчетов, сопротивление изоляции через 60 с еще не достигает своего установившегося значения.

6.3. Схема замещения с параллельными ветвями

В ряде случаев удобнее пользоваться схемой замещения, показанной на рис. 6.1, в, в которой:

$$R_y = R_1 + R_2, \quad C_r = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2};$$

$$\Delta C = \frac{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)};$$

$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}. \quad (6.25)$$

где C_r — геометрическая емкость или смкость неоднородной изоляции при бесконечно высокой частоте; R_y — сопротивление утечки изоляции в установившемся режиме; ΔC и r — отражают накопление заряда абсорбции в неоднородной изоляции.

Величина сопротивления r получена из выражения $r = \frac{U}{I_{аб.м}}$,

а величина емкости ΔC — из выражения $\Delta C = \frac{\tau}{r}$.

Схема на рис. 6.1, в полностью эквивалентна схеме замещения по слоям (рис. 6.1, б) и получена чисто формальным путем из условий равенства полных сопротивлений диэлектрика в обеих схемах замещения. Тем не менее входящие в нее элементы имеют определенный физический смысл при $R_1 C_1 = R_2 C_2$, $\Delta C = 0$ и $r = \infty$.

Заряд абсорбции создается током абсорбции и определяется через него для обеих схем следующим образом:

$$Q_{абс} = \int_0^{\infty} I_{аб.м} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = -I_{аб.м} \tau \left| 0 - 1 \right| = I_{аб.м} \tau. \quad (6.26)$$

Подставив значение $\tau = r \Delta C = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2}$, одинаковое для обеих схем, получим:

$$Q_{абс} = I_{аб.м} \tau = \frac{U (R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)}. \quad (6.27)$$

Заряд абсорбции, накопленный на обкладках конденсатора ΔC (см. рис. 6.1, в), равен:

$$Q_{абс} = U \Delta C = \frac{U (R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)}. \quad (6.28)$$

Выражение совпадает с (6.27).

В схеме замещения, показанной на рис. 6.1, б, заряд на границе раздела двух сред равен:

$$Q_{гр} = \frac{U (R_2 C_2 - R_1 C_1)}{R_1 + R_2} \quad (6.29)$$

и оказывается больше, чем заряд, создаваемый током абсорбции $I_{аб. м} \tau$. Это объясняется тем, что заряд абсорбции в этой схеме создается не только током абсорбции, но и за счет перераспределения зарядов на конденсаторах $C1$ и $C2$, т. е. за счет разности токов, протекающих через резисторы $R1$ и $R2$. Заряд на границе раздела в этой схеме равен:

$$Q_{гр} = (i_{1(0)} - i_{2(0)})\tau \quad (6.30)$$

$$Q_{гр} = (i_{1(0)} - i_{2(0)})\tau = \left[\frac{UC_2}{(C_1 + C_2)R_1} - \frac{UC_1}{(C_1 + C_2)R_2} \right] \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} = \frac{U(C_2 R_2 - C_1 R_1)}{R_1 + R_2} \quad (6.31)$$

Выражение (6.31) совпадает с выражением (6.29).

Используя схему замещения, представленную на рис 6.1, в, можно показать, что емкость неоднородного диэлектрика зависит от частоты. Эта емкость складывается из постоянной по величине геометрической емкости C_r и эквивалентной емкости $C_{эжв}$ цепи r , ΔC : $C = C_r + C_{эжв}$. Эквивалентная емкость цепи r , ΔC найдется следующим образом. Комплексное сопротивление цепи r , ΔC запишется: $\underline{Z} = r - j \frac{1}{\omega \Delta C}$. Комплексная проводимость этой цепи:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{r - j \frac{1}{\omega \Delta C}} = \frac{r}{r^2 + \frac{1}{\omega^2 \Delta C^2}} + \frac{j \frac{1}{\omega \Delta C}}{r^2 + \frac{1}{\omega^2 \Delta C^2}} = g + j\omega C_{эжв} \quad (6.32)$$

Приравнявая мнимые части уравнения (6.32), выразим эквивалентную емкость:

$$C_{эжв} = \frac{1}{\omega^2 \Delta C} = \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 \Delta C^2 r^2} = \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (6.33)$$

где $t = r\Delta C$ — постоянная времени.

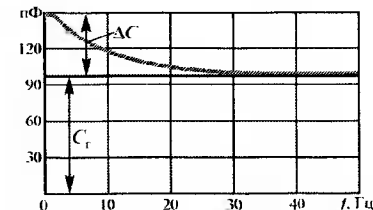


Рис. 6.4. Зависимость емкости от частоты для неоднородной изоляции

Итак, зависимость емкости неоднородного диэлектрика от частоты выразится формулой:

$$C_{(\omega)} = C_r + \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{или} \quad C_{(f)} = C_r + \frac{\Delta C}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2} \quad (6.34)$$

Зависимость $C = C(f)$, рассчитанная по формуле (6.34), показана на рис. 6.4 для следующих параметров: $C_r = 98,33$ пФ, $\Delta C = 49,78$ пФ, $\tau = 0,018$ с. По изменению емкости в зависимости от частоты судят об увлажнении изоляции. Для этого рассчитывают или измеряют емкости при двух частотах: 2 Гц и 50 Гц. Отношение емкостей при этих частотах и служит критерием увлажненности изоляции. Изоляция трансформаторов до 35 кВ включительно считается недопустимо увлажненной, если при температуре 20 °C $\frac{C_2}{C_{50}} > 1,3$.

Пример 6.2. Двухслойный диэлектрик служит изолятором между двумя электродами. Материал первого слоя имеет относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{r1} = 4$ и удельную объемную проводимость $\gamma_1 = 4 \cdot 10^{-10}$ См/м. Материал второго слоя имеет относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{r2} = 2,5$ и удельную объемную проводимость $\gamma_2 = 2 \cdot 10^{-9}$ См/м. Толщина первого слоя $d_1 = 10$ мм, второго слоя — $d_2 = 5$ мм. Площадь электродов $S = 500$ см². Определить параметры двух схем замещения, показанных на рис. 6.1, а также зависимость емкости изоляции от частоты приложенного напряжения. Считая, что причиной неоднородности изоляции является увлажнение, определить степень ее увлажнения. Все данные приведены для температуры 20 °C.

Решение. Определим сначала параметры схемы замещения по слоям (рис. 6.1, б):

$$R_1 = \frac{d_1}{\gamma_1 S} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 500 \cdot 10^{-4}} = 500 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 500 \text{ МОм},$$

$$R_2 = \frac{d_2}{\gamma_2 S} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-9} \cdot 500 \cdot 10^{-4}} = 50 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 50 \text{ МОм},$$

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d_1} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 500 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-3}} = 177 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 177 \text{ пФ},$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d_2} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot 500 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 221,2 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 221,2 \text{ пФ}.$$

Определим параметры второй схемы замещения (см. рис. 6.1, в), характеризующей диэлектрик в целом. Параметры этой схемы выразятся:

$$R_y = R_1 + R_2 = 500 \cdot 10^6 + 50 \cdot 10^6 = 550 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 550 \text{ МОм},$$

$$C_r = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{177 \cdot 10^{-12} \cdot 221,2 \cdot 10^{-12}}{177 \cdot 10^{-12} + 221,2 \cdot 10^{-12}} = 98,33 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 98,33 \text{ пФ},$$

$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2} = \frac{500 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^6 (500 + 50) 10^6 ((177 + 221,2) 10^{-12})^2}{(50 \cdot 10^6 \cdot 221,2 \cdot 10^{-12} - 500 \cdot 10^6 \cdot 177 \cdot 10^{-12})^2} =$$

$$= 363,7 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 363,7 \text{ МОм},$$

$$\Delta C = \frac{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)} = \frac{(50 \cdot 10^6 \cdot 221,2 \cdot 10^{-12} - 500 \cdot 10^6 \cdot 177 \cdot 10^{-12})^2}{((500 + 50) 10^6)^2 (177 + 221,2) 10^{-12}} =$$

$$= 49,78 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 49,78 \text{ пФ}.$$

Определим постоянную времени заряда изоляции для первой схемы замещения:

$$\tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} = \frac{500 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^6 (177 + 221,2) 10^{-12}}{500 \cdot 10^6 + 50 \cdot 10^6} = 0,018 \text{ с},$$

а также для второй схемы замещения:

$$\tau = r \Delta C = 363,7 \cdot 10^6 \cdot 49,78 \cdot 10^{-12} = 0,018 \text{ с}.$$

Результаты совпадают, так как обе схемы эквивалентны друг другу. Зависимость емкости от частоты приложенного напряжения

для схемы, изображенной на рис. 6.1, в, определится выражением (6.34):

$$C_{(\omega)} = C_r + \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{или} \quad C_{(f)} = C_r + \frac{\Delta C}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2}.$$

Для оценки степени увлажнения определим значения емкостей при частотах 2 Гц и 50 Гц:

$$C_2 = C_r + \frac{\Delta C}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2} = 98,33 \cdot 10^{-12} +$$

$$+ \frac{49,78 \cdot 10^{-12}}{1 + (2 \cdot 3,14 \cdot 2)^2 0,018^2} = 145,7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$C_{50} = C_r + \frac{\Delta C}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2} = 98,33 \cdot 10^{-12} +$$

$$+ \frac{49,78 \cdot 10^{-12}}{1 + (2 \cdot 3,14 \cdot 50)^2 0,018^2} = 99,83 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

$$\text{Степень увлажненности: } \frac{C_2}{C_{50}} = \frac{145,7 \cdot 10^{-12}}{99,83 \cdot 10^{-12}} = 1,46 > 1,3.$$

Следовательно, изоляция недопустимо увлажнена.

Подводя итог сказанному, можно заключить, что с помощью измерения сопротивления изоляции можно судить лишь о грубых дефектах в изоляции. Коэффициент абсорбции дает более объективную оценку состояния изоляции, так как учитывает заряд абсорбции. Однако контроль заряда абсорбции по току абсорбции неудобен тем, что ток абсорбции мал и промышленные помехи сильно искажают его.

Ток абсорбции измеряется с большой погрешностью. Кроме того, его сопровождает сильный бросок тока заряда емкостей C_1 и C_2 , от которого приходится защищать измерительные приборы. Поэтому удобнее пользоваться другими методами об-

нарушения явления абсорбции. Так, например, на практике можно применить метод измерения возвратного напряжения и напряжения саморазряда. Рассмотрим подробнее эти два метода.

6.4. Возвратное напряжение в двухслойной изоляции

Опыт, в котором наблюдается возвратное напряжение, состоит в следующем. Неоднородная изоляция, которую для простоты будем считать двухслойной, заряжается в течение одной минуты при постоянном напряжении, чтобы в ней накопился заряд абсорбции (рис. 6.5, а). В этом режиме высоковольтные реле P1 и P2 включены. Затем изоляция отключается от источника постоянного напряжения и ее электроды замыкаются накоротко на очень малый промежуток времени Δt (реле P1 и P2 выключены). После этого реле P1 остается выключенным, а реле P2 включается. Начинается процесс восстановления напряжения на изоляции.

За время Δt кратковременного замыкания электродов геометрическая емкость C_{Γ} полностью разряжается, а заряд абсорбции $Q_{\text{абс}}$, накопленный на границе слоев, остается практически неизменным. На рис. 6.5, а полярность напряжения на конденсаторах показана до замыкания электродов накоротко. В период времени Δt конденсаторы слоев C1 и C2 включены параллельно, и заряд аб-

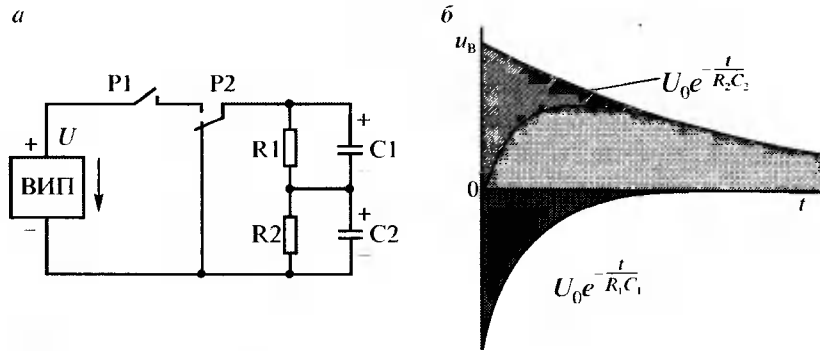


Рис. 6.5. Принципиальная схема устройства для измерения возвратного напряжения и напряжения саморазряда (а). Зависимость возвратного напряжения от времени (б)

сорбции $Q_{\text{абс}} = Q_2 - Q_1$ распределится на оба конденсатора и зарядит их до напряжения:

$$U_0 = \frac{Q_{\text{абс}}}{C_1 + C_2} = \frac{U(R_2 C_2 - R_1 C_1)}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)}. \quad (6.35)$$

После размыкания внешних электродов изоляции конденсаторы C1 и C2 вновь оказываются соединенными последовательно и заряженными до одинакового напряжения U_0 , но разной полярности. Напряжения на слоях будут: $U_{20} = +U_0$, а $U_{10} = -U_0$. Поэтому в момент размыкания электродов (примем его за $t = 0$) напряжение на изоляции, как сумма напряжений на слоях, будет равно нулю. Однако далее конденсаторы C1 и C2 будут разряжаться на сопротивление утечки своих слоев R_1 и R_2 с разной скоростью, так как постоянные времени слоев $t_1 = R_1 C_1$ и $t_2 = R_2 C_2$ неодинаковы. На изоляции появится напряжение $u_{\text{в}}$, равное разности двух экспонент (рис. 6.5, б):

$$u_{\text{в}} = U_0 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} - U_0 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} = U_0 \left(e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \right) \quad (6.36)$$

Это напряжение и называют *возвратным напряжением*. По величине и форме возвратного напряжения можно судить о состоянии изоляции.

Пример 6.3. Корпусная изоляция якоря тягового электродвигателя представлена в виде двухслойного диэлектрика (см. рис. 6.1, б) с параметрами: $R_1 = 60 \text{ МОм}$, $R_2 = 180 \text{ МОм}$, $C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$, $C_2 = 0,3 \text{ мкФ}$. Рассчитать величину возвратного напряжения на изоляции якоря, заряженного от источника постоянного напряжения $U = 1000 \text{ В}$ после отключения его от источника напряжения и кратковременного замыкания электродов. Чему будет равно возвратное напряжение через 30 с после начала процесса восстановления напряжения?

Решение. Постоянные времени слоев:

$$\tau_1 = R_1 C_1 = 60 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = 12 \text{ с}, \tau_2 = R_2 C_2 = 180 \cdot 10^6 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} = 54 \text{ с}.$$

Заряд абсорбции, или внутренний поглощенный заряд, равен:

$$Q_{\text{абс}} = Q_2 - Q_1 = \frac{U(R_2 C_2 - R_1 C_1)}{(R_1 + R_2)} = \frac{U(\tau_2 - \tau_1)}{(R_1 + R_2)} = \frac{1000(54 - 12)}{(60 + 180)10^6} = 175 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}.$$

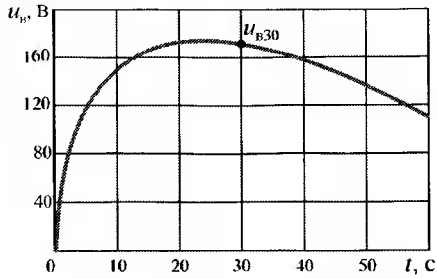


Рис. 6.6. Зависимость возвратного напряжения от времени для примера (6.3)

Напряжение на конденсаторах C1 и C2 при кратковременном замыкании электродов изоляции накоротко:

$$U_0 = \frac{Q_2 - Q_1}{C_1 + C_2} = \frac{Q_{\text{абс}}}{C_1 + C_2} = \frac{175 \cdot 10^{-6}}{(0,2 + 0,3)10^{-6}} = 350 \text{ В.}$$

Возвратное напряжение будет изменяться по закону:

$$\begin{aligned} u_v &= U_0 e^{-\frac{t}{\tau_2}} - U_0 e^{-\frac{t}{\tau_1}} = U_0 (e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) = \\ &= 350 (e^{-\frac{t}{54}} - e^{-\frac{t}{12}}). \end{aligned} \quad (6.37)$$

Кривая, построенная по уравнению (6.37), приведена на рис. 6.6. Возвратное напряжение через 30 с после начала процесса восстановления напряжения будет равно:

$$u_{v30} = U_0 (e^{-\frac{30}{\tau_2}} - e^{-\frac{30}{\tau_1}}) = 350 (e^{-\frac{30}{54}} - e^{-\frac{30}{12}}) = 172 \text{ В.}$$

6.5. Напряжение саморазряда в двухслойной изоляции

После отключения изоляции от источника постоянного напряжения U (реле P1 на рис. 6.5, а выключено, а реле P2 включено) заряженные конденсаторы C1 и C2 слоев неоднородной изоляции будут разряжаться на сопротивления утечки своих слоев R_1 и R_2 , т.е. будет происходить постепенный саморазряд изоляции. Напря-

жение саморазряда на изоляции будет равно сумме напряжений на отдельных слоях изоляции, т. е. будет равно сумме экспонент:

$$u_c = U_{C1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{C2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (6.38)$$

Если изоляция заряжалась в течение длительного времени, то напряжения на слоях в начальный момент времени будут прямо пропорциональны величинам активных сопротивлений слоев:

$$U_{C1} = \frac{UR_1}{R_1 + R_2}; \quad U_{C2} = \frac{UR_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.39)$$

Следовательно,

$$u_c = \frac{UR_1}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{UR_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (6.40)$$

Если же изоляция разряжается после кратковременного подключения к источнику постоянного напряжения, то процесс саморазряда в этом случае будет описываться уравнением:

$$u'_c = U_{10} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{20} e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (6.41)$$

$$\text{Здесь } U_{10} = \frac{UC_2}{C_1 + C_2}; \quad U_{20} = \frac{UC_1}{C_1 + C_2}. \quad (6.42)$$

Следовательно,

$$u'_c = \frac{UC_2}{C_1 + C_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{UC_1}{C_1 + C_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (6.43)$$

Отметим, что разность двух напряжений саморазряда u_c и u'_c дает значение возвратного напряжения. Действительно,

$$\begin{aligned} u_c - u'_c &= \frac{U(R_1 C_1 - R_2 C_2)}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{U(R_2 C_2 - R_1 C_1)}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)} e^{-\frac{t}{\tau_2}} = \\ &= U_0 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} - U_0 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} = u_v, \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\text{где } U_0 = \frac{U(R_2 C_2 - R_1 C_1)}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)}.$$

Пример 6.4. Определить напряжение саморазряда изоляции якоря тягового электродвигателя с параметрами, данными в примере (6.3), для двух случаев: длительного и кратковременного заряда изоляции от источника напряжения 1000 В. По двум напряжениям саморазряда определить возвратное напряжение.

Решение. При длительном заряде изоляции напряжения на слоях будут равны:

$$U_{C1} = \frac{UR_1}{R_1 + R_2} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot 10^6}{(60 + 180)10^6} = 250 \text{ В},$$

$$U_{C2} = \frac{UR_2}{R_1 + R_2} = \frac{1000 \cdot 180 \cdot 10^6}{(60 + 180)10^6} = 750 \text{ В}.$$

Напряжение саморазряда:

$$u_c = 250e^{-\frac{t}{\tau_1}} + 750e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (6.45)$$

При кратковременном заряде изоляции напряжения на двух слоях будут равны:

$$U_{10} = \frac{UC_2}{C_1 + C_2} = \frac{1000 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}}{(0,2 + 0,3)10^{-6}} = 600 \text{ В}.$$

$$U_{20} = \frac{UC_1}{C_1 + C_2} = \frac{1000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}}{(0,2 + 0,3)10^{-6}} = 400 \text{ В}.$$

Напряжение саморазряда

$$u'_c = 600e^{-\frac{t}{\tau_1}} + 400e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (6.46)$$

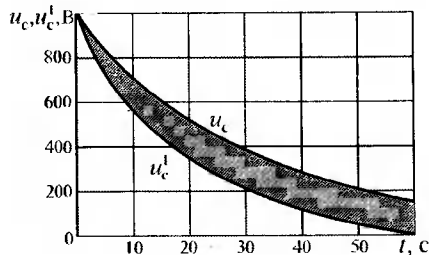


Рис. 6.7. Зависимость напряжения саморазряда от времени при длительном (u_c) и кратковременном (u'_c) заряде изоляции для примера (6.4)

На рис. 6.7 приведены зависимости u_c и u'_c , рассчитанные по формулам (6.45) и (6.46). Возвратное напряжение получается как разность этих напряжений (на рис. 6.7 — это заштрихованная область):

$$\begin{aligned} u_{\text{в}} = u_c - u'_c &= 250e^{-\frac{t}{\tau_1}} + 750e^{-\frac{t}{\tau_2}} - 600e^{-\frac{t}{\tau_1}} - 400e^{-\frac{t}{\tau_2}} = \\ &= 350e^{-\frac{t}{\tau_2}} - 350e^{-\frac{t}{\tau_1}} = 350(e^{-\frac{t}{54}} - e^{-\frac{t}{12}}). \end{aligned}$$

Выражение для возвратного напряжения совпадает с полученным ранее в примере (6.3).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Где и за счет чего возникает заряд абсорбции?
2. По каким параметрам судят об увлажнении изоляции?
3. Что такое возвратное напряжение?
4. Как изменяется напряжение саморазряда на двухслойном диэлектрике?
5. Как определяются параметры схемы замещения двухслойного диэлектрика?

7. СТАРЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

7.1. Основные понятия о старении изоляции

Изоляция электротехнических установок, согласно ГОСТ 1516.2—97, подразделяется на внутреннюю и внешнюю. Внутренняя изоляция — это части изоляционной конструкции, в которых изолирующей средой являются жидкие, твердые или газообразные диэлектрики или их комбинация, не соприкасающиеся с атмосферным воздухом и не подверженные влиянию атмосферных и других внешних факторов. Внешней изоляцией являются воздушные промежутки и поверхность твердой изоляции в атмосферном воздухе, которые подвержены влиянию атмосферных и других внешних факторов.

В эксплуатации на внутреннюю изоляцию электрооборудования воздействуют электрические, тепловые, механические и другие нагрузки. Они вызывают в изоляции сложные процессы, следствием которых является постепенное ухудшение свойств изоляции, именуемое старением. Как правило, изменения свойств изоляции носят необратимый характер и завершаются пробоем. Однако в отдельных случаях последствия старения могут быть устранены путем восстановительного ремонта изоляции [20].

Процессы старения изоляции ограничивают срок службы изоляционных конструкций. Поэтому при разработке, изготовлении и в процессе эксплуатации оборудования высокого напряжения должны предусматриваться меры, снижающие темпы старения изоляции до такого уровня, при котором обеспечивается требуемый срок службы изоляционных конструкций (обычно 20—30 лет и более).

Изменение свойств внутренней изоляции в процессе эксплуатации происходит за счет воздействия на нее различных видов энергии. Кроме того, старение изоляции может быть обусловлено проникновением в нее из окружающей среды загрязнений и частиц влаги.

7.2. Электрическое старение изоляции

Электрическое старение может происходить при напряженностях электрического поля во много раз (5—20) меньше пробив-

ных напряжений. С увеличением напряжения, приложенного к изоляции, темпы электрического старения возрастают, а срок службы соответственно уменьшается. Экспериментально установлено, что зависимость срока службы τ от значения воздействующего напряжения U в диапазоне значений τ от единиц до 10^4 ч имеет вид

$$\tau = \frac{A}{U^n}, \quad (7.1)$$

где A — постоянная, зависящая от свойств изоляции; n — показатель степени, зависящий от конструктивных особенностей изоляции и рода воздействующего напряжения ($n = 4—8$ при напряжении промышленной частоты и $n = 9…12$ при постоянном напряжении).

Для области больших сроков службы (более 10^4 ч) используют другую формулу:

$$\tau = \frac{A}{(U - U_{\text{чр}})^n}, \quad (7.2)$$

где $U_{\text{чр}}$ — напряжение появления в изоляции частичных разрядов, являющихся основной причиной электрического старения внутренней изоляции.

Типичным значением постоянной A для твердой изоляции при нормальных условиях является значение $6 \cdot 10^9 \text{ год}/(\text{кВ})^n$. Показатель степени n обычно выбирают равным 6. Таким образом, формула (7.2) записывается так:

$$\tau = \frac{6 \cdot 10^9}{(U - U_{\text{чр}})^6}. \quad (7.3)$$

Частичные разряды представляют собой локальные пробои ослабленных участков изоляции, которыми являются газовые полости. Зависимости $t = f(U)$ получили название «кривых жизни» изоляции. Формулой (7.3) пользуются для случая, когда $U > U_{\text{чр}}$. При $U < U_{\text{чр}}$ электрического старения изоляции не происходит, и срок ее службы неограниченно возрастает. На рис. 7.1 приведена «кривая жизни» изоляции в двойном логарифмическом масштабе.

Пример 7.1. Напряжение возникновения частичных разрядов (ЧР)

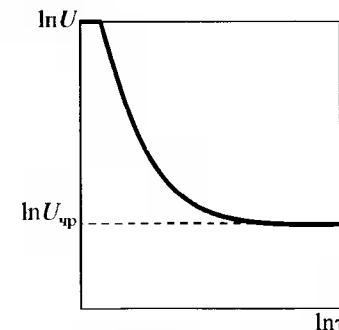


Рис. 7.1. «Кривая жизни» изоляции в двойном логарифмическом масштабе

в изоляционной конструкции $U_{\text{чр}} = 50 \text{ кВ}$. Какое рабочее напряжение можно приложить к изоляции, чтобы расчетный срок службы ее от электрического старения составил $\tau = 40$ лет?

Решение. Из формулы (7.3) для срока службы изоляции от электрического старения $\tau = \frac{A}{(U - U_{\text{чр}})^n} = \frac{6 \cdot 10^9}{(U - U_{\text{чр}})^6}$ определим величину рабочего напряжения:

$$U = U_{\text{чр}} + \sqrt[n]{\frac{A}{\tau}} = 50 + \sqrt[6]{\frac{6 \cdot 10^9}{40}} = 50 + 23 = 73 \text{ кВ}.$$

7.3. Тепловое старение изоляции

Диэлектрические материалы, используемые для изготовления внутренней изоляции установок высокого напряжения, при комнатной температуре практически инертны. Однако при рабочих температурах (90—180 °С) в этих материалах возникают или резко ускоряются химические реакции, которые изменяют структуру материалов и вызывают ухудшение свойств всей изоляции в целом. Эти процессы именуют *тепловым старением*. Твердые диэлектрические материалы в процессе теплового старения постепенно снижают механическую прочность. Это приводит к повреждению изоляции под действием механических нагрузок и затем уже к пробое.

В жидких диэлектриках в результате теплового старения образуются газообразные, жидкие и твердые продукты реакций. По мере накопления этих продуктов, загрязняющих изоляцию, проводимость и диэлектрические потери растут, а электрическая прочность снижается.

Темпы теплового старения внутренней изоляции определяются скоростями химических реакций, зависящими от температуры. Обычно полагают, что срок службы при тепловом старении обратно пропорционален скорости химических реакций. Тогда отношение сроков службы изоляции τ_1 и τ_2 при разных температурах T_1 и T_2 будет выражаться:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = 2^{-\frac{(T_1 - T_2)}{\Delta T}}, \quad (7.4)$$

где ΔT — повышение температуры, вызывающее сокращение срока службы изоляции при тепловом старении в 2 раза.

Значение ΔT для разных видов внутренней изоляции лежит в пределах 8—12 °С, в среднем для изоляции тяговых электродвигателей составляет 10 °С. Для изоляции силовых трансформаторов принимают $\Delta T = 8$ °С. Если же изоляция трансформаторов сильно изношена, то принимают $\Delta T = 6$ °С. Уравнение (7.4) называют *правилом Монцингера*, или правилом десяти градусов. Для ограничения теплового старения и обеспечения требуемого срока службы изоляционной конструкции для отдельных видов изоляции, в соответствии с ГОСТ и рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК), устанавливаются наибольшие допустимые рабочие температуры. По величине допустимой рабочей температуры все изоляционные материалы делятся на 7 классов нагревостойкости [1].

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Наибольшая рабочая температура в:							
°С	90	105	120	130	155	180	более 180
К	363	378	393	403	428	453	более 453

К классу Y относятся волокнистые материалы на основе целлюлозы и шелка (пряжа, хлопчатобумажные и шелковые ткани, ленты, бумага, картон, древесина и т. п.), если они не пропитаны и не погружены в жидкий электроизоляционный материал.

К классу A принадлежат те же самые органические волокнистые материалы, пропитанные лаками или компаундами или погруженные в жидкий электроизоляционный материал, предохраняющий от доступа кислорода воздуха, который ускоряет тепловое старение изоляции. Например, это хлопчатобумажная изоляция проводов в пропитанной лаком обмотке электрической машины или хлопчатобумажная изоляция обмотки маслонаполненного трансформатора. К классу A относится также изоляция эмаль-проводов на масляно-смоляных лаках.

К классу E относятся пластические массы с органическим наполнителем на основе термоактивного связующего типа феноло-формальдегидных смол (гетинакс, текстолит). К этому же классу относятся и лавсановые пленки, эпоксидные, полиэфирные и полиуретановые смолы, а также изоляция эмаль-проводов на таких смолах.

Итак, к первым трем классам нагревостойкости Y, A и E относятся главным образом органические электроизоляционные материалы.

К классу В относятся материалы, содержащие неорганические компоненты (щепанную слюду, асбестовые и стекловолоконистые материалы) в сочетании с органическими связующими и пропитывающими материалами. Сюда входят миканиты, стеклоткани и стеклотекстолиты на феноло-формальдегидных термоактивных смолах и эпоксидные компаунды с неорганическими наполнителями.

К классу F принадлежат слюдяные продукты (миканиты), изделия на основе стекловолокна без подложки или с неорганической подложкой с органическими связующими и пропитывающими веществами, обладающими повышенной нагревостойкостью. К таким связующим относятся эпоксидные, терморезистивные, полиэфирные и кремнийорганические смолы.

К классу Н относятся материалы, применяемые для класса F, но для изготовления которых применяют кремнийорганические смолы особо высокой нагревостойкости.

К классу С относятся чисто неорганические материалы без связующих и пропитывающих органических веществ: слюда, стекло, стеклоткани, асбест, кварц, микалекс. Из органических электроизоляционных материалов к классу С относятся только политетрафторэтилен (фторопласт-4 или тефлон) и материалы на основе полиимидов.

При указанных температурах обеспечиваются технико-экономически целесообразные сроки службы электрооборудования. При повышении температуры срок службы изоляции снижается. Наивысшая рабочая температура определяется на основании тщательного изучения поведения материала при различных температурах с учетом коэффициента запаса, зависящего от условий эксплуатации, необходимой надежности и заданного срока службы.

Пример 7.2. Изоляция класса Y рассчитана на работу при номинальной температуре $T_H = 90^\circ\text{C}$ в течение $\tau_H = 25$ лет. Сколько проработает изоляция, если ее рабочая температура будет равна $T = 114^\circ\text{C}$?

Решение. По правилу Монтзингера, при повышении температуры на каждые 10°C срок службы изоляции уменьшается в 2 раза. Поэтому срок службы τ изоляции при температуре $T = 114^\circ\text{C}$ будет равен:

$$\tau = \tau_H \cdot 2^{\frac{(T-T_H)}{\Delta T}} = 25 \cdot 2^{\frac{114-90}{10}} = 25 \cdot 2^{2,4} = 4,74 \text{ года.}$$

Пример 7.3. Изоляция класса А, рассчитанная на работу в течение $\tau_H = 20$ лет при номинальной температуре, проработала в течение времени $\tau = 2,5$ года при температуре $T = 115^\circ\text{C}$. Каков оставшийся расчетный ресурс работы изоляции, если ее рабочая температура в оставшийся период будет равна: а) 105°C и б) 125°C ?

Решение. Нормальная рабочая температура для изоляции класса А составляет $T_H = 105^\circ\text{C}$. При повышенной температуре происходит ускоренное старение изоляции. Значит, за 2,5 года изоляция состарилась так, как будто бы она проработала не 2,5 года, а

$$\tau^1 = \tau \cdot 2^{\frac{T-T_H}{\Delta T}} = 2,5 \cdot 2^{\frac{115-105}{10}} = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ лет.}$$

Оставшийся ресурс работы для случая а при температуре 105°C будет равен $\tau_1 = \tau_H - \tau^1 = 20 - 5 = 15$ лет. Таким образом, полная продолжительность работы будет $2,5 + 15 = 17,5$ лет вместо 20-ти.

Оставшийся ресурс работы для случая б при температуре 125°C будет равен:

$$\tau_2 = (\tau_H - \tau^1) \cdot 2^{\frac{125-105}{10}} = 15 \cdot 2^{-2} = \frac{15}{4} = 3,75 \text{ года.}$$

Полная продолжительность работы во втором случае будет $2,5 + 3,75 = 6,25$ года вместо 20-ти.

Пример 7.4. Старение изоляции класса Е происходит под действием двух факторов: температуры и частичных разрядов, т. е. тепловое и электрическое старение происходит одновременно. Рабочее напряжение изоляции $U = 35$ кВ, напряжение возникновения частичных разрядов $U_{чр} = 15$ кВ. Изоляция рассчитана на срок службы $\tau_H = 25$ лет при отсутствии частичных разрядов и при номинальной рабочей температуре $T_H = 120^\circ\text{C}$. Определить расчетный срок службы изоляции при температуре $t = 130^\circ\text{C}$ и наличии частичных разрядов.

Решение. Срок службы изоляции при наличии теплового старения равен

$$\tau_T = \tau_H \cdot 2^{\frac{T-T_H}{\Delta T}} = 25 \cdot 2^{\frac{130-120}{10}} = 25 \cdot 2^1 = 12,5 \text{ лет.}$$

Срок службы изоляции при электрическом старении:

$$\tau_3 = \frac{A}{(u - U_{чр})^6} = \frac{6 \cdot 10^9}{(35 - 15)^6} = 93,75 \text{ года.}$$

Срок службы изоляции при одновременном действии двух механизмов старения:

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}} = \frac{1}{\frac{1}{12,5} + \frac{1}{93,75}} = 11 \text{ лет.}$$

7.4. Механическое старение изоляции

Внутренняя изоляция или ее отдельные элементы из твердых диэлектрических материалов обычно подвергаются в эксплуатации значительным статическим и динамическим ударным механическим нагрузкам. Под действием этих механических нагрузок (растяжение, сжатие, изгиб, вибрация и т. д.) в диэлектрике образуются и постепенно увеличиваются микротрещины. Когда количество и размеры микротрещин достигают некоторых критических значений, наступает механическое разрушение материала. Однако кроме механического разрушения диэлектрика наличие микротрещин приводит к преждевременному пробоя изоляции, так как наличие трещин существенно снижает электрическую прочность диэлектрика. Покажем роль микротрещин в изоляции на примере.

Пример 7.5. Расстояние между плоскими токоведущими частями $d_1 = 5$ мм заполнено диэлектриком, имеющим значение относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{r1} = 4$ и электрической прочности $E_{пр1} = 20$ кВ/мм. Какое предельное напряжение можно приложить к токоведущим частям и насколько снизится это напряжение, если между токоведущими частями появится микротрещина — воздушная прослойка толщиной $d_2 = 0,2$ мм? Электрическая прочность воздуха $E_{пр2} = 3$ кВ/мм, а относительная диэлектрическая проницаемость равна 1.

Решение. Предельное напряжение между токоведущими частями при отсутствии микротрещин равно:

$$U_{пр} = E_{пр1}d_1 = 20 \cdot 5 = 100 \text{ кВ.}$$

При наличии микротрещины — воздушной прослойки — напряжение между токоведущими частями будет равно:

$$U = E_1d_1 + E_2d_2.$$

Зная, что напряженности в различных слоях обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям, т. е. $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}$, выразим напряженность E_1 в диэлектрике $E_1 = E_2 \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}$ и подставим это значение в уравнение для напряжения:

$$U = E_2 \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} d_1 + E_2 d_2 = E_2 \left(\frac{\epsilon_{r2}d_1 + \epsilon_{r1}d_2}{\epsilon_{r1}} \right)$$

Подставив вместо значения E_2 его электрическую прочность, найдем значение предельного напряжения при наличии воздушной прослойки:

$$U_{пр} = E_{2пр} \left(\frac{\epsilon_{r2}d_1 + \epsilon_{r1}d_2}{\epsilon_{r1}} \right) = 3 \frac{(1 \cdot 5 + 4 \cdot 0,2)}{4} = 4,35 \text{ кВ.}$$

Отсюда следует, что значение предельного напряжения уменьшилось в 23 раза, что, естественно, приведет к преждевременному пробоя изоляции.

7.5. Влияние увлажнения изоляции на процесс ее старения

В процессе эксплуатации во внутреннюю изоляцию электроустановок может попадать влага. Она может попадать из окружающего воздуха или образоваться в самой изоляции в результате термоокислительных процессов.

Появление влаги в изоляции (адсорбция влаги) приводит к резкому снижению сопротивления утечки, так как во влаге содержатся растворенные и диссоциированные примеси, т. е. свободные ионы. Уменьшение сопротивления утечки опасно тем, что приводит к росту диэлектрических потерь. Вследствие этого снижается напряжение теплового пробоя и, кроме того, происходит дополнительный нагрев изоляции, что влечет за собой ускорение темпов теплового старения. Например, если при влагосодержании 0,3 %, бумажная изоляция считается хорошо высушенной и имеет полный срок службы, то при влагосодержании 1,5 % старение начина-

ет ускоряться, а при влагосодержании более 3,3 % процессы старения и окисления становятся опасными для изоляции.

Вода — сильнополярный диэлектрик, ее относительная диэлектрическая проницаемость равна 80, т. е. во много раз больше, чем у диэлектрических материалов, используемых во внутренней изоляции. В связи с этим сильное увлажнение может влиять на диэлектрическую проницаемость увлажненных слоев. При неравномерном увлажнении это обстоятельство может привести к искажению электрического поля в изоляции и снижению пробивного напряжения.

Увлажнение в принципе — процесс обратимый, т. е. адсорбированная влага может быть удалена из изоляции путем сушки. Однако сушка требует затрат времени и энергии. Для периодического контроля состояния изоляции электрооборудования высокого напряжения в эксплуатации используются методы, позволяющие обнаружить опасную степень увлажнения изоляции.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электрическое старение изоляции?
2. Как влияют на старение изоляции частичные разряды?
3. Что такое тепловое старение изоляции?
4. Как формулируется правило Монтзингера?
5. Что такое механическое старение изоляции?
6. Как влияет увлажнение изоляции на ее свойства?

8. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

8.1. Общие сведения

Внутренняя изоляция (см. п. 7.1) имеет ряд особенностей по сравнению с наружной изоляцией [7, 8, 14].

После пробоя (перекрытия) внешней изоляции и отключения источника напряжения электрическая прочность изоляции восстанавливается до исходного уровня. Такую изоляцию называют *самовосстанавливающейся*. Пробой внутренней изоляции, как правило, представляет собой необратимое разрушение, и после него неизбежен дорогостоящий капитальный ремонт или замена изоляции, а иногда и всего аппарата. Внутренняя изоляция является *несамовосстанавливающейся*, поэтому она должна иметь большие запасы прочности, чем внешняя изоляция.

Электрическую прочность внешней изоляции можно определить без ее повреждения. Электрическую прочность внутренней изоляции можно определить только с некоторой вероятностью по ряду косвенных показателей.

Атмосферный воздух, являющийся частью внешней изоляции, не подвержен старению, он непрерывно обновляется естественным образом. Поэтому старение внешней изоляции может наблюдаться только на тех участках, где разряд развивается по поверхности твердых диэлектриков. Внутренняя изоляция в процессе эксплуатации неизбежно стареет.

К диэлектрикам, используемым для изготовления внутренней изоляции высоковольтного оборудования, предъявляется ряд жестких требований. Они должны обеспечивать высокую кратковременную и длительную электрическую прочность изоляционной конструкции. Кратковременная электрическая прочность — это величина пробивного напряжения при грозовых или коммутационных перенапряжениях. Длительная электрическая прочность — это напряжение, которое может быть приложено к изоляции в течение всего срока службы без ее повреждения. Длительная электрическая прочность внутренней изоляции зависит не только от прочности диэлектрического материала, но и от конструкции изоляции.

Изоляционные материалы для внутренней изоляции должны иметь малые диэлектрические потери, малую проводимость и обладать высокой термической стойкостью. Часто внутренняя изоляция выполняет еще и роль теплоотводящей среды, поэтому она должна обладать высокой теплопроводностью.

Внутренняя изоляция в процессе эксплуатации в большинстве случаев испытывает механические воздействия: статические, ударные, вибрационные. Поэтому твердые диэлектрики должны иметь достаточную механическую прочность. Диэлектрики, предназначенные для внутренней изоляции, не должны быть токсичными, горючими, взрывоопасными. Изготовление изоляции должно допускать применение современных прогрессивных технологий и иметь невысокую стоимость.

Как показывает опыт, во многих случаях ни один отдельно взятый диэлектрик не может удовлетворить в полной мере всему перечню предъявляемых требований, и наилучшее решение получается при использовании комбинации из нескольких диэлектриков, которые выполняют различные функции и дополняют друг друга. Например, высокопрочные жидкие диэлектрики, заполняя объем изоляции так, чтобы в нем не оставалось пустот и воздушных включений, придают изоляции однородность и тем самым обеспечивают высокую длительную электрическую прочность изоляции.

Понятие «внутренняя изоляция» объединяет различные по устройству и выполняемым функциям изоляционные конструкции. Однако закономерности протекающих в них физических процессов, от которых зависит поведение изоляции в эксплуатации, во многом являются общими. Поэтому для исследования и испытания внутренней изоляции различных высоковольтных устройств применяют одинаковые методы и измерительные средства. Рассмотрим конструкцию внутренней изоляции различных электротехнических установок.

8.2. Материалы для изоляторов

Изолятором, согласно ГОСТ 27744—88, называют электротехническое устройство, предназначенное для электрической изоляции и механического крепления электроустановок или их отдельных частей, находящихся под разными электрическими потенциа-

лами. Из определения следует, что диэлектрики, из которых изготавливаются изоляторы, должны обладать высокой прочностью, поскольку изоляторы несут значительную механическую нагрузку. Диэлектрики должны иметь и высокую электрическую прочность, позволяющую создавать экономичные и надежные конструкции изоляторов. Пробой тела диэлектрика выводит изолятор из строя, а разряд по поверхности при условии быстрого отключения напряжения не причиняет изолятору никаких повреждений. Поэтому пробивное напряжение твердого диэлектрика в изоляторе должно быть примерно в 1,5 раза выше, чем напряжение перекрытия по поверхности, которое и определяет электрическую прочность изолятора.

Диэлектрик должен быть негигроскопичен и не изменять своих свойств под действием метеорологических факторов. При увлажнении и загрязнении поверхности изоляторов, устанавливаемых на открытом воздухе, могут возникнуть частичные электрические дуги. Под их действием поверхность может обугливаться, и на ней появляются проводящие следы — *треки*, снижающие электрическую прочность изоляторов. Повреждение поверхности твердого диэлектрика вследствие поверхностного пробоя, вызывающего образование проводящих следов, называется *трекингом* диэлектрика. Поэтому диэлектрики для изоляторов, предназначенных для работы на открытом воздухе, должны иметь высокую *трекингоустойчивость* или *эрозионную стойкость*.

Всем указанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяет глазурованный электротехнический фарфор и стекло, а также некоторые полимеры. Электрическая прочность фарфора в однородном поле при толщине 1,5 мм составляет 30—40 кВ/мм и уменьшается при увеличении толщины. Электрическая прочность стекла при тех же условиях составляет 45 кВ/мм. Механическая прочность фарфора и стекла зависит от вида нагрузки. Например, предел прочности обожженного фарфора составляет: при сжатии — 450 МПа, при изгибе — 70 МПа, а при растяжении — 30 МПа. Таким образом, наиболее высокой механической прочностью обладают изоляторы, в которых фарфор работает *на сжатие*.

Стекло по механической прочности не уступает фарфору и также лучше работает на сжатие. Изоляторы из закаленного стекла

имеют ряд преимуществ перед фарфоровыми. Технологический процесс их изготовления полностью автоматизирован. Прозрачность стекла позволяет визуально обнаружить внутренние дефекты. Повреждение стекла приводит к разрушению диэлектрической части изолятора, которое легко обнаруживается при осмотре ЛЭП эксплуатационным персоналом. Стекло более технологичный материал по сравнению с фарфором. Поэтому стеклянным изоляторам можно придать более рациональную форму по сравнению с фарфоровыми изоляторами и получить меньшие габариты при сохранении требуемых электрических характеристик [12].

Еще большими преимуществами по сравнению с изоляторами из стекла и фарфора обладают *полимерные изоляторы*. Применение полимерных материалов в устройствах контактной сети электрифицированных железных дорог является одним из направлений технического прогресса на железнодорожном транспорте. Полимерные изоляторы имеют следующие преимущества: технологичность, малая масса, компактность, простота монтажа, высокая механическая прочность к ударным воздействиям, большая долговечность, надежность и экономичность. Незаменимыми оказываются полимерные изолирующие материалы при монтаже контактных подвесок в искусственных сооружениях с ограниченными габаритами.

Полимерная изоляция контактной сети в большинстве случаев изготавливается комбинированной: одни материалы, например стеклопластиковые стержни, воспринимают механические нагрузки, а другие, в виде защитной оболочки, обеспечивают электрическую прочность.

Стеклопластики состоят из стеклянной арматуры (нитей, лент или тканей) и полимерного связующего на основе полиэфирных, эпоксидных, кремнийорганических и других синтетических смол. Полимерные связующие в стеклопластиках выполняют роль клеящей среды, объединяющей стеклянные волокна в монолитное изделие. На электрифицированных железных дорогах в полимерных изоляторах и изолирующих элементах используются стеклопластиковые стержни диаметром 14—55 мм.

Материал защитной оболочки полимерных стержневых изоляторов должен обладать высокой трекингоэрозионной стой-

костью, дугостойкостью, устойчивостью к гидролизу, агрессивным средам и ультрафиолетовому облучению. Этим показателям удовлетворяет политэтрафторэтилен (фторопласт-4), кремнийорганические резины (эластомеры) и этиленпропиленовые материалы. В применяемых на электрифицированных железных дорогах полимерных изоляторах защитные оболочки в основном выполняются из кремнийорганической резины [27, 28].

Для надежной защиты стеклопластика от проникновения влаги оболочка не должна терять герметичность в течение всего срока службы изолятора. Защитная оболочка должна обладать хорошей адгезией к стержню. Для защиты стеклопластика от проникновения влаги и исключения частичных разрядов в пустотах, образующихся между составными частями изолятора при сборке, используют различные герметизирующие и клеящие материалы: эпоксидные компаунды, кремнийорганические пасты, вазелины, силиконовые компаунды холодного отверждения. Применение полимерных изоляторов на ЛЭП позволяет существенно уменьшить массу подвесных изоляторов и заменить гирлянду изоляторов одним.

Вероятность безотказной работы полимерных изоляторов должна быть не меньше значения, определяемого из выражения:

$$P(\tau) = 1 - 0,0003 \tau, \quad (8.1)$$

где τ — время с начала эксплуатации, годы; 0,0003 — коэффициент, характеризующий годовую повреждаемость.

Срок службы полимерных изоляторов контактной сети электрифицированных железных дорог должен быть не менее 25 лет.

Независимо от примененного материала изоляторы по своему назначению делятся на линейные и аппаратные.

8.3. Линейные изоляторы

Линейные изоляторы применяются для подвески проводов в ЛЭП, контактной сети и гибких шин в открытых распределительных устройствах. По конструктивному исполнению изоляторы для ЛЭП делятся на штыревые и подвесные. Подвесные изоляторы делятся на тарельчатые и стержневые. Изоляторы для контактной сети делятся по назначению на подвесные, натяжные, фиксаторные и консольные и изолирующие элементы [31].

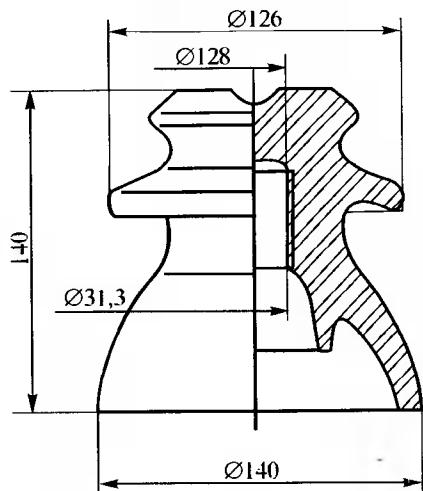


Рис. 8.1. Штыревой линейный изолятор типа ШФ-10Г

Изолятора с помощью вязки или специальных зажимов. Изолятор навертывается на металлический штырь или крюк, расположенный на опоре. Гнездо с резьбой для навертывания штыря или крюка углублено в тело изолятора настолько, что верхняя часть штыря или крюка оказывается на уровне шейки изолятора. Этим достигается уменьшение изгибающего момента, действующего на тело изолятора.

На рис. 8.2 приведена конструкция стеклянного тарельчатого изолятора типа ПС 120-Б. Изолятор предназначен для изоляции и крепления к поддерживающим конструкциям проводов контактной сети и ВЛ. Условное обозначение расшифровывается следующим образом: П — подвесной, С — стеклянный, 120 — класс изолятора (механическая разрушающая сила при растяжении, кН), Б — модификация изолятора. Длина пути утечки 320 мм.

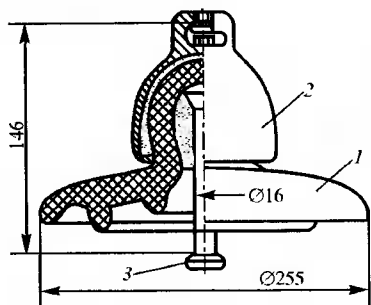


Рис. 8.2. Подвесной стеклянный тарельчатый изолятор типа ПС 120-Б

На рис. 8.1 показана конструкция штыревого линейного изолятора для изоляции и крепления к поддерживающим конструкциям проводов ВЛ напряжением до 10 кВ включительно. Условное обозначение расшифровывается следующим образом: Ш — штыревой, Ф — фарфоровый, 10 — класс изолятора (номинальное напряжение электроустановки, кВ), Г — конструктивное исполнение. Механическая разрушающая сила на изгиб 12,5 кН. Длина пути утечки 265 мм.

Провод крепится на верхней или боковой бороздке изо-

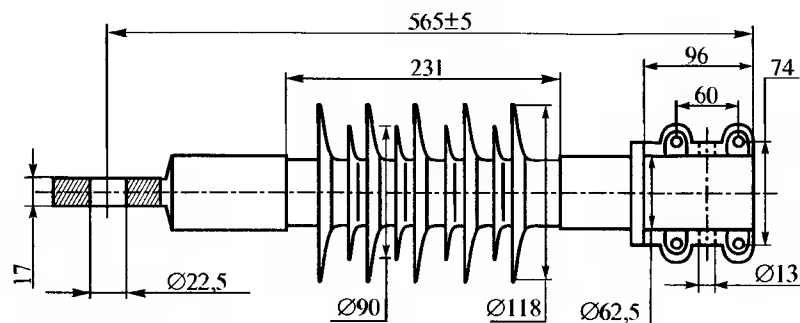


Рис. 8.3. Консольный стержневой изолятор типа КСК 120-6-3/0,6

Основу изолятора составляет стеклянное тело — тарелка 1, средняя часть которой, вытянутая вверх, называется головкой. На головке крепится шапка 2 из ковкого чугуна, а в гнездо, расположенное внутри головки, заделывается стальная стержень 3. Механическое соединение изоляционного тела с металлической арматурой выполняется при помощи портландцемента.

При последовательном соединении таких изоляторов можно получить гирлянду на любое номинальное напряжение. Соединение изоляторов в гирлянду осуществляется путем введения утолщенной головки стержня в специальное ушко на шапке другого изолятора и закрепления его замком. Применение на линиях разного класса напряжения гирлянд из изоляторов одного и того же типа значительно упрощает организацию их массового производства и эксплуатацию. Важное достоинство тарельчатых изоляторов состоит в том, что при повреждении изоляционного тела механическая прочность изолятора и, следовательно, всей гирлянды не нарушается, не происходит падения провода на землю.

На рис. 8.3 приведена конструкция полимерного консольного стержневого изолятора КСК 120-6-3/0,6. Обозначение расшифровывается следующим образом: К — консольный, С — стержневой, К — оболочка из кремнийорганической резины, 120 — класс изолятора (нормированная разрушающая сила при растяжении, кН), 6 — нормированная разрушающая сила при изгибе, кН, 3 — номинальное

напряжение контактной сети, кВ, 0,6 — длина пути утечки, м. Изолятор предназначен для изоляции подкосов и консолей контактной сети постоянного тока напряжением 3 кВ.

8.4. Аппаратные изоляторы

Аппаратные изоляторы предназначены для работы в электротехнических устройствах. Они делятся на опорные и проходные. Опорные изоляторы используются в качестве жесткой опоры и служат для крепления токоведущих шин в закрытых распределительных устройствах, а также для крепления отдельных частей аппаратов.

На рис. 8.4 показан опорный фарфоровый изолятор типа ОФ на напряжение 6 кВ для работы внутри помещения, а на рис. 8.5 — опорный штыревой изолятор типа ОНШ на напряжение 10 кВ. Обозначение расшифровывается так: О — опорный, Н — нормального исполнения, Ш — штыревой. Материал в опорном изоляторе работает на изгиб. Минимальная разрушающая нагрузка на изгиб изолятора ОНШ, показанного на рис. 8.5, составляет 5 кН.

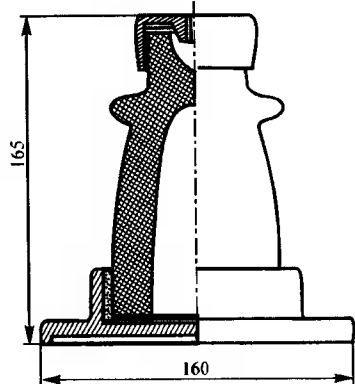


Рис. 8.4. Опорный изолятор типа ОФ для работы в помещении на напряжение 6 кВ

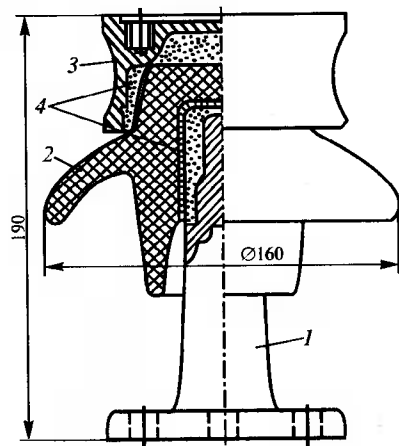


Рис. 8.5. Опорный штыревой изолятор типа ОНШ на напряжение 10 кВ: 1 — штырь; 2 — фарфор; 3 — шапка; 4 — цемент

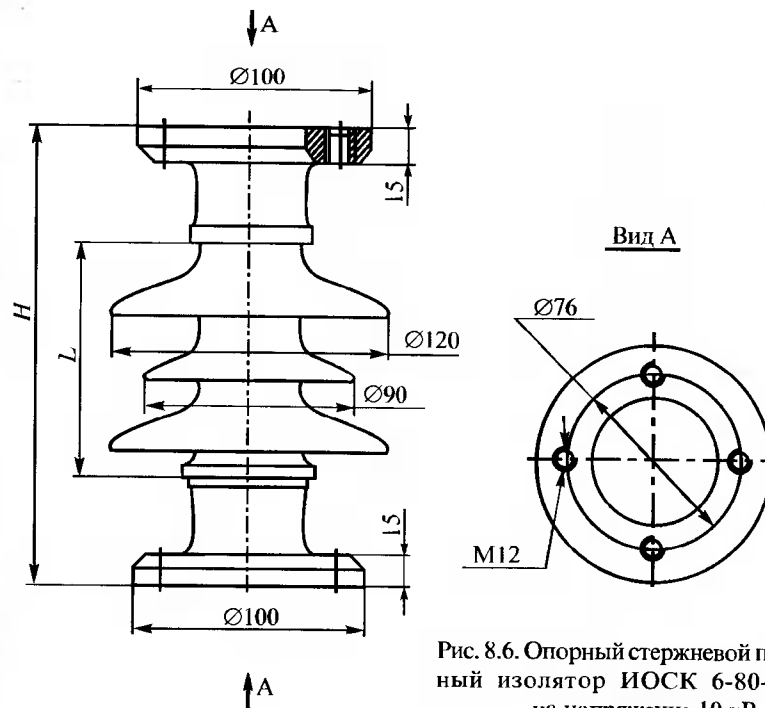


Рис. 8.6. Опорный стержневой полимерный изолятор ИОСК 6-80-1 УХЛ на напряжение 10 кВ

На рис. 8.6 показана конструкция опорного стержневого полимерного изолятора ИОСК 6-80-1 УХЛ на напряжение 10 кВ. Наибольшее рабочее напряжение 12 кВ. Минимальная механическая разрушающая сила на изгиб не менее 6 кН. Испытательное напряжение грозовых импульсов не менее 80 кВ. Длина пути утечки 22 мм. Одноминутное испытательное напряжение частоты 50 Гц в сухом состоянии и под дождем не менее 42 и 28 кВ. 50 %-ное разрядное напряжение промышленной частоты в загрязненном и увлажненном состоянии 12 кВ при удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения 10 мкСм.

Опорные стержневые изоляторы для работы на открытом воздухе отличаются от таких же изоляторов для работы в помещении большим количеством ребер. Ребра служат для увеличения длины пути утечки с целью повышения разрядных напряжений изоляторов под дождем.

Проходные изоляторы применяются для изоляции токоведущих частей при прохождении их через стены, потолки и корпуса

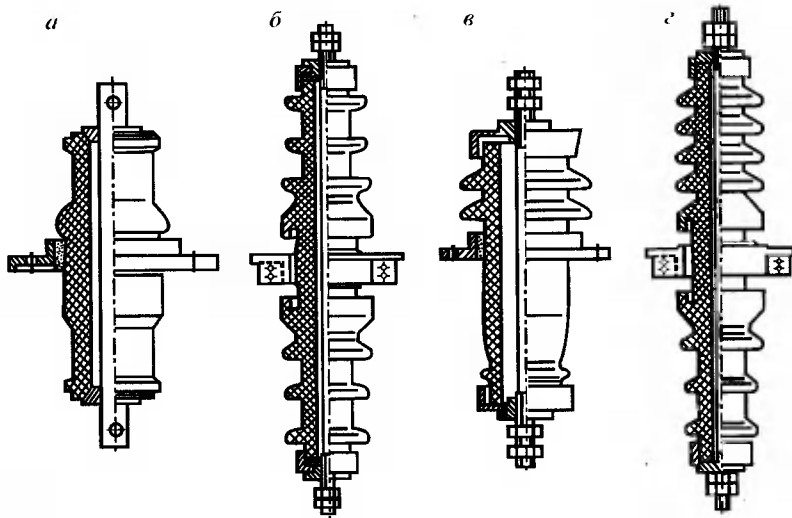


Рис. 8.7. Проходные изоляторы: *a* и *б* — для работы в помещении; *в* и *г* — для работы на открытом воздухе; *a* и *в* — на 6 кВ; *б* и *г* — на 35 кВ

распределительных устройств, выключателей, трансформаторов и иных электрических аппаратов, имеющих другой электрический потенциал по отношению к токоведущим частям.

Типичные конструкции проходных изоляторов на напряжения 6 и 35 кВ для работы в помещениях и на открытом воздухе показаны на рис. 8.7. Они состоят из изоляционного фарфорового тела, токоведущего стержня и фланца, с помощью которого изолятор укрепляется на стене, перекрытии или ограждении. Проходные изоляторы, так же как изоляторы других типов, конструируют так, чтобы пробивное напряжение их внутренней изоляции превышало разрядное напряжение по поверхности. Проходные изоляторы на напряжение более 35 кВ имеют более сложную конструкцию и называются вводами.

8.5. Изоляция конденсаторов

Название «конденсатор» было введено в конце XVIII в., когда существовало представление об «электрических жидкостях» и конденсатор рассматривался как прибор для сгущения, конденса-

рования этих жидкостей. Конденсатор представляет собой систему из двух или более проводников (обкладок), разделенных диэлектриком (см. рис. 2.1). Основное назначение конденсатора — накапливать электрический заряд и энергию.

Первые специально созданные электрические конденсаторы, которые применяли в России М.В. Ломоносов и Г. Рихман, представляли собой стеклянные банки, наполненные водой или дробью и оклеенные снаружи фольгой. Впервые понятие диэлектрической проницаемости диэлектрика в конденсаторах ввел Фарадей, в честь которого и названа единица емкости Фарада. В настоящее время в России производятся все виды современных электрических конденсаторов — от единиц до долей пикофарад.

Важнейшая характеристика конденсатора — удельная энергия, равная отношению запасенной в конденсаторе электрической энергии к объему активного диэлектрика:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{CU^2}{Sd} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r SU^2}{Sd} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{2}, \quad (8.2)$$

где S — площадь пластин конденсатора, d — толщина диэлектрика.

Как следует из формулы (8.2), для увеличения удельной энергии следует выбирать материал с высокой диэлектрической проницаемостью и высокой электрической прочностью.

Из формулы (8.2) можно выразить энергию конденсатора:

$$W = wV = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{2} Sd \cong l^3, \quad (8.3)$$

где l — линейные размеры конденсатора.

Как видно из формулы (8.3), энергия конденсатора, а следовательно, и потери растут пропорционально кубу линейных размеров. Поверхность охлаждения конденсатора растет пропорционально квадрату линейных размеров. Следовательно, с ростом мощности конденсатора ухудшаются условия его охлаждения. Чтобы не вызвать перегрева диэлектрика, необходимо использовать материал с малыми диэлектрическими потерями, т. е. с малым значением $\text{tg}\delta$. Рассмотрим с учетом сказанного, как выполняется изоляция в различных видах конденсаторов.

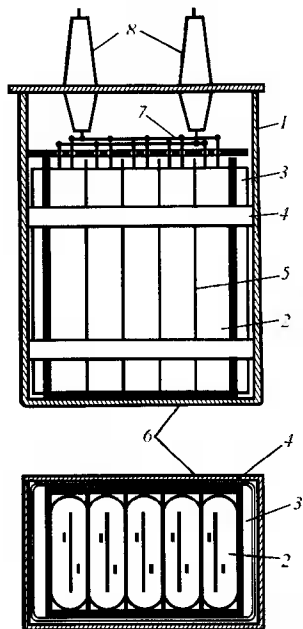


Рис. 8.8. Схематическое устройство силового конденсатора для повышения коэффициента мощности

Силовые конденсаторы используются в установках переменного тока для повышения коэффициента мощности («косинусные конденсаторы»), для продольной компенсации в ЛЭП, в качестве конденсаторов связи и других целей. В установках постоянного тока они работают в схемах с инверторами. Устройство силового конденсатора для повышения коэффициента мощности схематически показано на рис. 8.8.

В герметизированном корпусе 1 расположены плоскопрессованные рулонные секции 2, стянутые пакетом между металлическими щеками 3 с помощью хомутов 4. Между секциями установлены изолирующие прокладки 5 из электрокартона. Изоляция 6 от корпуса выполнена из электрокартона или кабельной бумаги. Секция представляет собой спирально намотанный рулон из лент диэлектрика и алюминиевой фольги (рис. 8.9), выполняющей роль электродов. В рулонных секциях обе поверхности электродов являются активными, вследствие чего сокращается расход металла на электроды. Отдельные секции (см. рис. 8.8) соединяются перемычками 7 в параллельную, последовательную или смешанную схему в зависимости от рабочего напряжения и требуемой емкости. Конденсатор имеет два вывода 8.

В силовых конденсаторах используется бумажно-масляная изоляция. Чаще всего изоляцию секций выполняют из 6—8 слоев конденсаторной бумаги типа КОН толщиной 10—15 мкм ($\text{tg}\delta = 0,003$). Внутренний объем конденсатора заполнен пропитывающим составом. В качестве пропитки используют минеральные масла ($\epsilon_r = 2,1—2,2$) и синтетические полярные жидкости на основе хлордифенила (ХД) ($\epsilon_r = 4,8—5,5$). Конденсаторное масло отличается от трансформаторного более тщательной очисткой. У конденсаторной бумажной

изоляции до 30 % объема занимают поры между волокнами и узкие щели между слоями бумаги. Поэтому относительная диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости сильно влияет на емкость конденсатора. При пропитке хлорированными жидкостями емкость конденсатора в два раза превосходит емкость при пропитке минеральным маслом. Рабочие напряжения в конденсаторах промышленной частоты составляют 12—14 кВ/мм при пропитке минеральными маслами и 15—20 кВ/мм при пропитке хлорированными жидкостями.

Недостатком синтетических жидкостей ХД является их большая чувствительность к загрязнениям. Кроме того, они токсичны и экологически опасны, так как отсутствует их биологическая деградация. Это делает необходимым централизованное уничтожение пробитых конденсаторов по специальной технологии.

Хорошие результаты дает применение комбинированной изоляции, в которой слои бумаги чередуются со слоями неполярной синтетической полимерной пленки. Такой пленкой может быть, например, полипропилен ($\epsilon_r = 2,2—2,3$, $E_{\text{пр}} = 180$ кВ/мм, $\text{tg}\delta = 0,0004$, $\rho = 10^{15}—10^{16}$ Ом·м). Для импульсных конденсаторов применяется полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка, а в качестве пропитки — касторовое масло. В комбинированной изоляции бумага между слоями пленки обеспечивает хорошую пропитку между слоями пленки и отсутствие газовых включений в изоляции.

В последнее время большинство производителей силовых конденсаторов отказываются от использования бумажного и бумажно-пленочного диэлектрика, переходя к чисто пленочному с экологически безопасными пропитывающими жидкостями. Например, крупнейший отечественный производитель всех типов силовых конденсаторов, Серпуховский конденсаторный завод «КВАР», внедряя указанную технологию, разработал и освоил выпуск конденсаторов для комплектации силовых фильтров высших гармо-

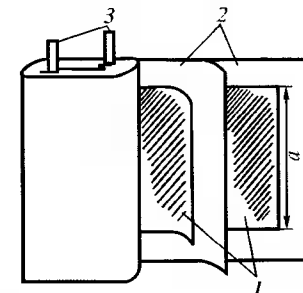


Рис. 8.9. Плоскопрессованная рулонная секция: 1 — электроды из фольги; 2 — слои бумаги; 3 — выводы

ник мощностью 300 квар с удельной реактивной мощностью 8,1 квар/дм³, что в 1,5—2 раза превышает этот показатель серийно выпускаемой продукции.

Керамические конденсаторы составляют более половины всех выпускаемых конденсаторов. Диэлектриком в них является керамика с высокой ϵ_r , что позволяет выполнять конденсаторы с меньшими габаритами и весом. Большая часть керамических материалов с высокой ϵ_r имеет в качестве основной составной части диоксид титана TiO₂. Одна из его модификаций — *рутил* имеет в направлении главной кристаллографической оси $\epsilon_r = 173$. Низкочастотная керамика имеет $\epsilon_r = 150—200$. Имеется полупроводниковая керамика с $\epsilon_r = 500$. Таким образом, керамические материалы по сравнению с полимерными пленками дают огромный выигрыш по значению ϵ_r . Низковольтные и высоковольтные керамические конденсаторы применяются в высокочастотной технике: в измерительных схемах и радиоаппаратуре.

Оксидные конденсаторы используют в качестве диэлектрика тонкую оксидную пленку на поверхности металлов: алюминия, тантала, ниобия. В электролитических конденсаторах сам металл используется как анод, а электролит (корпус) используется в качестве катода.

В *диффузионных конденсаторах* в качестве диэлектрика служит запирающий слой на границе *p-n*-перехода в полупроводнике. В конденсаторах на МДП-структурах (*металл-диэлектрик-полупроводник*) в качестве диэлектрика используется слой диоксида кремния, выращенный на поверхности кремниевой пластины. Обкладками служат кремний с одной стороны и тонкая пленка — с другой.

Для изготовления измерительных конденсаторов применяется так называемая *образцовая конденсаторная слюда* марки СО, которая представляет собой мусковит высшего качества и изготавливается в виде пластинок прямоугольной формы. В высокочастотной технике слюдяные конденсаторы применяются в колебательных контурах радиоаппаратуры.

8.6. Изоляция силовых кабелей

Электрическим кабелем (от голланд. *kabel* — канат, трос) называют систему гибких изолированных проводников, имеющих кроме собственной изоляции общую изоляцию и защитную обо-

лочку, предохраняющую изоляцию от внешних механических и других воздействий. Впервые электрические провода с гуттаперчевой изоляцией для взрыва морских мин предложил в 1812 г. русский ученый и изобретатель П.Л. Шиллинг. В 1841 г. в России выдающийся физик и электротехник Б.С. Якоби впервые в мире построил подземную линию электрического телеграфа, для которой он разработал конструкцию кабелей и наладил их производство. Современный электрический кабель — это сложное техническое изделие, в котором используются многие достижения науки и техники. Сейчас потребление кабельных материалов в мире составляет 15 млн т в год, из них: в США — 22 %, в Китае — 12%, в Японии — 8 %, в остальной Азии — 20 %, в бывшем СССР — 5%, в остальных странах — 33 %. Рассмотрим устройство кабелей с различными видами изоляции.

На рис. 8.10 показан разрез трехжильного силового кабеля с секторными жилами и бумажной изоляцией с *вязкой пропиткой*. Секторная форма жил позволяет уменьшить наружный диаметр кабеля. Жилы кабеля выполняются из меди или алюминия. Изоляция состоит из двух частей — фазной и поясной. Между жилами кабеля находится двойная фазная изоляция, рассчитанная на линейное напряжение, а между каждой жилой и оболочкой — фазная и поясная. Зазоры между отдельными изолированными жилами заполняются низкокачественной изоляцией (бумажными жгутами). Наибольшее действующее значение рабочей напряженности в кабелях до 10 кВ не превышает значения 2 кВ/мм.

Чтобы кабель был гибким, его жилы выполняются из большого числа скрученных тонких проводов. Изоляция кабеля должна быть механически прочной и иметь высокую электрическую проч-

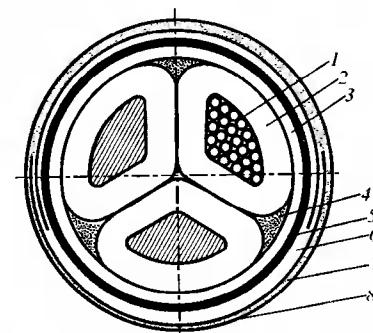


Рис. 8.10. Трехжильный кабель с секторными жилами:

1 — жила; 2 — фазная изоляция; 3 — поясная изоляция; 4 — наполнитель; 5 — оболочка; 6 — подушка под броней из пряжи, пропитанной битумом; 7 — броня из стальных лент; 8 — наружный защитный покров

ность. Последнее особенно важно, так как при уменьшении толщины изоляции повышается гибкость кабеля, уменьшаются его вес и стоимость, улучшается теплоотвод и повышается рабочий ток кабеля. Кроме того, высокое значение электрической прочности повышает надежность работы кабеля, а следовательно, снижает эксплуатационные расходы, так как на поиск места повреждения кабеля и его устранение затрачивается много времени и средств. В настоящее время срок эксплуатации кабеля должен составлять не менее 25—40 лет. Следует отметить, что фактически кабели служат более длительное время. Например, в Санкт-Петербурге некоторые кабели с бумажно-масляной изоляцией на напряжение 10 кВ эксплуатируются более 75 лет.

В настоящее время в силовых кабелях высокого напряжения используется бумажно-масляная изоляция. Кабельная бумага отличается от конденсаторной бумаги большей толщиной (80—170 мкм) и повышенными механическими характеристиками для большей плотности изоляции при ее намотке. Тангенс угла диэлектрических потерь для непропитанной кабельной бумаги примерно такой же, как для непропитанной конденсаторной бумаги, и составляет примерно $\operatorname{tg}\delta = 0,002$.

В качестве вязкой пропитки ленточной бумажной изоляции применяются масляно-канифольные или синтетические не стекающие составы повышенной вязкости. Добавление канифоли в нефтяные масла приводит к существенному увеличению вязкости пропитывающего состава. Недостатком таких кабелей является то, что при работе с циклической нагрузкой, вызывающей нагревание и остывание кабеля, в изоляции образуются пустоты, которые снижают электрическую прочность изоляции.

Металлическая оболочка выполняется обычно из свинца или алюминия. Поверх оболочки накладываются защитные покрытия, включающие броню из стальных проволок или лент и слои кабельной пряжи из джутового волокна, пропитанного битумными составами с *антисептиками*.

Описанные кабели применяются до напряжения 35 кВ включительно при промышленной частоте и до напряжения 220 кВ — при постоянном напряжении.

Для напряжений 110—220 кВ и даже до напряжений 500 кВ промышленной частоты используются *маслонаполненные кабели*,

которые, как правило, выполняются одножильными. В таких кабелях ленточная бумажная изоляция пропитывается маловязким маслом, которое может перемещаться внутри жилы кабеля и находиться под избыточным давлением. Вследствие этого исключается появление в изоляции газовых включений при изменениях температуры, и за счет этого длительная электрическая прочность повышается более чем в 3 раза по сравнению с прочностью изоляции, пропитанной вязкими составами.

Для поддержания неизменного давления масла в кабеле на трассе через каждые 1—2,5 км устанавливают баки давления, которые присоединяются к кабелю через специальные муфты. Чем больше давление масла, тем выше электрическая прочность кабеля, однако при этом усложняется упрочняющий покров кабеля. Поэтому *маслонаполненные кабели высокого давления* (около 1,5 МПа) выполняются в стальных трубах. Такие кабели выпускаются на напряжение до 500 кВ. Устройство маслонаполненного кабеля высокого давления показано на рис. 8.11. В стальном трубопроводе, заполненном маловязким маслом, помещаются три круглые жилы с изоляцией, которая пропитана вязким составом. Изоляция покрывается эластичным, герметически плотным слоем, который предотвращает контакт изоляции с маслом в трубе, а также увлажнение изоляции при транспортировке и монтаже. Эластичное покрытие свободно передает изоляции давление масла, заполняющего стальную трубу.

Преимущество кабелей в трубе состоит в том, что упрощается конструкция оболочки, воспринимающей давление масла. Однако увеличивается объем работ при прокладке кабельной линии за счет сварки стальных труб и наложения антикоррозионных покрытий. Кроме того, значительно возрастает объем масла, что усложняет систему поддержания избыточного давления. При эксплуатации маслонаполненных кабелей возникают проблемы контроля за состоянием изоляционно-

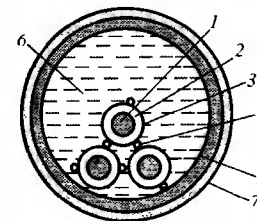


Рис. 8.11. Маслонаполненный кабель высокого давления в стальной трубе:

1 — жила; 2 — изоляция; 3 — герметизирующие покрытия; 4 — полукруглая проволока; 5 — стальная труба; 6 — масло; 7 — антикоррозионное покрытие

го масла и защиты кабельной линии от коррозии. Разгерметизация маслonaполненных кабелей высокого давления сопровождается большими объемами вытекаемого кабельного масла, увлажнением изоляции кабеля и, как следствие, значительным объемом восстановительных работ. Поэтому при напряжениях до 220 кВ применяют *газонаполненные кабели*, в которых вместо масла используют сухой очищенный азот при повышенном давлении.

Эти кабели имеют устройство примерно такое же, как и маслonaполненные, но в них используется изоляция с обедненной пропиткой. Преимущество таких кабелей состоит в том, что получается более простая система обеспечения повышенных давлений за счет использования баллонов со сжатым газом. Газонаполненные кабели могут укладываться на трассах с большим уклоном. Но вместе с тем в таких кабелях условия охлаждения хуже, поэтому рабочие токи меньше.

Применяются также кабели с *элегазовой изоляцией под давлением*. Они устроены следующим образом. В стальной трубе на распорках из твердого диэлектрика закреплена токоведущая жила (или три жилы). Линия собирается из таких труб и заполняется элегазом (шестифтористой серой FS_6) под давлением. Элегаз негорюч, обладает хорошей теплопроводностью и хорошей дугогасительной способностью. Особенно эффективны такие кабели при сверхвы-

соких напряжениях, где они могут оказаться экономически более выгодными, чем воздушные линии электропередачи.

В последнее время кабели с бумажно-масляной изоляцией и маслonaполненные кабели заменяются на кабели с полиэтиленовой изоляцией. В конструкции таких кабелей вблизи центральной жилы, в области максимальных напряженностей электрического поля, предусмотрено расположение слоев с повышенными значениями электрической проводимости и диэлектрической проницаемости (рис. 8.12). В этих слоях, соединенных последовательно с основной изоляцией, уменьшаются величины напряженностей поля по сравнению с тем случаем, когда у жилы располагается полиэтилен, из которого изготовлена основная изоляция. При этом возрастает надежность всей конструкции, более равномерно нагружаются электрическим полем все участки изоляции. Для производства таких кабелей были созданы специальные машины-экструдеры, которые обеспечивают одновременное нанесение на центральную жилу всех трех слоев системы изоляции. При этом исключаются воздушные включения и примеси. Преимущество кабелей с полиэтиленовой изоляцией по сравнению с кабелями с вязкой пропиткой состоит в том, что они имеют меньшую массу [9].

Динамика выпуска кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) и полиэтиленовой изоляцией (ПИ) на предприятиях СНГ такова.

Кабели на напряжение от 6 до 1 кВ: в 1997 г. с БПИ 25 %, с ПИ 75 %, 2002 г. с БПИ 0 %, с ПИ 100 %.

Кабели на напряжение 6–35 кВ: в 1997 г. с БПИ 99,7 %, с ПИ 0,3 %, планируется к 2005 г. с БПИ 70 %, с ПИ 30 %.

Перспективным направлением кабельной промышленности является производство кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение до 500 кВ.

Отходы кабелей (в том числе вышедших из строя) составляют 5 млн т в год. Поэтому остро стоит проблема охраны окружающей среды от этих отходов, их переработки и повторного использования. В Японии в 1990-х годах, например, повторно использовали следующие материалы: медь и алюминий — 100 %, полихлорвинил — 31 %, полиэтилен — 17 %, сшитый полиэтилен — 50 %. В мире разработаны способы переработки отходов пластмассы с помощью дробления и плавления с получением порошкообразного или нефтяного топлива: 1 кг отходов дает 0,6–0,7 кг топлива.

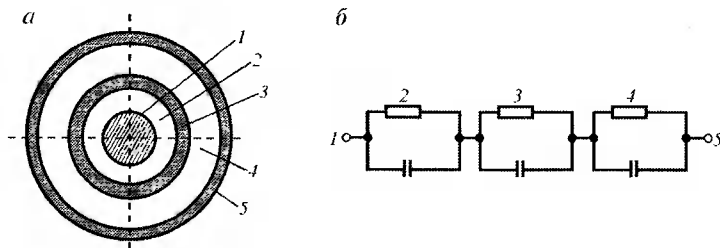


Рис. 8.12. Схема устройства силового коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией (а) и эквивалентная схема соединения элементов его изоляции (б):

1 — центральная жила; 2 — полупроводящий полиэтилен; 3 — полиэтилен с добавкой TiO_2 с повышенной ϵ и γ ; 4 — изоляционный полиэтилен; 5 — наружный экран

8.7. Изоляция силовых трансформаторов

В силовых трансформаторах изоляция состоит из нескольких различных по конструкции элементов, работающих в неодинаковых условиях и имеющих разные характеристики. Воздушные промежутки между вводами по их поверхностям на землю составляют *внешнюю изоляцию*, а все изоляционные участки внутри бака — *внутреннюю изоляцию* трансформатора. В свою очередь внутренняя изоляция подразделяется на *главную* и *продольную*. К главной изоляции относится изоляция обмоток относительно земли и между разными обмотками. К продольной изоляции относится изоляция между разными точками одной и той же обмотки: между витками, слоями, катушками.

Основные габариты главной и продольной изоляции определяются величинами импульсных перенапряжений — грозовых и коммутационных. Наибольшее импульсное напряжение на главной изоляции может превосходить воздействующее напряжение на 20 % при заземленной нейтрали и на 80 % при изолированной нейтрали. Если импульс перенапряжения имеет крутой фронт, то на продольной изоляции могут возникать напряжения, более чем в 10 раз превышающие напряжения нормального режима. Наибольшие напряжения на продольной изоляции возникают при срезах, т. е. при пробое какого-либо промежутка, расположенного поблизости от трансформатора. На конструкцию изоляции трансформаторов оказывает сильное влияние то обстоятельство, что в активных частях трансформатора, в обмотках и магнитопроводе, при работе выделяется значительное количество тепла. Это заставляет выполнять изоляцию так, чтобы можно было непрерывно охлаждать активные части.

В современных силовых трансформаторах в качестве главной изоляции используется преимущественно маслобарьерная изоляция. Барьеры изготавливаются из электрокартона и располагаются перпендикулярно силовым линиям электрического поля. В трансформаторах электрическое поле имеет сложную конфигурацию, поэтому приходится применять комбинацию барьеров разной формы. В основном применяют три типа барьеров (рис. 8.13): цилиндрический барьер 1, плоскую шайбу 2 и угловую шайбу 3. Количе-

ство барьеров зависит от номинального напряжения. В ряде случаев цилиндрический барьер выполняется из бакелита.

В качестве жидкого диэлектрика используется нефтяное трансформаторное масло. Масло в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, повышает электрическую прочность изоляции и, во-вторых, улучшает условия охлаждения. Масло отводит теплоту потерь от обмоток и магнитопровода трансформатора в 25—30 раз интенсивнее, чем воздух (при свободной конвекции).

Продольная изоляция выполняется бумажно-масляной. Продольная изоляция обмоток силовых высоковольтных трансформаторов состоит из двух основных элементов (рис. 8.14): *витковой изоляции* (изоляции между проводниками двух соседних витков одной катушки) и *катушечной изоляции* (изоляции между проводниками двух соседних катушек, разделенных масляным каналом). Витковая изоляция представляет собой бумажно-масляную изоляцию, в которой слои кабельной бумаги накладываются на провод обмотки вплотную. Изоляция между катушками состоит из масляного канала шириной от 8 до 30 мм и бумажной изоляции провода, которая усиливается в случае необходимости дополнительной подмоткой бумаги, охватывающей все витки катушки.

Рис. 8.14. Продольная изоляция силового трансформатора:
1 — провод обмотки; 2 — витковая изоляция; 3 — катушечная изоляция; 4 — межкатушечная изоляция — масло

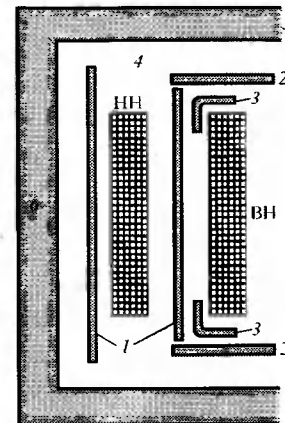
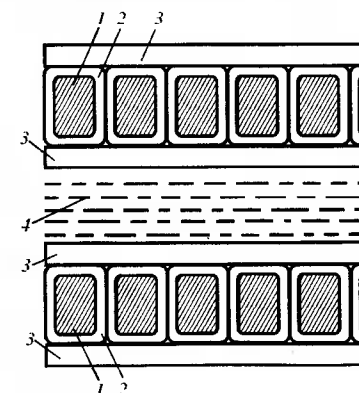


Рис. 8.13. Схема главной изоляции обмоток силового трансформатора:
1 — цилиндрический барьер; 2 — плоская шайба; 3 — угловая шайба; 4 — масло; 5 — ярмо; 6 — стержень



Для длительной и надежной работы трансформаторов Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей (ПТЭС) требуют соблюдения установленного температурного режима трансформаторов и периодического контроля состояния изоляции. Несоблюдение теплового режима при эксплуатации трансформатора ведет к быстрому износу его изоляции. Кроме того, периодически в процессе эксплуатации берутся пробы масла, измеряются значения $\text{tg}\delta$ и C_2/C_{50} .

При работе в трансформаторе масло постепенно стареет. При старении увеличивается вязкость масла и ухудшаются его электроизоляционные свойства. Скорость старения возрастает при повышенной температуре, при доступе воздуха и особенно при соприкосновении с озоном. *Регенерация* начавшего стареть масла, т. е. удаление из него продуктов старения и восстановление исходных свойств, достигается обработкой масла адсорбентами. Для непрерывного процесса регенерации масла в работающем трансформаторе, он снабжается термосифонным фильтром с адсорбентом. Рекомендуется добавление к трансформаторному маслу ингибиторов (антиокислительных присадок), которые замедляют старение масла. Применение правильно выбранных ингибиторов позволяет увеличить срок эксплуатации масла и дает большой экономический эффект.

8.8. Изоляция масляных, вакуумных и воздушных выключателей

Внутренняя изоляция масляных выключателей (МВ) выполняется с большим запасом электрической прочности, потому что масло является средой, в которой гасится электрическая дуга, и изоляцией между разомкнутыми контактами одного полюса. Гашение дуги в МВ осуществляется за счет ее эффективного охлаждения в газообразной среде (газопаровой смеси), образующейся в процессе испарения и разложения масла под воздействием высокой температуры дуги. В процессе эксплуатации, особенно когда гасится затяжная дуга, масло сильно загрязняется углеродистыми частицами, которые снижают электрическую прочность масла. Снижение электрической прочности изоляции масляных выключа-

телей может также происходить из-за влаги, поглощенной из атмосферы. Влага частично поглощается изоляционными деталями, а частично выпадает на дно выключателя, так как вода тяжелее масла. В холодное время года вода на дне замерзает. При оттепелях лед отделяется от днища бака и, поскольку он оказывается легче масла, всплывает на поверхность масла и образует проводящую «дорожку» от токоведущих деталей к баку выключателя. Для предотвращения всплытия кусочков льда в масляном выключателе устанавливают специальные перегородки.

При низкой температуре масло становится вязким, скорость расхождения контактов выключателя уменьшается, и условия гашения дуги затрудняются. При большой вязкости масла в момент выключения может произойти взрыв масляного выключателя. Чтобы избежать таких аварийных ситуаций, у выключателей на 110 кВ при понижении температуры окружающего воздуха до $-20\text{ }^\circ\text{C}$ включается устройство подогрева масла. В масляные выключатели, устанавливаемые на открытых подстанциях в районах с суровой зимой, заливают специальное «арктическое» масло марки АТМ-65 с температурой застывания $-70\text{ }^\circ\text{C}$. Периодически масло испытывается на пробу, чем определяется его увлажнение и наличие в масле углеродистых частиц.

Существуют выключатели, в которых жидкой дугогасящей средой служат негорючие фторорганические синтетические жидкости. Пары фторорганических жидкостей имеют высокую электрическую прочность и малую вязкость. В некоторых коммутирующих аппаратах применяется жидкий элегаз — шестифтористая сера SF_6 (гексафторид серы).

В вакуумных выключателях гашение дуги происходит в глубоком вакууме (10^{-2} — 10^{-5} Па). Вакуум обладает весьма высокой электрической прочностью. При длине промежутка 10 мм разрядное напряжение превышает 200 кВ, поэтому ход подвижных контактов обычно очень мал. Например, у вакуумных выключателей на 10 кВ он составляет 8—12 мм. Вследствие этого значительно уменьшаются габариты выключателя.

В воздушных выключателях гашение дуги осуществляется сжатым воздухом при давлении 6—8 МПа. В элегазовых выключателях гашение дуги происходит за счет дутья элегаза, электричес-

кая прочность которого в 2,5 раза больше, чем у воздуха. Элегаз выбрасывается не в атмосферу, как у воздушных выключателей, а в замкнутый объем, заполненный элегазом при относительно небольшом давлении.

8.9. Изоляция вращающихся электрических машин

Стоимость изоляции в электрических машинах составляет 50—80 % стоимости всех других ее материалов. Поэтому к изоляции вращающихся машин предъявляются очень высокие требования в отношении надежности и сроков службы. Активные материалы, т. е. медь обмотки и сталь статора или якоря, работают в электрических машинах при больших удельных нагрузках (плотностях токов и индукциях). Соответственно потери мощности в единице объема этих материалов получают высокими, и для эффективного отвода выделяющегося тепла требуются большие перепады температур активных частей над температурой охлаждающей среды. Поскольку тепло от меди отводится через изоляцию, она должна обладать высокой теплопроводностью и выдерживать высокую температуру. В связи со сказанным во вращающихся машинах используют изоляцию классов В (130 °С), F (155 °С) и H (180 °С).

В электрических машинах изоляция работает в условиях постоянной вибрации, особенно сильной на лобовых частях обмотки. Кроме того, она периодически подвергается ударным механическим воздействиям, возникающим при прохождении по обмотке больших токов при пуске и торможениях машин, а также при набросе и сбросе нагрузки. Неравномерный нагрев отдельных частей обмотки в переходных режимах также приводит к деформации изоляции. Наиболее опасные механические напряжения возникают на участках выхода обмотки из пазов. Основное требование к изоляции электрических машин — в пределах требуемого ресурса противостоять указанному выше комплексу эксплуатационных воздействий.

В современных машинах, как правило, используются двухслойные обмотки, когда в одном пазу располагаются катушки двух разных секций (рис. 8.15). Изоляция обмоток электрических машин

подразделяется на *главную* (корпусную) и *продольную* (междувитковую и междукатушечную). Главной называется изоляция между проводниками обмотки и корпусом. Она имеет разную конструкцию на пазовых и лобовых частях. К продольной относится изоляция между витками одной катушки, т. е. междувитковая, а также изоляция между уложенными в одном пазу катушками. Следует заметить, что продольная изоляция является частью корпусной изоляции. Междувитковой изоляцией обычно служит собственная изоляция обмоточных проводов.

Главная изоляция в связи с очень жесткими требованиями к электрической и механической прочности и нагревостойкости выполняется только на основе слюдяных изоляционных материалов. В них основным диэлектрическим барьером служат слюдинитовые ленты, изготовленные из слюды двух разновидностей: мусковит и флогопит (табл. 8.1).

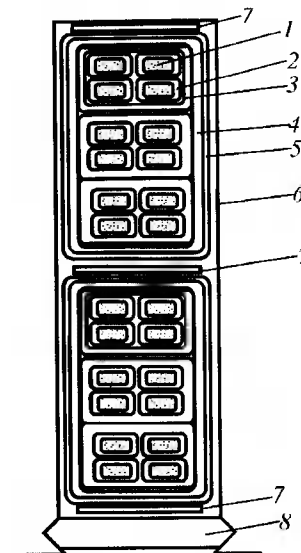


Рис. 8.15. Разрез пазовой части обмотки вращающейся машины: 1 — элементарный проводник; 2 — изоляция проводника; 3 — витковая изоляция; 4 — изоляция катушки (корпусная изоляция); 5 — полупроводящее покрытие; 6 — паз; 7 — прокладки из миканита; 8 — клин

Таблица 8.1

Электрические свойства слюды

Виды слюды	ρ , Ом·м	ϵ_r	tg δ при частоте 50 Гц
Мусковит	10^{12} — 10^{16}	6—8	0,015
Флогопит	10^{11} — 10^{12}	5—7	0,05

Слюда относится к высшему классу нагревостойкости С (допустимая температура более 180 °С). Для изоляции электрических машин слюду используют в виде клееных слюдяных изделий — миканитов, микалент или лент из слюдинитовой бумаги. Миканиты — листовые или рулонные материалы, склеенные из отдельных

лепестков слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы, иногда с применением волокнистой подложки из бумаги или ткани, которые наклеиваются с одной стороны или с обеих сторон. Подложка увеличивает прочность материала на разрыв и затрудняет отставание лепестков слюды при изгибе материала.

Вследствие большого содержания слюды миканиты обладают сравнительно высокой нагревостойкостью и относятся к классу В (130 °С) даже при употреблении обычных клеящих веществ и органических подложек. При использовании специальных клеящих веществ и неорганических подложек получают материалы классов F (155 °С) и H (180 °С), а нагревостойкие (без содержания органических веществ) миканиты, как и чистая слюда, относятся к классу нагревостойкости С. Для пазовой изоляции применяются гибкие миканиты. Разновидностью гибкого миканита является микалента. В настоящее время из слюдяных отходов изготавливают слюдяные бумаги — слюдиниты и слюдопласты, которые во многих случаях заменяют микаленты.

Микалента или слюдинитовая лента наматывается с перекрытием в несколько слоев на токоведущие части обмотки машины, пропитывается под вакуумом связующим составом и опрессовывается. Технология изготовления выбирается такой, чтобы достигались высокая прочность и монолитность изоляции в целом. Объясняется это тем, что, несмотря на высокую короностойкость самой слюды, частичные разряды в газовых включениях, воздействуя на связующие материалы, все же ограничивают сроки службы изоляции. Кроме того, газовые прослойки сильно снижают механическую прочность и теплопроводность изоляции.

В качестве пропиточных составов в настоящее время применяются пропиточные компаунды типа КП-99ИД на основе эпоксидных и полиэфирных смол. Такой состав после полимеризации не размягчается при нагреве, а сама изоляция называется *терморезистивной* (в отличие от *компаундированной термопластичной* изоляции с маслорезистивными связующими). В качестве подложки используют стеклоткань.

Технология изготовления слюдинитовых лент состоит из следующих стадий: пропитка бумаги, удаление летучих продуктов и армирование стеклоподложками, синтетическими бумагами и

полимерными пленками. В качестве пропитывающих составов используются эпоксидные лаки.

В настоящее время слюдяные ленты выпускаются двух типов: предварительно пропитанные и непропитанные. Слюдяные ленты, имеющие долю связующего вещества в пределах 35—40 %, относят к классу предварительно пропитанных (ЛСМ, ЛСК), а имеющие 5—11 % — к классу непропитанных (ЛСКН, ЛСКО).

Из предварительно пропитанных лент изготавливают изоляцию типа Слюдотерм и Монотерм. За рубежом эта технология называется RR (resin rich). После намотки таких лент на токоведущие части осуществляется их опрессовка и отверждение под давлением при температуре 160 °С. Технология с предварительно пропитанными лентами широко применяется на электромашиностроительных заводах при изготовлении крупных электрических машин, тяговых электродвигателей, а также на предприятиях, занимающихся ремонтом электродвигателей. Одним из преимуществ данной технологии является полная ремонтпригодность электрических машин.

Из непропитанных лент изготавливают изоляцию типа Монолит. На изолируемые части наматывается сухая лента, затем производится вакуумно-нагнетательная пропитка горячим составом обмотки в корпусе статора или отдельно до значения 35—40 %, опрессовка и полимеризация (запечка) пропиточного состава. За рубежом технология с вакуумно-нагнетательной пропиткой называется VPI (vacuum pressure impregnation), а технология пропитки изоляции в сборе с сердечником статора или якоря получила название Global-VPI [10].

По сравнению с компаундированной терморезистивная изоляция в нагретом состоянии имеет в 1,5—2 раза более высокую электрическую прочность, в 4—5 раз большую прочность на разрыв и в 3—4 раза меньшие диэлектрические потери. Однако она более хрупкая.

При изготовлении изоляции Монолит основное связующее вводится в процессе вакуумно-нагнетательной пропитки. Из-за наличия небольшого количества технологического связующего в непропитанной ленте слюдяная бумага легко повреждается при изолировочных работах. Поэтому сохранение целостности слюдяного барьера при изготовлении изоляции является важной составной частью технологии Монолит. В новых лентах Элмикапор

АО «Элинар», за счет модификации технологического связующего, повышена адгезионная прочность слюдяных бумаг к подложке, что позволяет снизить вероятность повреждения слюдяного барьера в процессе переработки. Основные показатели новой ленты находятся на уровне требований лучших зарубежных аналогов. Для ослабления сцепления секций обмотки с сердечником статора и устранения повышенных термомеханических напряжений в изоляции используют антиадгезионный слой. Это позволяет повысить срок службы изоляции [16,17].

Для устранения частичных разрядов в воздушных слоях между поверхностью изоляции и стенками пазов и особенно скользящих разрядов по поверхности изоляции в местах выхода обмотки из паза, где электрическое поле получается резко неоднородным, применяют полупроводящие покрытия. Для их изготовления используют полупроводящие лаки и проводящую ленту ЭЛКОНД-1 толщиной 0,085 мм, предварительно пропитанную проводящим связующим. Удельное поверхностное сопротивление ленты ЭЛКОНД-1 после отверждения составляет 10^5 Ом.

В качестве примера приведем описание конструкции изоляции обмотки якоря тягового электродвигателя типа НБ-418К6 электровоза ВЛ80с. Каждая катушка обмотки состоит из четырех элементарных проводников, расположенных в пазу плашмя и выполненных из провода ПЭТВСДТ. Корпусная изоляция якорных катушек выполнена из четырех слоев предварительно пропитанной слюдинитовой ленты ЛСЭК толщиной 0,1 мм, наложенных с перекрытием в половину ширины ленты, одного слоя фторопластовой ленты толщиной 0,02 мм, наложенной с перекрытием в 1/4 ширины ленты, и одного слоя стеклоленты толщиной 0,1 мм, наложенной встык. Обмотку 3 раза пропитывают в лаке ФЛ-98, в том числе один раз вакуум-нагнетательным способом. В качестве пазового клина 8 (см. рис. 8.15) используют профильный стеклопластик типа СПП-180-У толщиной 5 мм. Повышенные физико-механические характеристики стеклопластика достигаются за счет комбинированной ориентации стекловолокон в продольном и поперечном направлениях. Класс нагревостойкости Н. Стеклопластик не токсичен, но при механической обработке выделяется стеклянная пыль, и рабочие места должны быть оборудованы воздухоотсосами.

Корпусная изоляция главных полюсов выполняется из пяти слоев микаленты ЛМК-ТТ толщиной 0,13 мм и одного слоя стеклоленты ЛЭС толщиной 0,2 мм, уложенных с перекрытием в половину ширины лент. На поверхности обмотки, прилегающей к остову, прикреплены предохранительные прокладки из электронита толщиной 1 мм. Для повышения монолитности изоляции катушек главных и добавочных полюсов их выпекают после изолирования в специальных приспособлениях, а для повышения влагостойкости покрывают электроизоляционной эмалью ЭП-91 класса нагревостойкости F. В качестве межвитковой изоляции используется асбестовая бумага толщиной 0,3 мм, уложенная в два слоя.

В процессе изготовления изоляции машины ее электрическая прочность многократно проверяется повышенным напряжением промышленной частоты в течение 1 мин. Витковая изоляция электрических машин в условиях эксплуатации испытывается повышенным напряжением возбужденной машины, равным $(1,15—1,3) U_{\text{НОМ}}$.

У машин постоянного тока нужно изолировать от корпуса не только витки обмотки, но и коллектор. Кроме того, сами коллекторные пластины должны быть изолированы друг от друга. Для этих целей применяют коллекторный миканит в виде штампованных заготовок, которые прокладываются между медными пластинами коллекторов электрических машин (междупластинная изоляция коллектора). Коллекторный миканит изготавливается из слюды флогопит как более легко истирающейся. Коллекторный миканит из флогопита истирается щетками машины так же, как и коллекторная медь. Это удешевляет эксплуатацию электрической машины, так как не требуется «продоразживания» коллектора. Связующим служит глифтал или другие смолы. По сравнению с остальными типами миканитов он имеет наименьшее содержание связующего (не более 4 %) и высокую плотность. Это обеспечивает прочность коллектора во время работы машины. Для изоляции коллектора от вала электрической машины применяют формовочные миканиты.

В заключение отметим, что в настоящее время предприятия, изготавливающие электроизоляционные материалы, разрабатывают и производят не только отдельные виды изоляционных материалов, но целый комплекс совместимых материалов, которые образуют требуемую систему электрической изоляции.

8.10. Оксидная изоляция

В электротехнике используются тонкие нагревостойкие диэлектрические пленки, которые наносятся на поверхность металла, полупроводника или на иные подложки. Большой интерес представляют пленки, полученные окислением (термическим, электрохимическим или плазменным), когда диэлектрическая пленка на поверхности металла получается в виде химического соединения этого металла с кислородом. Это так называемая оксидная изоляция.

Чаще всего на практике применяется оксидная изоляция на алюминии. Здесь имеется в виду не естественный очень тонкий оксидный слой, выдерживающий напряжение менее 1В, а получаемый путем специальной обработки сравнительно более толстый оксидный слой, имеющий пробивное напряжение до 300 В и более. Практически оксидная изоляция алюминия получается посредством электрохимической анодной обработки этого металла. Если в ванну с кислотным электролитом погрузить два электрода и подать на алюминиевый анод постоянное напряжение, то на поверхности анода образуется оксидная пленка. Оксидные пленки предназначены для работы в контакте с жидким электролитом (в оксидных электролитических конденсаторах) и в контакте с твердым веществом (в оксидно-полупроводниковых конденсаторах). Относительная диэлектрическая проницаемость оксидной пленки около 10. Более перспективны танталовые ($\epsilon_r = 27$) и ниобиевые ($\epsilon_r = 40$) оксидные конденсаторы.

Оксидная изоляция относится к классу нагревостойкости С, так как температура плавления оксида алюминия около 2050 °С. Недостатком оксидной анодированной изоляции является ее малая гибкость и заметная гигроскопичность. В тех случаях, когда не требуется особо высокая нагревостойкость, оксидная изоляция может пропитываться и покрываться лаком. Из оксидированного алюминия изготавливаются катушки, работающие при высокой плотности тока. Малая толщина оксидной изоляции облегчает теплоотвод, компенсируя увеличение удельного сопротивления при замене меди алюминием.

Для получения оксидной пленки на поверхности сплавов высокого сопротивления типа нихрома, константана и других можно применять термическое оксидирование. Покрытую оксидной изоляцией проволоку из сплавов высокого сопротивления можно наматывать плотно, виток к витку, при изготовлении проволочных резисторов.

8.11. Расчет электроизоляционных конструкций. Координация изоляции

В заключение рассмотрим, какие существуют подходы к расчету электрической изоляции, учитывая, что именно электрическая изоляция электрооборудования в значительной степени и предопределяет его размеры, стойкость и безаварийность работы.

Традиционный метод проектирования электрической изоляции заключается в следующем. По максимальному рабочему напряжению $U_{рм}$ с учетом коэффициента запаса k_3 и максимальной напряженности поля E_M определяют толщину изоляции:

$$\Delta = \frac{U_{рм} k_3}{E_M}. \quad (8.4)$$

Недостатком такого подхода является то, что коэффициент запаса k_3 не дает возможностей полного учета условий эксплуатации электроизоляционного материала.

Внедрение новых электроизоляционных материалов и повышение требований к надежности электрооборудования ставит задачу уже на стадии проектирования проводить оценку не только капитальных затрат, но и срока службы изоляции и вероятность ее безотказной работы, т. е. проводить детальный экономический анализ или как его называют — функционально-стоимостный анализ (ФСА). Рассмотрим основные положения ФСА [32].

Чтобы выполнять свои функции, изоляция должна удовлетворять комплексу требований, главные из которых:

- а) относительно малые размеры и низкая стоимость;
- б) изоляция должна быть надежной в работе и обеспечивать заданный срок службы или экономически обоснованный срок службы.

Эти требования противоречивы, поэтому приходится выбирать компромиссный вариант, исходя из минимума среднегодовых расчетных затрат C_p , которые определяются по формуле

$$C_p = \frac{C_k + C_m}{\tau} + C_3 + C_y \frac{Q(\tau)}{\tau}, \quad (8.5)$$

где C_k — первоначальные капитальные затраты на изготовление изоляционной конструкции; C_m — затраты на монтаж, включая транспортные расходы; C_3 — среднегодовые затраты на эксплуатацию изделия; C_y — стоимость ущерба от внезапного отключения оборудования из-за повреждения изоляции; $Q(\tau)$ — вероятность отказа; τ — время до отказа оборудования.

Размеры электрической изоляции (длина и толщина) определяют затраты на изоляцию. Длина изоляции (например, у кабеля или изолятора) обычно задается. В этом случае основным размером, определяющим среднегодовые расчетные затраты, является толщина изоляции Δ . При увеличении толщины изоляции растут ее объем, масса и стоимость (кривая 1 — $(C_k + C_m)/\tau$ на рис. 8.16).

С другой стороны, рост толщины изоляции сопровождается уменьшением рабочей напряженности поля, что неизбежно приводит к уменьшению вероятности пробоя $Q(\tau)$ и к увеличению времени до отказа (кривая 3 — $C_y Q(\tau)/\tau$ на рис. 8.16). При этом учитывается не только длительное воздействие напряжения промышленной частоты, но и кратковременные воздействия грозовых и коммутационных (внутренних) перенапряжений. Электрическая изоляция, имеющая большую толщину, будет более надежной. Следовательно,

ущерб от внезапного отключения оборудования снизится. Однако, чтобы не слишком завышать толщину изоляции, для снижения уровней перенапряжения применяют специальные ограничители.

Эксплуатационные расходы C_3 сравнительно мало зависят от толщины изоляции, так как профилактические осмотры и испытания нормируются ПТЭ (кривая 2 — C_3 на рис. 8.16). Потери энергии снижаются с ростом толщины Δ , но ими можно

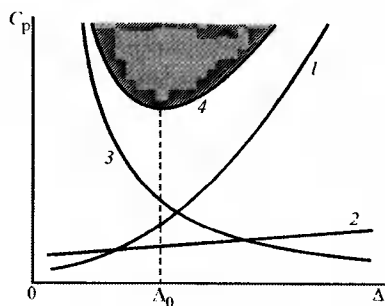


Рис. 8.16. Зависимость среднегодовых расчетных затрат C_p от толщины изоляции Δ

пренебречь. С учетом вышеизложенного зависимость среднегодовых расчетных затрат C_p и их отдельных составляющих от толщины изоляции будет иметь минимум (кривая 4 — C_p на рис. 8.16).

Как видно из рис. 8.16 минимум среднегодовых расчетных затрат соответствует некоторой толщине Δ_0 . При этой толщине обеспечивается оптимальная с экономической точки зрения надежность работы изоляции. Допускается некоторая небольшая экономически оправданная вероятность повреждения изоляции или перерыв в электроснабжении не ответственных потребителей. Например, среднее число перекрытий для линий электропередач допускается один раз в течение 10 лет, а на подстанциях — 1 раз в течение 50 лет.

С помощью профилактических испытаний в эксплуатации постоянно поддерживается этот принятый уровень надежности. Такой подход к выбору изоляции, когда ее прочность согласовывается с воздействующими на нее напряжениями и перенапряжениями, называют *координацией изоляции*. Напомним, что при координации (согласовании) изоляции должно учитываться действие ограничителей перенапряжения.

Другими словами, весь комплекс мероприятий, обеспечивающий надежную и экономически целесообразную работу изоляции при рабочем напряжении и воздействии внутренних и грозовых перенапряжений, называют координацией изоляции или *приведением изоляции к норме*. Таким образом, координация изоляции является одной из главных задач при проектировании электроустановок.

Расчеты и опыты показывают, что электрические поля в изоляционных конструкциях обычно получаются неоднородными, т. е. наибольшая напряженность E_{\max} значительно превышает среднюю $E_{\text{ср}}$, $E_{\max} = K_n E_{\text{ср}}$, где K_n — коэффициент неоднородности электрического поля. Кривая вероятности отказа определяется значением E_{\max} . Если электрическое поле сделать более однородным, т. е. уменьшить коэффициент K_n , то кривая вероятности отказа сместится влево и минимум среднегодовых расчетных затрат уменьшится, так как уменьшится толщина изоляции Δ_0 .

Процесс уменьшения неоднородности электрического поля в изоляции называется регулированием электрических полей в изоляции. Методы регулирования электрических полей в наиболее

часто применяемых высоковольтных конструкциях и аппаратах рассматриваются в дисциплине «Техника высоких напряжений».

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается отличие внутренней изоляции от внешней?
2. Какие основные требования предъявляются к внутренней изоляции?
3. Что такое кратковременная и длительная электрическая прочность?
4. Для чего пропитывается волокнистая изоляция?
5. Какое назначение барьеров в масляных трансформаторах?
6. Какую функцию выполняет масло в масляных трансформаторах и масляных выключателях?
7. Какие виды изоляции существуют в трансформаторах и электрических машинах и каково их назначение?
8. Как рассчитывают изоляцию на основе функционально-стоимостного анализа?
9. Что такое координация изоляции?

9. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

9.1. Система эксплуатационного контроля изоляции

Электрические установки могут нормально работать лишь с исправной изоляцией. В процессе эксплуатации, как уже указывалось в главе 7, из-за увлажнения, перегрева, динамических нагрузок и перенапряжений происходит общее старение изоляции, т. е. ухудшение ее физико-химических характеристик. В изоляции возникают распределенные и местные (сосредоточенные) дефекты, которые в конечном итоге приводят к ее пробоем. Чтобы своевременно выявлять развивающиеся дефекты и не допускать внезапных пробоев электрической изоляции, свойства ее в процессе эксплуатации периодически проверяют. Для этого производят периодический контроль и испытания изоляции, а в случае необходимости — ее ремонт. Такие мероприятия обеспечивают поддержание необходимой степени надежности электрооборудования в процессе его эксплуатации [33, 35].

К одной группе профилактических методов контроля относятся так называемые *неразрушающие испытания*, при которых используются малые напряжения и различные косвенные способы оценки характеристик изоляции (измерение сопротивления изоляции, тангенса угла диэлектрических потерь, емкости и других параметров). Контроль параметров изоляции этими методами производится при малых напряжениях, которые не причиняют вреда электрооборудованию и не могут его разрушить. Поэтому их и называют неразрушающими методами контроля.

Вторую группу составляют испытания с использованием напряжения, повышенного по сравнению с рабочим и вызывающего ускоренное разрушение изоляции в дефектном месте. Поэтому их часто называют *разрушающими*. Существенным недостатком таких испытаний является то, что приложение повышенного напряжения не исключает появления дефекта, которого не было до испытания.

Итак, основной задачей профилактических испытаний является выявление развивающихся дефектов, с тем чтобы своевременно заменить электрооборудование с дефектной изоляцией. Периодичность и нормы испытаний устанавливаются стандартами и ведомственными инструкциями для каждого вида оборудования. При такой системе обслуживания контроль и ремонт оборудования производят по времени наработки. Нарботкой может быть время, количество преобразованной электроэнергии или пробег для электрооборудования локомотивов.

Как показывает практика, такая система технического обслуживания не является оптимальной. Большие резервы повышения эффективности заложены в системе обслуживания по реальной потребности или по реальному техническому состоянию. Переход к такой системе невозможен без использования надежных методов выявления дефектов и оценки технического состояния изоляции. Эти вопросы решает техническая диагностика.

При неразрушающих испытаниях для оценки качества изоляции большое значение имеет изменение ее характеристик во времени. Поэтому с повышением частоты контроля увеличивается вероятность своевременного выявления дефектов. Ниже приводится описание основных методов профилактического контроля и испытаний электрической изоляции.

9.2. Методы контроля изоляции с использованием явления абсорбции

Эти методы базируются на двух основных явлениях, которые возникают в диэлектриках под действием электрического поля: электропроводности и электрической поляризации. Электропроводность связана с наличием примесей в диэлектрике, а поляризация — с ориентацией связанных зарядов в диэлектрике и накоплением зарядов на границе раздела диэлектриков в неоднородной изоляции. Эти явления были подробно рассмотрены ранее, и здесь мы остановимся только на применении этих методов.

Электропроводность технических диэлектриков и изоляционных конструкций носит, как правило, примесный характер. Чем больше в изоляции загрязняющих примесей, тем выше ее электро-

проводность и ниже электрическая прочность. Поэтому проводимость или обратная ей величина — сопротивление утечки R_y могут служить косвенными показателями степени загрязнения и, следовательно, общего состояния изоляции.

При подключении диэлектриков к постоянному напряжению, кроме постоянного тока утечки, наблюдается в течение непродолжительного времени так называемый ток абсорбции, спадающий со временем до нуля по экспоненциальному закону. После окончания переходного процесса в схеме будет протекать лишь сквозной ток проводимости I_y . В процессе старения ток абсорбции уменьшается. Следовательно, по току абсорбции можно судить о состоянии изоляции и степени ее старения.

Поскольку ток i через изоляцию с момента подачи на нее постоянного напряжения со временем уменьшается, стремясь к установившемуся значению I_y , величина сопротивления R с течением времени возрастает, стремясь к установившемуся значению R_y . В зависимости от соотношения I_y и $I_{аб.м}$ процесс увеличения R будет происходить по-разному (см. рис. 6.3). При $R = \frac{R_y}{2}$ кривая имеет точку перегиба.

Состояние изоляции оценивают с помощью абсолютного значения сопротивления изоляции, а также с помощью коэффициента абсорбции $K_{аб}$, который равен отношению токов, измеренных через 15 и 60 с с момента приложения напряжения.

Сопротивление изоляции есть величина обратная току утечки, поэтому коэффициент абсорбции определяют так же, как отношение одностороннего значения сопротивления изоляции R_{60} к пятнадцатисекундному значению R_{15} . Правила технической эксплуатации нормируют значение коэффициента абсорбции $K_{аб}$ для крупных электрических машин. Изоляция считается сухой, если $K_{аб} > 1,3$ при температуре 10–20 °С. Если $K_{аб} < 1,3$, то изоляция увлажненная, и ее необходимо сушить.

Измерение сопротивления изоляции R_{60} и R_{15} входит в программу обследования трансформаторов РАО «ЕЭС России». В соответствии с «Объемом и нормами испытания электрооборудования» абсолютное значение сопротивления изоляции трансформаторов напряжением свыше 35 кВ должно быть не менее 50 % значения исходных (заводских) величин.

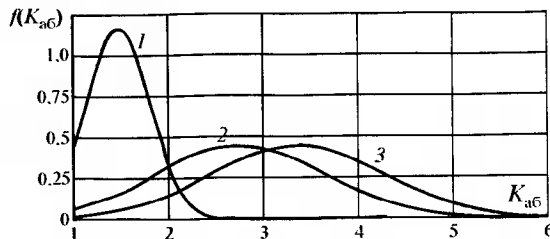


Рис. 9.1. Плотности распределения коэффициента абсорбции $K_{аб}$ тяговых электродвигателей типа НБ-406 для трех случаев

В процессе эксплуатации происходит старение электрической изоляции, и коэффициент абсорбции снижается. На рис. 9.1 показаны плотности распределения f коэффициента абсорбции $K_{аб}$ для тяговых электродвигателей типа НБ-406, снятые на Московском электромеханическом ремонтном заводе для трех случаев: 1 — до ремонта (110 двигателей); 2 — после среднего ремонта (196 двигателей); 3 — после капитального ремонта (264 двигателя).

По приведенному рис. 9.1 можно с вероятностью 99 % утверждать, что если $K_{аб} = 2,6$, то этот двигатель прошел или капитальный, или средний ремонт. Если же $K_{аб} = 1,4$, то с вероятностью 90 % можно утверждать, что он нуждается в ремонте.

Плотности распределения одноминутного значения сопротивления изоляции R_{60} для тех же самых случаев мало различимы. Коэффициент абсорбции дает объективную оценку состояния изоляции, так как учитывает заряд абсорбции. Однако контроль заряда абсорбции по току абсорбции неудобен тем, что ток абсорбции мал и промышленные помехи сильно искажают его. Поэтому удобнее пользоваться другими методами обнаружения абсорбции. Например, на практике можно применить метод измерения возвратного напряжения и напряжения саморазряда. Эти методы были описаны в п. 6.4—6.5.

Опыт, в котором наблюдается возвратное напряжение, состоит в следующем (см. рис. 6.5). Неоднородная изоляция заряжается в течение одной минуты при постоянном напряжении, чтобы в ней накопился заряд абсорбции. Затем изоляция отключается от источника постоянного напряжения, и ее электроды замыкаются накоротко на время Δt , после чего вновь размыкаются. За время Δt геометрическая емкость C_r полностью разряжается, а заряд абсорбции, накопленный на границе слоев, остается практически неизменным. Этот заряд распределится на обе емкости и зарядит их до одинако-

вого напряжения U_0 . После размыкания внешних электродов изоляции конденсаторы C_1 и C_2 вновь оказываются соединенными последовательно. Конденсаторы C_1 и C_2 будут разряжаться на сопротивления утечки своих слоев R_1 и R_2 с разной скоростью, так как постоянные времени слоев R_1C_1 и R_2C_2 неодинаковы. На изоляции появится напряжение U_B , равное разности двух экспонент (см. рис. 6.5):

$$U_B = U_0 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} - U_0 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}$$

Это напряжение и называют возвратным напряжением. По величине и форме возвратного напряжения можно судить о состоянии изоляции. Как показали исследования, наиболее информативным является возвратное напряжение, измеренное на 30-й с после начала измерения, которое обозначают U_{B30} . На рис. 9.2 приведены дифференциальные функции распределения U_{B30} тяговых электродвигателей типа НБ-406 для трех случаев: до ремонта (110 двигателей), после среднего (196 двигателей) и после капитального (264 двигателя) ремонтов.

Три максимума в кривой плотности распределения U_{B30} до ремонта относятся к разным пробегам. Согласно Правилам ремонта электрических машин электроподвижного состава, тяговые электродвигатели поступают в ремонт с пробегами, кратными 350 тыс. км (350, 700, 1050 и 1400 тыс. км). Двигатели с пробегами 350, 700 и 1050 тыс. км проходят средний ремонт с пропиткой якорей и полюсных катушек, а двигатели с пробегом 1400 тыс. км проходят капитальный ремонт с полной заменой обмотки.

Хотя, согласно Правилам, пробег между ремонтами составляет 350 тыс. км, в действительности же двигатели поступают в ремонт как с пробегом меньше 350 тыс. км, так и с перебегами. Реальные пробеги поступающих в ремонт ТЭД лежат в довольно широких интервалах ($\pm 20\%$).

Примем первый интервал пробегов равным 350—700 тыс. км (середина интервала 525 тыс. км), второй интервал 700—1050 тыс. км (середина интервала 875 тыс. км) и третий интервал 1050—1400 тыс. км (середина интервала 1225 тыс. км). Три максимума в кривой плотности распределения U_{B30} до ремонта при напряжениях 155, 95, и 20 В относятся к разным пробегам и соответствуют средним значениям интер-

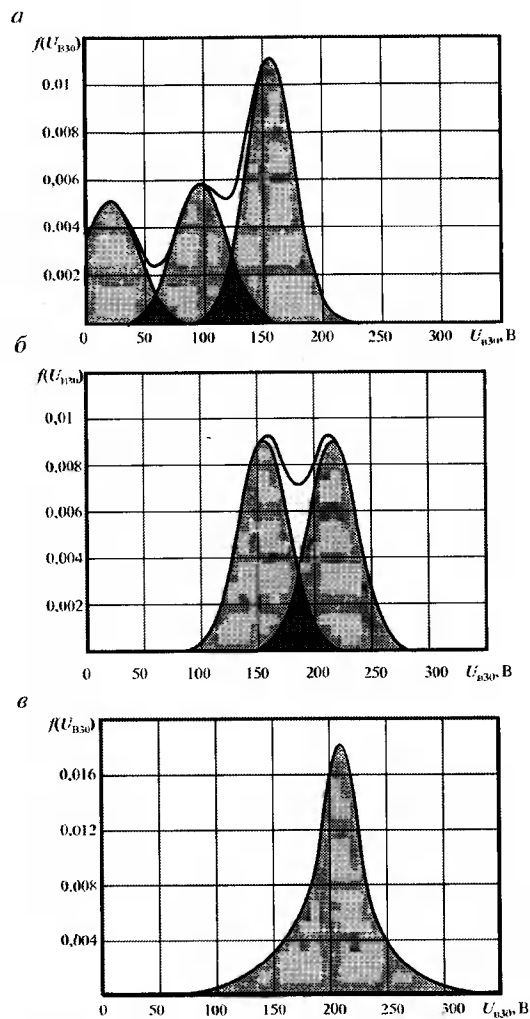


Рис. 9.2. Плотности распределения возвратного напряжения U_{B30} тяговых электродвигателей типа НБ-406 для трех случаев: *a* — до ремонта; *б* — после среднего ремонта; *в* — после капитального ремонта

валов 525, 875 и 1225 тыс. км. Два явных максимума в кривой плотности распределения U_{B30} после среднего ремонта также относятся к двум средним значениям интервалов пробегов, после которых выполняется средний ремонт. Один максимум соответствует отремонтированным двигателям со средним пробегом 525 тыс. км и наблюдается при напряжении $U_{B30} = 215$ В, а второй максимум соответствует отремонтированным двигателям со средним пробегом 875 тыс. км и наблюдается при напряжении $U_{B30} = 155$ В. Кривая распределения U_{B30} после капитального ремонта имеет закон, близкий к нормальному, и небольшую дисперсию. Максимум плотности распределения соответствует возвратному напряжению $U_{B30} = 220$ В.

Полученные кривые дают возможность построить зависимость возвратного напряжения от пробега P и вида ремонта (рис. 9.3). Видно, что с увеличением пробега P изоляция стареет, и возвратное напряжение снижается. Средний ремонт восстанавливает свойства изоляции и повышает возвратное напряжение примерно на 60 В. После средних ремонтов выполняется капитальный ремонт, который полностью восстанавливает качество изоляции. На рис. 9.3 видно, что у двигателей, имеющих средний пробег 1225 тыс. км среднестатистическое возвратное напряжение U_{B30} составляет 20 В, что говорит о большой изношенности изоляции. Свойства такой изоляции нельзя восстановить средним ремонтом, и требуется полная замена обмотки.

Вместе с тем если у двигателя с таким пробегом возвратное напряжение оказывается значительно больше 20 В, то это значит, что изоляция имеет еще значительный запас до полного износа. В качестве решающего правила используется значение возвратного напряжения, равное 80 В. Свойства такой изоляции можно восстановить средним ремонтом, т. е. пропиткой изоляции и ее сушкой, что позволяет экономить дефицитные обмо-

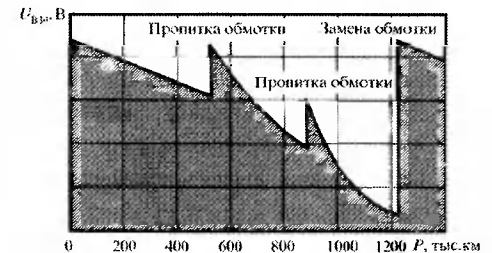


Рис. 9.3. Зависимость возвратного напряжения от пробега и вида ремонта

точные и изоляционные материалы, удешевляет ремонт и продляет срок службы ТЭД до следующего ремонта.

Итак, о старении изоляции без ее разрушения, как показали исследования, можно судить по характеру процессов поляризации, в частности по величине возвратного напряжения. Это доказывалось следующими положениями. С увеличением пробега изоляция изнашивается, ее электрическая прочность снижается, уменьшается и возвратное напряжение, которое может характеризовать состояние изоляции даже лучше, чем пробивное напряжение. Дело в том, что пробивное напряжение характеризует лишь кратковременную прочность изоляции, и в ряде случаев она может быть достаточно высокой. Однако электрическая прочность при длительном воздействии напряжения оказывается недостаточной из-за ухудшения электрических характеристик изоляции. В частности, в процессе старения изоляции увеличиваются диэлектрические потери, которые могут привести к тепловому пробое изоляции при длительном приложении напряжения.

Для каждого вида изоляции существует свой внутренний ресурс, который характеризуется способностью изоляции в течение определенного времени выдерживать приложенное напряжение и противостоять разрушающему воздействию процессов, протекающих при этом напряжении.

Внутренний ресурс определяется количеством вещества, которое должно быть разрушено для того, чтобы привести к резкому снижению электрических параметров, переходящему затем в один из видов пробоя. Внутренний ресурс у каждого вида новой изоляции есть величина постоянная; естественно, он постепенно уменьшается с ростом пробега. Уменьшается и возвратное напряжение. Следовательно, величина возвратного напряжения лучше, чем какой-либо другой параметр, характеризует изношенность изоляции.

В настоящее время работы по использованию возвратного напряжения для диагностики изоляции и оценки степени ее старения ведутся и в нашей стране, и за рубежом. Однако некоторые исследователи применяют этот метод оценки как вспомогательный. Причина заключается в том, что у разных систем изоляции в разных условиях эксплуатации при различных механизмах старения по-разному изменяется и возвратное напряжение.

Несмотря на то что возвратное напряжение создается зарядом абсорбции, т. е. зарядом, поглощенным на границе раздела диэлектриков, корреляционная связь между ними прослеживается не всегда. В некоторых системах изоляции возвратное напряжение в процессе старения увеличивается.

Чтобы определить закономерности изменения возвратного напряжения, необходимо иметь базу данных для каждой конкретной системы изоляции, как, например, это было сделано выше.

Опыт показывает, что даже при нечетко выраженной тенденции изменения возвратного напряжения в процессе старения, четко просматривается тенденция изменения заряда абсорбции и по его величине можно судить о степени старения изоляции и оставшемся ресурсе ее работы. Заряд абсорбции можно определить, если измерить сопротивление изоляции и напряжение саморазряда.

Если после отключения изоляции от источника постоянного напряжения U она не разряжается на землю и заряженные емкости слоев C_1 и C_2 (см. рис. 6.5) неоднородной изоляции будут разряжаться только на сопротивления утечки своих слоев R_1 и R_2 , то этот процесс называют саморазрядом изоляции. Напряжение на изоляции будет равно сумме напряжений на отдельных слоях изоляции, т. е. будет равно сумме экспонент (формула 6.38):

$$u_c = U_{C1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{C2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}.$$

Измерение напряжения саморазряда позволяет рассчитать некоторые параметры изоляции, которые существенно различаются в зависимости от степени старения изоляции. Например, по напряжению саморазряда можно рассчитать две постоянные времени: $\tau_1 = R_1 C_1$ и $\tau_2 = R_2 C_2$, а также коэффициент абсорбции $K_{аб}$, постоянную времени заряда изоляции τ , а также заряд абсорбции на границе раздела двух диэлектриков неоднородной изоляции $Q_{гр}$. Для определения указанных параметров используются формулы (6.9, а) и (6.31):

$$\tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{(R_1 + R_2)},$$

$$Q_{гр} = \frac{U(R_2 C_2 - R_1 C_1)}{R_1 + R_2}.$$

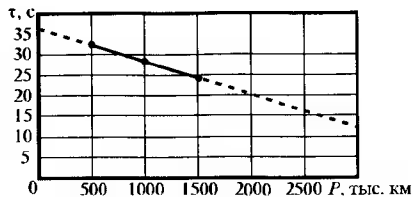


Рис. 9.4. Зависимость постоянной времени заряда изоляции тяговых электродвигателей типа ДК-117 от пробега P

На рис. 9.4 и 9.5 приведены зависимости постоянной времени τ и заряда на границе раздела $Q_{гр}$ для тяговых электродвигателей типа ДК-117 вагонов метрополитена от пробега. Эти зависимости получены в результате статистической обработки большого массива экспериментальных данных, полученных в Нижегородском метрополитене.

Приведенные зависимости также можно использовать для целей диагностики. Значение постоянных времени для изоляции ТЭД с пробегами 500, 1000 и 1500 тыс. км составили соответственно 32,58; 28,68 и 24,52 с, т. е. с ростом пробега постоянная времени уменьшается.

Заряд $Q_{гр}$ составил для ТЭД с пробегом 500, 1000 и 1500 тыс. км соответственно 13,9; 10,3 и $8,45 \cdot 10^{-6}$ Кл. Полученную зависимость можно экстраполировать показательной функцией:

$$Q_{гр} = 18,75 \cdot \exp\left(-\frac{P}{1800}\right). \quad (9.1)$$

где P — пробег ТЭД в тыс. км (см. рис. 9.5).

Качество q изоляции ТЭД с пробегом P можно оценивать отношением [36]:

$$q_P = \frac{Q_{гр,P}}{Q_0} = \frac{Q_{гр,P}}{18,75}. \quad (9.2)$$

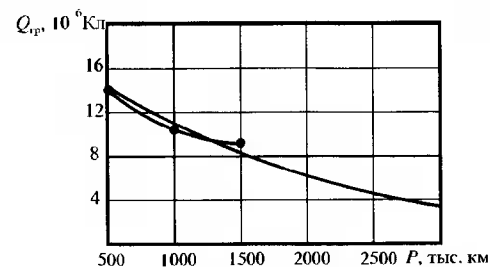


Рис. 9.5. Зависимость заряда на границе раздела двух диэлектриков для ТЭД ДК-117 от пробега Φ

В табл. 3 приведены рассчитанные значения качества изоляции для пробегов от 500 тыс. км до 3000 тыс. км. Качество изоляции для ТЭД с пробегами 500, 1000 и 1500 тыс. км составляет 0,76; 0,58 и 0,44.

Таблица 9.1

Пробег	тыс. км	500	1000	1500	2000	2500	3000
Заряд	10^{-6} Кл	14,2	10,8	8,1	6,2	4,7	3,5
Качество изоляции	—	0,76	0,58	0,44	0,33	0,25	0,19

Прогнозирование показало, что ТЭД с зарядом, меньшим чем $3,5 \cdot 10^{-6}$ Кл, имеют большой износ изоляции и непригодны для дальнейшей эксплуатации.

ТЭД с пробегом 3000 тыс. км, имеющие заряд более $4,7 \cdot 10^{-6}$ Кл, могут эксплуатироваться до очередного текущего ремонта. Доля таких двигателей, имеющих пробег 3000 тыс. км, составит по предварительным прогнозам примерно 11 %, т. е. каждый девятый ТЭД может после выработанного ресурса 3000 тыс. км пройти еще 500 тыс. км, если применять прибор для объективной оценки состояния изоляции по величине заряда на границе раздела двух сред.

Таким образом, применение рассмотренного метода оценки состояния корпусной изоляции позволит перейти от системы ремонта по пробегу к системе ремонта по реальному техническому состоянию. Такой переход обеспечит повышение эксплуатационной надежности тяговых двигателей и снижение эксплуатационных расходов за счет экономии дефицитных обмоточных и изоляционных материалов.

Для измерения рассмотренных выше параметров: сопротивления изоляции, кривой саморазряда и возвратного напряжения в Нижегородском филиале РГОТУПС разработано устройство, защищенное авторским свидетельством. Принципиальная схема устройства приведена на рис. 9.6.

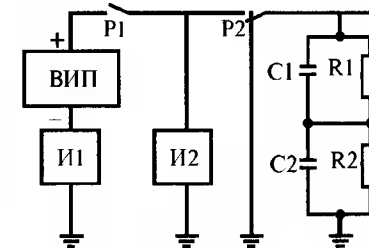


Рис. 9.6. Принципиальная схема устройства для измерения параметров изоляции

Устройство содержит: высоковольтный стабилизированный источник питания ВИП с выходным напряжением 1000 В, измеритель тока И1, измеритель напряжения И2 и два высоковольтных реле Р1 и Р2, управляемых микропроцессорным контроллером. Схема замещения неоднородной изоляции тягового двигателя представлена в виде двух конденсаторов С1 и С2, зашунтированных резисторами R1 и R2.

Устройство работает следующим образом. Сначала оба реле Р1 и Р2 обесточены, и объект измерения разряжается на землю в течение одной минуты. Затем включаются оба реле, и в течение одной минуты объект испытания заряжается от высоковольтного источника питания. Во время заряда измерителем И1 измеряется ток утечки, а измерителем И2 — напряжение на изоляции. Далее автоматически рассчитывается сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции. Если требуется измерить напряжение саморазряда, то после заряда изоляции реле Р1 отключается, а реле Р2 остается включенным. Измеритель напряжения И2 в течение одной минуты измеряет напряжение саморазряда. Чтобы измерить возвратное напряжение, предварительно заряженную изоляцию кратковременно (в течение 5 с) разряжают на землю (оба реле выключены). Затем реле Р2 включается, а реле Р1 остается выключенным, и возвратное напряжение измеряется измерителем И2.

9.3. Контроль изоляции по емкостным характеристикам

Существует несколько методов проверки качества изоляции по емкостным характеристикам.

Метод «емкость—температура» основывается на изменении емкости при увеличении температуры. Опытным путем установлено, что если при повышении температуры на 50 °С емкость увеличивается не более чем на 30 %, то изоляцию можно считать нормальной, в противном случае — увлажненной. Критерий увлажненности изоляции выражается так:

$$\frac{C_{\text{гор}}}{C_{\text{хол}}} \leq 1,3, \quad (9.3)$$

где $C_{\text{гор}}$ — емкость изоляции при температуре 70 °С; $C_{\text{хол}}$ — емкость изоляции при температуре 20 °С.

Емкость в этом методе измеряют мостом Шеринга.

Метод «емкость—частота» основывается на изменении емкости при различных частотах. Известно, что вода, являясь полярным диэлектриком, обладает большим значением относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_r = 80$). Поэтому при малых частотах, когда диполи частиц влаги успевают ориентироваться вдоль линий переменного электрического поля, они увеличивают емкость изоляции. Однако при увеличении частоты, когда диполи не успевают ориентироваться с частотой приложенного напряжения, величина емкости резко уменьшается, т. е. механизм дипольной поляризации выключается. Зависимость емкости от частоты для дипольного диэлектрика приведена на рис. 6.4.

При методе «емкость—частота» емкость изоляции измеряют на частотах 2 и 50 Гц и определяют отношение C_2 / C_{50} , которое служит показателем качества изоляции. Опытным путем установлено, что отношение C_2 / C_{50} для неувлажненной изоляции трансформаторов близко к единице. Измерения на реальных трансформаторах показали, что при значении C_2 / C_{50} , меньшем 1,05, систему изоляции можно считать неувлажненной. Чем больше увлажнение изоляции, тем больше становится и отношение C_2 / C_{50} .

В действующей инструкции по эксплуатации трансформаторов включение трансформаторов без сушки после капитального ремонта допускается при следующих значениях отношения емкостей C_2 / C_{50} , измеренных на частотах 2 и 50 Гц (табл. 9.2).

Таблица 9.2

Допустимые значения отношения емкостей C_2 / C_{50} для возможности включения трансформаторов без сушки после капитального ремонта

Температура при измерении, °С	10	20	30	40	50	60	70
Трансформаторы до 35 кВ включительно	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Трансформаторы 110—150 кВ	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7

Для измерения емкостей C_2 и C_{50} используют прибор, получивший название прибора контроля влажности (ПКВ). Принципиальная схема его в упрощенном виде приведена на рис. 9.7.

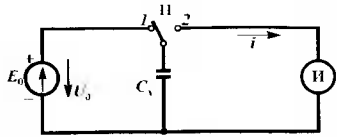


Рис. 9.7. Упрощенная схема прибора для контроля влажности

Переклю­чател­ь П пе­риодиче­ски под­клю­ча­ет ис­пы­туе­мую изо­ля­цию C_x к ис­точ­ни­ку по­сто­ян­но­го на­пря­же­ния U_0 (в по­ло­же­нии 1 ем­кость C_x за­ря­жа­ет­ся), а за­тем к из­мерителю И с ма­лым вхо­д­ным со­про­тив­ле­ни­ем (в по­ло­же­нии 2 ем­кость C_x раз­ря­жа­ет­ся). Сред­нее ко­ли­че­ство за­ря­да, пе­ре­но­си­мо­го че­рез из­мерителю И в еди­ни­цу вре­ме­ни, или сред­ний ток i из­мерителю И про­пор­цио­на­лен ем­ко­сти C_x . Си­сте­ма управ­ле­ния пе­ре­к­лю­ча­те­лем П обес­пе­чи­ва­ет два ре­жи­ма ра­бо­ты: с час­то­той 2 Гц и 50 Гц.

В ме­то­де «ем­кость—вре­мя» из­ме­ря­ют ем­ко­сти C_r (ге­ометри­че­скую) и ΔC (ем­кость, от­ра­жа­ю­щую про­цесс на­ко­пле­ния за­ря­да аб­сорб­ции в не­од­но­род­ной изо­ля­ции). Критерием ка­че­ства изо­ля­ции яв­ля­ет­ся от­но­ше­ние $\Delta C / C_r$. Опы­тым пу­тем ус­та­нов­ле­но, что для нор­маль­ной изо­ля­ции от­но­ше­ние $\Delta C / C_r$ не пре­вы­ша­ет 0,1, а для уве­ла­чен­ной изо­ля­ции от­но­ше­ние $\Delta C / C_r > 0,1$. При­нци­пи­аль­ная схе­ма при­бо­ра для из­ме­ре­ния ем­ко­стей C_x и ΔC по­ка­за­на на рис. 9.8.

Ис­пы­туе­мая изо­ля­ция C_r сна­ча­ла за­ря­жа­ет­ся в те­че­ние од­ной ми­ну­ты от ис­точ­ни­ка ста­би­ли­зи­ро­ван­но­го на­пря­же­ния U_0 . За­тем пе­ре­к­лю­ча­те­ль П1 на ко­рот­кое вре­мя (5—10 мс) под­клю­ча­ет ем­кость C_x к эталон­но­му кон­ден­са­то­ру C_3 . За это вре­мя кон­ден­са­то­ру C_3 успе­ва­ет пе­ре­дать за­ря­д толь­ко ге­ометри­че­ская ем­кость C_r . Ем­кость кон­ден­са­то­ра C_3 вы­би­ра­ет­ся та­кой, что­бы $C_3 \gg C_r$, по­это­му на­пря­же­ние на нем U_3 ока­зы­ва­ет­ся прак­ти­че­ски про­пор­цио­наль­ным C_r . Дей­стви­тель­но,

$$U_3 = U_0 \frac{C_r}{C_r + C_3} \approx U_0 \frac{C_r}{C_3}. \quad (9.4)$$

От­сю­да ге­ометри­че­ская ем­кость оп­ре­де­лит­ся:

$$C_r = \frac{U_3 C_3}{U_0}. \quad (9.5)$$

На­пря­же­ние U_3 на кон­ден­са­то­ре C_3 из­ме­ря­ет­ся с по­мо­щью из­мерителю И с бо­ль­шим вхо­д­ным со­про­тив­ле­ни­ем.

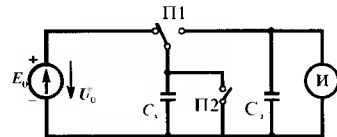


Рис. 9.8. При­нци­пи­аль­ная схе­ма при­бо­ра для из­ме­ре­ния C_r и ΔC

Для из­ме­ре­ния ем­ко­сти ΔC ис­пы­туе­мая изо­ля­ция по­вто­рно за­ря­жа­ет­ся. По­сле это­го она от­клю­ча­ет­ся от ис­точ­ни­ка на­пря­же­ния и на ко­рот­кое вре­мя (5—10 мс) за­мы­ка­ет­ся клю­чом П2 на­ко­рот­ко, что­бы раз­ря­дить толь­ко C_r . За­тем пе­ре­к­лю­ча­те­лем П1 ем­кость C_x на вре­мя 1 с со­еди­ня­ет­ся с эталон­ным кон­ден­са­то­ром C_3 . По­сле от­клю­че­ния пе­ре­к­лю­ча­те­ля П1 за­ря­д на эталон­ном кон­ден­са­то­ре C_3 , а сле­до­ва­тель­но, и на­пря­же­ние на нем по­лу­ча­ет­ся про­пор­цио­наль­ным ΔC . По ре­зуль­та­там двух из­ме­ре­ний оп­ре­де­ля­ют от­но­ше­ние $\Delta C / C_r$.

9.4. Кон­троль изо­ля­ции по ве­ли­чине тан­ген­са уг­ла ди­электрических потерь

Схе­ма за­ме­ще­ния изо­ля­ции на пе­ре­мен­ном на­пря­же­нии мо­жет быть пред­став­ле­на как парал­лель­ное со­еди­не­ние кон­ден­са­то­ров C_p и ре­зи­сто­ра R (см. рис. 4.1, а) не­за­ви­си­мо от то­го, яв­ля­ет­ся ли изо­ля­ция од­но­слой­ной, двух­слой­ной или мно­го­слой­ной, так как на­ко­пле­ние за­ря­дов на гра­ни­це раз­де­ла двух сло­ев на пе­ре­мен­ном на­пря­же­нии от­сут­ст­ву­ет. В со­про­тив­ле­нии R_x про­ис­хо­дит рас­се­я­ние энер­гии.

От­но­ше­ние ак­тив­ной про­водимости $g_x = \frac{1}{R_x}$ к ем­ко­ст­ной про­водимости $b_x = \omega C_x$ на­зы­ва­ет­ся тан­ген­сом уг­ла ди­электрических потерь и об­означает­ся $\text{tg}\delta$. Та­ким об­ра­зом, для парал­лель­ной схе­мы за­ме­ще­ния $\text{tg}\delta$ вы­ра­зит­ся (рис. 4.1, а):

$$\text{tg}\delta = \frac{g_x}{b_x} = \frac{I}{\omega C_x R_x} = \frac{I}{\omega \epsilon_0 \epsilon_x \rho_x}. \quad (9.6)$$

Из фор­му­лы (9.6) сле­ду­ет, что $\text{tg}\delta$ не за­ви­сит от раз­ме­ров изо­ля­ции и яв­ля­ет­ся ко­свен­ным по­ка­за­те­лем со­сто­я­ния изо­ля­ции. Ди­электрические потери про­пор­цио­наль­ны $\text{tg}\delta$ и вы­ра­жа­ют­ся фор­му­лой (4.1).

Из­ме­ре­ние $\text{tg}\delta$ при час­то­те 50 Гц яв­ля­ет­ся од­ним из наи­бо­лее рас­про­стра­нен­ных ме­то­дов кон­тро­ля изо­ля­ции элек­трообору­до­ва­ния вы­со­ко­го на­пря­же­ния, по­сколь­ку рас­пре­де­лен­ные де­фек­ты (ув­ла­ж­не­ние, ио­ни­за­ция га­зо­вых вклю­че­ний) вы­зы­ва­ют уве­ли­че­ние ди­электрических потерь. Из­ме­ре­ние зна­че­ния $\text{tg}\delta$ да­ет пред­став­ле­

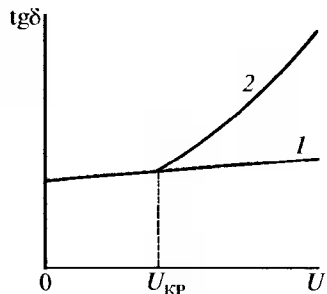


Рис. 9.9. Зависимость $\text{tg}\delta$ от напряжения:

1 — изоляция нормального качества; 2 — изоляция с газовыми включениями

ние о качестве изоляции, а характер изменения $\text{tg}\delta$ при периодических измерениях позволяет судить об ухудшении свойств изоляции [11].

Оценка состояния изоляции по значениям $\text{tg}\delta$ предусматривается Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) почти для всех видов изоляции. В некоторых случаях снимают зависимость $\text{tg}\delta$ от приложенного напряжения. У изоляции нормального качества значение $\text{tg}\delta$ при напряжениях до $1,5U_{\text{раб}}$ в большинстве случаев остается практически неизменным (кривая 1 на рис. 9.9). Если же при повышении напряжения $\text{tg}\delta$ начинает быстро возрастать (кривая 2 на рис. 9.9), то это свидетельствует об ионизации и возникновении частичных разрядов (ЧР) в газовых включениях. За счет ЧР возрастает рассеяние дополнительной энергии, что и вызывает резкий рост $\text{tg}\delta$.

Зависимость $\text{tg}\delta = f(U)$ получила название «кривой ионизации». По ней можно ориентировочно определить напряжение $U_{\text{чр}}$ появления ЧР. Оно определится как напряжение, при котором начинается рост $\text{tg}\delta$.

Величину $\text{tg}\delta$ изоляции измеряют с помощью моста переменного тока Р5026 или Р5026М (моста Шеринга), принципиальная

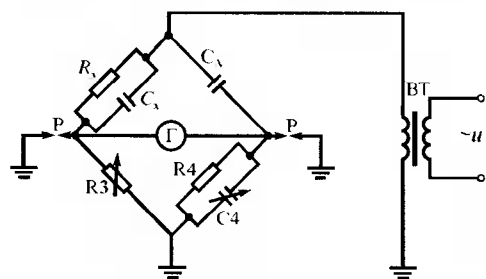


Рис. 9.10. Принципиальная схема моста Шеринга для измерения емкости и $\text{tg}\delta$ изоляции

схема которого приведена на рис. 9.10.

Плечами моста переменного тока являются:

C_x, R_x — емкость и сопротивление утечки испытуемой изоляции;

C_N — эталонный конденсатор с малыми потерями;

R3 — регулируемый образцовый резистор;

R4 и C4 — нерегулируемый образцовый резистор и регулируемый образцовый конденсатор.

К одной из диагоналей моста подводится переменное напряжение (до 10 кВ). В другую диагональ включен гальванометр Г, служащий индикатором моста. Защитные разрядники Р предохраняют измерительные плечи моста в случае пробоя испытуемой изоляции. Для уменьшения ошибок измерения вследствие наводок от внешних полей мост экранируется. Изменяя величину сопротивления резистора R3 и емкости конденсатора C4, добиваются равновесия моста, при котором индикатор Г не отклоняется от нулевого значения. Как известно, условием равновесия моста переменного тока является равенство произведений полных сопротивлений (или полных проводимостей) противоположных плеч моста, т. е.

$$\underline{Z}_x \underline{Z}_4 = \underline{Z}_3 \underline{Z}_N \quad \text{или} \quad (9.7)$$

$$\underline{Y}_x \underline{Y}_4 = \underline{Y}_3 \underline{Y}_N. \quad (9.8)$$

Подставим в формулу (9.8) значения проводимостей каждого плеча:

$$\left(\frac{1}{R_x} + j\omega C_x \right) \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) = \frac{1}{R_3} j\omega C_N$$

и перемножим выражения в скобках:

$$\frac{1}{R_x R_4} - \omega^2 C_x C_4 + j\omega \left(\frac{C_x}{R_4} + \frac{C_4}{R_x} \right) = j\omega \frac{C_N}{R_3}. \quad (9.9)$$

Приравнивая действительные и мнимые части равенства (9.9), получим два условия равновесия моста (по амплитуде и фазе):

$$\frac{1}{R_x R_4} - \omega^2 C_x C_4 = 0 \quad \text{или} \quad \frac{1}{\omega R_x C_x} - \omega R_4 C_4 = 0; \quad (9.10)$$

$$\omega \left(\frac{C_x}{R_4} + \frac{C_4}{R_x} \right) = \omega \frac{C_N}{R_3} \quad \text{или} \quad \frac{C_x}{R_4} + \frac{C_4}{R_x} = \frac{C_N}{R_3}. \quad (9.11)$$

Учитывая, что $\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega R_x C_x}$, из уравнения (9.10) получим:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega R_4 C_4. \quad (9.12)$$

Пренебрегая членом $\frac{C_4}{R_x}$, в уравнении (9.11) найдем выражение для C_x :

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3}. \quad (9.13)$$

Обычно R_4 берется равным $\frac{1}{\omega} 10^6 = 3184$ Ом. Тогда $\operatorname{tg}\delta = 10^6 C_4$, если C_4 берется в фарадах, или $\operatorname{tg}\delta = C_4$, если C_4 берется в микрофарадах.

Схема измерения $\operatorname{tg}\delta$, показанная на рис 9.10, называется «нормальной» схемой. Она может быть использована лишь в том случае, если оба электрода испытуемого объекта изолированы от «земли». Однако в условиях эксплуатации часто один из электродов испытуемой изоляции «наглухо» заземлен, и «нормальная» схема не может быть использована. В таких случаях измерение $\operatorname{tg}\delta$ производят по так называемой «перевернутой» схеме, которая отличается от «нормальной» тем, что высокое напряжение подается в точку соединения резисторов R_3 и R_4 , а заземляются точки соединения C_x и C_N .

В «перевернутой» схеме оба измерительных плеча и индикатор Γ оказываются под высоким потенциалом. Чтобы обеспечить безопасные условия работы с мостом, изоляция ручек регулируемых элементов моста (R_3 , C_4 и Γ) выполняются на двойное номинальное напряжение моста.

В качестве источника высокого напряжения обычно применяют измерительный трансформатор напряжения НОМ-10.

В условиях эксплуатации обеспечить хорошую экранировку испытываемой конструкции практически невозможно. Поэтому для уменьшения ошибки, обусловленной внешними влияниями, производят два измерения с изменением фазы испытательного напряжения на 180° , а величину $\operatorname{tg}\delta$ определяют, как среднее двух измерений, т. е.

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{C_{x1} \operatorname{tg}\delta_1 + C_{x2} \operatorname{tg}\delta_2}{C_{x1} + C_{x2}}, \quad (9.14)$$

где C_{x1} и C_{x2} — емкости изоляции по результатам первого и второго измерений.

Измерения с изменением фазы испытательного напряжения на 180° дают ошибки с разными знаками, которые при усреднении результатов измерений отчасти компенсируются.

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь обмоток трансформаторов производится между каждой обмоткой и корпусом при заземленных свободных обмотках. Измерения на трансформаторах, залитых маслом, допускается производить при напряжении, не превышающем 60 % заводского испытательного напряжения измеряемой обмотки, но не выше 10 кВ.

Наибольшие допустимые значения $\operatorname{tg}\delta$ в процентах, устанавливаемые ПУЭ для обмоток трансформаторов приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Наибольшее допустимое значение $\operatorname{tg}\delta$ для обмоток трансформаторов, %

Трансформаторы	Температура обмотки, °С						
	10	20	30	40	50	60	70
35 кВ мощностью более 10 000 кВА и 110 кВ всех мощностей	1,8	2,5	3,5	5,0	7,0	10,0	14,0
220 кВ всех мощностей	1,0	1,3	1,6	2,0	2,5	3,2	4,0

Примечание. Значения $\operatorname{tg}\delta$, указанные в таблице, относятся ко всем обмоткам данного трансформатора. Правила регламентируют также значения $\operatorname{tg}\delta$ для изоляции высоковольтных вводов трансформаторов и трансформаторного масла.

Следует отметить, что величина $\operatorname{tg}\delta$, измеренная на промышленной частоте, зависит не только от свойств изоляции, но и от свойств масла, залитого в трансформатор, и соотношения объемов масла и твердой изоляции. Это делает критерии отбраковки изоляции по $\operatorname{tg}\delta$ «размытыми», оценку состояния приближенной и приводит к тому, что во многих случаях диагноз приходится ставить на основании сравнения результатов измерений с предыду-

щими данными. Так, в российских энергосистемах в соответствии с рекомендациями «Объема и норм испытания электрооборудования» браковочным критерием по $\text{tg}\delta$ для трансформаторов напряжением 110 кВ и выше является превышение его значения на 50 % по сравнению с заводскими данными. Однако, если $\text{tg}\delta$ при температуре 20 °С не превышает 1 %, его сравнение с исходными данными не требуется.

В практике энергокомпаний США для силовых трансформаторов удовлетворительным считается $\text{tg}\delta$ до 1 %, если $\text{tg}\delta = 1\text{--}2\%$, то состояние изоляции вызывает сомнения. Если же значение $\text{tg}\delta > 2\%$, то состояние изоляции плохое. Во всех случаях значения $\text{tg}\delta$ приведены к температуре 20 °С.

В заключение следует сказать, что даже приближенная оценка состояния изоляции трансформатора по величине $\text{tg}\delta$ имеет очень большое значение и измерения $\text{tg}\delta$ широко распространены во всем мире. Приборы для измерения $\text{tg}\delta$ продолжают совершенствоваться. В качестве иллюстрации можно привести выпуск малогабаритного переносного прибора типа ИТП-1М для измерения $\text{tg}\delta$ объектов с малой емкостью, например линейных изоляторов. К изолятору прикладывается пилообразное напряжение с амплитудой 1500 В. Действующее значение напряжения 750 В. Прибор работает от сети и от встроенных химических источников тока.

9.5. Контроль изоляции по интенсивности частичных разрядов

Основной причиной старения изоляции при воздействии сильных электрических полей являются так называемые частичные разряды (ЧР). Они представляют собой локальные пробой ослабленных участков высоковольтной изоляции. Такими ослабленными или дефектными участками являются газовые включения. В процессе эксплуатации газовые включения могут возникнуть вследствие растрескивания или расслоения изоляции от механических нагрузок и вибрации или при разложении диэлектрика с выделением газов, например при сильном нагреве.

Газовые включения представляют собой слабые места в изоляции, так как газы имеют меньшую электрическую прочность, чем диэлектрик. Кроме того, относительная диэлектрическая проницаемость газов близка к единице, у диэлектриков же она значительно больше. Электрические напряженности в двух средах обратно пропорциональны их диэлектрическим проницаемостям. Следовательно, напряженность электрического поля в газовых включениях намного больше, чем в диэлектрике. Это приводит к тому, что в газовых включениях при некотором значении напряжения происходит пробой. Этот пробой не является полным, поскольку размеры газовых включений составляют малую часть от полной толщины изоляции, и оставшаяся изоляция служит барьером, включенным последовательно с газовым промежутком. Поэтому такие пробой называют не полными, а частичными пробоями или частичными разрядами. Хотя энергия, рассеиваемая при единичном ЧР невелика, однако многократное повторение ЧР постепенно приводит к разрушению диэлектрика. Скорость разрушения зависит от того, как часто повторяются ЧР и какая энергия рассеивается в каждом единичном ЧР.

Для выяснения особенностей развития ЧР воспользуемся схемой замещения изоляции с газовым включением (рис. 9.11). На схеме обозначены:

R_B, C_B — сопротивление утечки и емкость газового включения; R_G, C_G — сопротивление утечки и емкость барьера, т. е. участка изоляции, расположенного последовательно с газовым включением; C_a — емкость всей остальной изоляции.

Срабатывание разрядника Р имитирует пробой газового включения. Его пробивное напряжение равно пробивному напряжению $U_{пр}$ газового включения. Резистор R условно изображает сопротивление канала разряда воздушного включения.

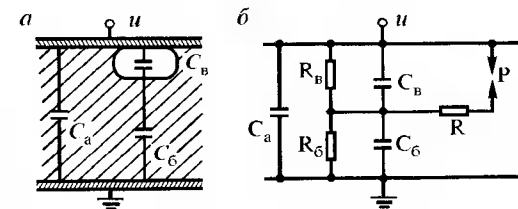


Рис. 9.11. Схема изоляции с газовым включением (а) и его схема замещения при ЧР (б)

При включении изоляции на переменное напряжение токи, текущие через конденсаторы C_B и C_6 , значительно больше токов, протекающих через резисторы R_B и R_6 . Поэтому токами утечки через резисторы R_B и R_6 , можно пренебречь и считать сопротивления резисторов R_B и R_6 равными бесконечности. Распределение напряжения по конденсаторам C_B и C_6 будет определяться емкостями этих конденсаторов.

Рассмотрим процессы на переменном токе с учетом такого допущения. Пусть с момента $t = 0$ на изоляцию воздействует переменное напряжение $u = U_M \sin \omega t$. Приложенное напряжение до возникновения ЧР распределяется по конденсаторам C_B и C_6 обратно пропорционально их емкостям:

$$U_B = U_M \frac{C_6}{C_B + C_6} \sin \omega t = U_{MB} \sin \omega t, \quad (9.15)$$

$$U_6 = U_M \frac{C_B}{C_B + C_6} \sin \omega t = U_{M6} \sin \omega t, \quad (9.16)$$

где $U_{MB} = U_M \frac{C_6}{C_B + C_6}$; $U_{M6} = U_M \frac{C_B}{C_B + C_6}$.

В момент t_1 напряжение u_B достигнет значения $U_{пр}$ и произойдет пробой разрядника Р, т. е. возникнет первый ЧР в газовом включении (рис. 9.12). При пробое напряжение на газовом включении практически мгновенно снижается до значения напряжения гашения $U_{г}$, при котором канал разряда обрывается, и ЧР гаснет. Экспериментально установлено, что $\eta = U_{г} / U_{пр} = 0,5-0,8$. Во время ЧР напряжение на газовом включении уменьшается скачком на величину $\Delta u_B = U_{пр} - U_{г}$, а напряжение на емкости барьера C_6 увеличивается скачком на эту же величину Δu_B (рис. 9.12).

После погасания первого ЧР напряжение на C_B вновь начинает возрастать, но теперь уже в соответствии с выражением:

$$U_B = U_{MB} \sin \omega t - \Delta u_B. \quad (9.17)$$

В момент t_2 напряжение u_B опять достигнет значения $U_{пр}$, и произойдет второй ЧР. Напряжение на C_B , как и при первом ЧР, скачком уменьшится на величину Δu_B , а на C_6 увеличится на ту же

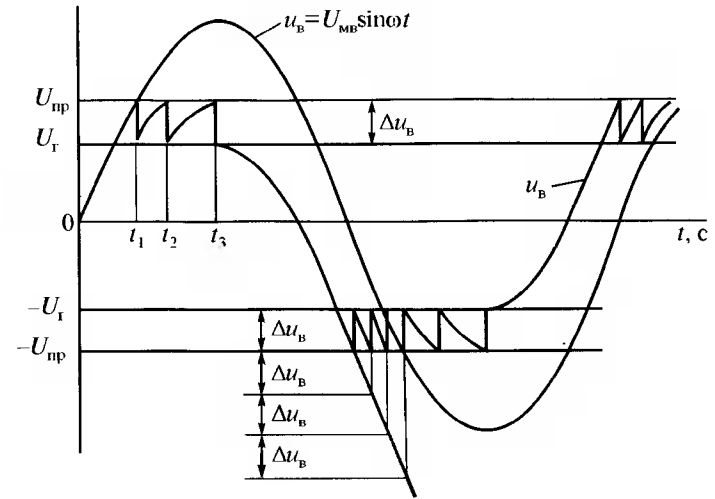


Рис. 9.12. Изменение напряжения u_B на газовом включении при ЧР в случае переменного напряжения

величину. После погасания ЧР напряжение на C_B будет изменяться по закону:

$$U_B = U_{MB} \sin \omega t - 2\Delta u_B.$$

При $t = t_3$ произойдет третий ЧР и т. д. ЧР будут следовать друг за другом так, как это показано на рис. 9.12, до тех пор, пока приложенное напряжение не достигнет максимального значения. После этого полярность напряжения на газовом включении меняется, и при достижении значения $u_B = -U_{пр}$ вновь возникают ЧР. Число ЧР за полпериода определится:

$$n_{T/2} = \frac{2U_{MB} - 2U_{г}}{\Delta U_B}. \quad (9.18)$$

Соответственно число ЧР в единицу времени будет равно:

$$n_{\approx} = 2n_{T/2}f = 4f \frac{U_{MB} - U_{г}}{\Delta U_B} = 4f \frac{U_{MB} - U_{г}}{U_{пр} - U_{г}}. \quad (9.19)$$

Из формулы (9.19) следует, что минимальное число ЧР $n_{\approx \min}$ в единицу времени будет при

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{мв}} = U_{\text{м}} \frac{C_{\text{б}}}{C_{\text{б}} + C_{\text{в}}}. \quad (9.20)$$

Для промышленной частоты это минимальное число равно:

$$n_{\approx \min} = 4f = 4 \cdot 50 = 200.$$

Напряжение, при котором появляется это минимальное число ЧР, называют напряжением возникновения ЧР и обозначается $U_{\text{чр}}$. Действующее значение этого напряжения определится из формулы (9.20):

$$U_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{\sqrt{2}} \frac{C_{\text{в}} + C_{\text{б}}}{C_{\text{б}}}. \quad (9.21)$$

В изоляционной конструкции может быть несколько расположенных в разных местах газовых включений, имеющих разные размеры и пробивные напряжения, каждому из которых соответствует свое $U_{\text{чр}}$. В этом случае напряжение $U_{\text{чр}}$ для всей конструкции равно наименьшему из имеющихся, а суммарное число ЧР в единицу времени определяется выражением

$$N_{\approx} = \sum n_{\approx i}. \quad (9.22)$$

При работе изоляции на постоянном напряжении распределение напряжений по конденсаторам $C_{\text{в}}$ и $C_{\text{б}}$ совпадает с распределением напряжений по резисторам $R_{\text{в}}$ и $R_{\text{б}}$. Процессы в изоляции в этом случае протекают в соответствии с графиком, изображенным на рис. 9.13.

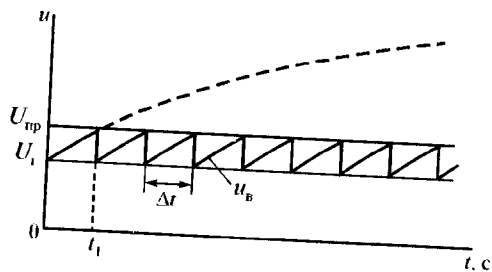


Рис. 9.13. Изменение напряжения $u_{\text{в}}$ на газовой изоляции при ЧР для постоянного напряжения

Пусть в момент $t = 0$ к изоляции прикладывается напряжение U_0 , причем

$$U_0 \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{б}}} > U_{\text{пр}}. \quad (9.23)$$

Постоянная времени внешней цепи мала, и поэтому напряжение на воздушном включении $u_{\text{в}}$ практически мгновенно возрастает до значения $U_{\text{пр}}$, и сразу возникает первый ЧР. После этого напряжение на воздушном включении практически мгновенно падает до величины $U_{\text{г}}$, и разряд гаснет. После прекращения ЧР напряжение на конденсаторе $C_{\text{в}}$ начинает расти в соответствии с выражением:

$$u_{\text{в}} = u_{\text{ву}} + u_{\text{всв}} = U_0 \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{б}}} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (9.24)$$

где $u_{\text{ву}} = U_0 \frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{б}}}$ — установившееся значение напряжения на воздушном промежутке в случае отсутствия пробоя в нем и определяемое по закону Ома для цепи постоянного тока; $u_{\text{всв}}$ — свободная составляющая; A — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий; $\tau = \frac{R_{\text{в}} R_{\text{б}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{б}}} (C_{\text{в}} + C_{\text{б}})$ — постоянная времени изоляции с газовым включением.

Подставив в уравнение (9.24) начальные условия $t = 0, u_{\text{в}} = U_0$, получим

$$U_0 = U_0 \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{б}}} + A. \quad (9.25)$$

Откуда найдем постоянную интегрирования

$$A = -U_0 \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{б}}} + U_0. \quad (9.26)$$

Следовательно, напряжение на воздушном промежутке будет изменяться по закону:

$$u_{\text{в}} = U_0 \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{б}}} - \left(U_0 \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{б}}} - U_0 \right) e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (9.27)$$

В момент t_1 напряжение на конденсаторе C_B достигнет значения $U_{пр}$ и произойдет второй ЧР. Далее процесс будет повторяться. Интервалы времени Δt между разрядами найдутся из соотношения:

$$U_{пр} = U_0 \frac{R_B}{R_B + R_G} - \left(U_0 \frac{R_B}{R_B + R_G} - U_{г} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}, \quad (9.28)$$

откуда

$$\Delta t = \tau \ln \frac{U_0 \frac{R_B}{R_B + R_G} - U_{г}}{U_0 \frac{R_B}{R_B + R_G} - U_{пр}}. \quad (9.29)$$

Для высоковольтной изоляции нормального качества постоянная времени τ составляет обычно несколько десятков секунд, а Δt — несколько секунд.

Число ЧР в единицу времени при постоянном напряжении будет равно:

$$n = \frac{I}{\Delta t}. \quad (9.30)$$

При постоянном напряжении число ЧР в единицу времени и, соответственно, разрушающий эффект от них будут на несколько порядков меньшими, чем при переменном напряжении. Поэтому, при прочих равных условиях, в изоляции, предназначенной для работы на постоянном напряжении, допустимы более высокие рабочие напряженности, и толщина изоляции может быть меньшей, чем при переменном напряжении.

Следует, однако, иметь в виду, что увлажнение и нагрев изоляции могут привести к снижению τ на несколько порядков и соответственно к резкому росту числа ЧР и темпов электрического старения. Поэтому защите от увлажнения изоляции аппаратов постоянного тока, контролю ее состояния и своевременной сушке должно уделяться особое внимание.

Энергия, рассеиваемая в газовом включении при единичном ЧР, определяется как разность энергий, запасенных в емкости C_B в моменты, предшествующие разряду и после его погасания:

$$W_{чр} = \frac{C_B U_{пр}^2}{2} - \frac{C_B U_{г}^2}{2} = \frac{C_B (U_{пр} - U_{г})(U_{пр} + U_{г})}{2} =$$

$$= C_B \Delta U_B \frac{(U_{пр} + U_{г})}{2} = q_B \frac{(U_{пр} + U_{г})}{2}, \quad (9.31)$$

где $q_B = C_B \Delta U_B$ — заряд, нейтрализующийся при ЧР в газовом включении.

Средняя мощность частичных разрядов в одном включении будет равна:

$$P_{чр} = W_{чр} n, \quad (9.32)$$

где n — число ЧР, определяемое по формуле (9.19) или (9.30) в зависимости от вида воздействующего напряжения.

При многократном повторении ЧР поверхность включения постепенно разрушается, на ней появляются локальные углубления. Затем разряды концентрируются в этих углублениях, последние со временем растут, образуя в диэлектрике узкие разветвленные каналы-щели. По мере удлинения каналов электрическая прочность изоляции снижается. Процесс завершается полным пробоем изоляции по пути, подготовленному длительным действием ЧР.

Энергия $W_{чр}$ и мощность $P_{чр}$ являются важнейшими характеристиками ЧР, определяющими разрушающий эффект и скорость старения изоляции. Однако даже в случае относительно мощных и заведомо опасных для изоляции ЧР величины $W_{чр}$ и $P_{чр}$ настолько малы, что их непосредственное измерение затруднительно или невозможно. Поэтому в качестве меры интенсивности ЧР вместо $W_{чр}$ и $P_{чр}$ используют другие величины, пропорциональные им и удобные для измерения. Рассмотрим их.

При ЧР в газовом включении нейтрализуется заряд:

$$q_B = C_B (U_{пр} - U_{г}) = C_B \Delta U_B, \quad (9.33)$$

где ΔU_B — скачок напряжения на газовом включении.

Во время ЧР в цепи возникает переходный процесс, при котором напряжение между электродами диэлектрика скачкообразно изменяется на величину ΔU . Этому скачку соответствует изменение заряда, равное:

$$q_{чр} = \Delta U C_x, \quad (9.34)$$

где C_x — полная емкость изоляции.

Величина $q_{чр}$ называется *кажущимся зарядом* и может быть измерена по данным измерения ΔU и C_x . Кажущийся заряд пропорционален энергии единичного ЧР и по рекомендации Международ-

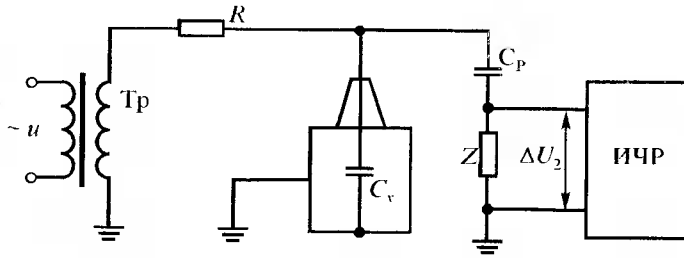


Рис. 9.14. Принципиальная схема измерения интенсивности ЧР в испытуемой изоляции: Тр — испытательный трансформатор; R — защитное сопротивление; C_x — емкость объекта испытания; C_p — разделительный конденсатор; Z — измерительное сопротивление; ИЧР — индикатор частичных разрядов

ной электротехнической комиссии (МЭК) принят в качестве меры интенсивности единичного ЧР. Схема для измерения интенсивности ЧР приведена на рис. 9.14. Параллельно объекту измерения через разделительный конденсатор C_p подключают измерительное сопротивление Z , падение напряжения ΔU_Z с которого подается в специальный прибор, называемый индикатором частичных разрядов ИЧР.

Зная ΔU и C_x , определяют кажущийся заряд ЧР. Практикой установлено, что ЧР с кажущимся зарядом 10^{-12} — 10^{-11} Кл не могут вызвать быстрого разрушения изоляции, они называются начальными ЧР. Частичные разряды с кажущимся зарядом 10^{-8} — 10^{-7} Кл называются критическими. Они резко сокращают срок службы изоляции, поэтому в процессе длительной эксплуатации недопустимы.

Пример. В изоляции с газовым включением, представленной схемой замещения на рис. 9.11, емкость газового включения C_B составляет 10^{-9} Ф. Емкость участка изоляции, расположенного последовательно с газовым включением (емкость барьера) составляет 10^{-10} Ф, а емкость всей остальной изоляции $C_A = 10^{-8}$ Ф. Газовое включение пробивается, когда напряжение на нем достигает значения $U_{пр} = 900$ В. Разряд гаснет при напряжении $U_r = 450$ В. Определить изменение напряжения на испытуемой изоляции, если испытательное напряжение, приложенное к ней в момент ЧР, составляет 10 кВ. Определить заряд, нейтрализующийся в газовом включении, и кажущийся заряд.

Решение. Заряд, нейтразуемый в газовом включении при ЧР, равен:

$$\Delta q = C_B(U_{пр} - U_r) = 10^{-9}(900 - 450) = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл.}$$

Уменьшение напряжения на емкости C_B на величину $\Delta U_B = 900 - 450 = 450$ В вызывает увеличение напряжения на C_B на величину $\Delta U_B - \Delta U_x$, где ΔU_x — спад напряжения на объекте. При этом с емкости C_A на емкость C_B переместится заряд:

$$q = C_B(\Delta U_B - \Delta U_x) = C_A \Delta U_x.$$

Следовательно, напряжение на емкости C_A изменится на величину:

$$\Delta U_x = \frac{C_B \Delta U_B}{C_A + C_B} = \frac{10^{-10} \cdot 450}{10^{-8} + 10^{-10}} \approx 4,5 \text{ В.}$$

Емкость всей изоляции равна:

$$C_x = C_A + \frac{C_B C_B}{C_B + C_B} = 10^{-8} + \frac{10^{-9} 10^{-10}}{10^{-9} + 10^{-10}} \approx 10^{-8} \text{ Ф.}$$

Кажущийся заряд:

$$q = C_x \Delta U_x = 10^{-8} \cdot 4,5 = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл.}$$

Для измерения интенсивности ЧР можно использовать также и схему, показанную на рис. 9.6. Сигнал с измерителя И1 подается на компьютер, где он обрабатывается специальным образом. На экране дисплея выводится гистограмма ЧР.

Для обследования изоляции находящегося в эксплуатации высоковольтного электрооборудования (трансформаторы, газовые выключатели, линии электропередач и др.) применяют комбинацию электрического и акустического замеров. Это позволяет локализовать места возникновения ЧР, даже когда оборудование находится в металлическом корпусе (рис. 9.15).

Устройство содержит приемник электромагнитных излучений 1 и акустический приемник 2. Сигналы с обоих приемников подаются на входы регистрирующего устройства 3, в качестве которого используют осциллограф. Вход приемника электромагнитных излучений подключен к индуктивному датчику 4, а вход акустического приемника — к датчику акустического сигнала 5. Пер-

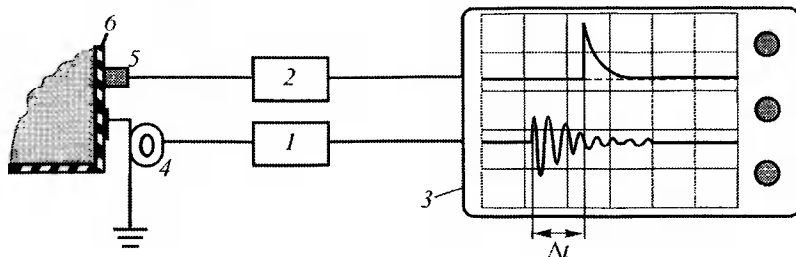


Рис. 9.15. Устройство с электромагнитным и акустическим приемниками для измерения ЧР

Второй датчик регистрирует импульс тока через заземлитель. Второй датчик накладывают на металлический корпус *б* электрооборудования. Критерием обнаружения места возникновения ЧР внутри металлического корпуса является разность времен Δt прохождения электромагнитного и акустического сигналов ЧР от места возникновения ЧР до соответствующих приемников. Скорость электромагнитных волн (скорость света) больше скорости распространения звука. Поэтому сначала приходит электромагнитный сигнал, вызванный импульсом тока, а затем через промежуток времени Δt приходит акустический сигнал.

Чем дальше от стенки металлического корпуса находится источник ЧР, тем больше промежуток времени Δt . Следовательно, зная скорость распространения звука в известной среде и время Δt , можно определить расстояние места ЧР до стенки бака. Располагая датчики акустического сигнала спереди, сбоку и сверху, можно определить все три координаты x , y и z места ЧР.

9.6. Испытание изоляции повышенным напряжением

Экономические показатели работы систем электроснабжения во многом зависят от надежности изоляции электрооборудования. Требуемая надежность изоляции обеспечивается выбором рациональной конструкции при проектировании, использованием высоко-

качественных изоляционных материалов и совершенных технологических процессов при изготовлении, а также периодическими испытаниями изоляции повышенным напряжением в процессе эксплуатации.

Основная идея проверки качества изоляции повышенным напряжением весьма проста. К изоляции прикладывается испытательное напряжение, превышающее рабочее. Если изоляция нормального качества, она выдерживает испытание, если дефектная — пробивается или перекрывается по поверхности. Испытание повышенным напряжением позволяет выявить дефекты изоляции, не обнаруживаемые другими способами. Общий недостаток таких испытаний состоит в том, что дефектная изоляция необратимо разрушается, и ее уже, как правило, нельзя отремонтировать.

Действительное определение электрической прочности изоляции при испытаниях повышенным напряжением не делается, так как для этого нужно было бы разрушить изоляцию. При испытании определяется лишь наличие некоторого запаса прочности изоляции, т. е. ее способности выдерживать номинальное напряжение и отдельные перенапряжения. Если запас прочности исчерпан, то в работе или при испытании изоляции возможен ее пробой. Поэтому испытание изоляции повышенным напряжением является весьма ответственной операцией, требующей учета всех факторов, влияющих на результаты испытаний и могущих вызвать погрешности при их проведении.

Экономическая целесообразность испытания как средства повышения надежности состоит в том, что затраты на его проведение и стоимость ремонта или замены отбракованных конструкций оказывается меньше ущерба от аварий, который был бы причинен при пробое не отбракованной дефектной изоляции. В связи с высокой стоимостью высоковольтной изоляции такая система может быть экономически эффективной только при очень малом числе бракуемых изделий. Поэтому использование системы контроля не снижает требований к качеству изготовления высоковольтных изоляционных конструкций. Готовые изоляционные конструкции, предназначенные для работы в установках высокого напряжения, подвергаются приемо-сдаточным испытаниям на заводе-изготовителе и на месте эксплуатации после монтажа. В процессе эксплуа-

тации изоляционные конструкции также подвергаются периодическим профилактическим испытаниям повышенным напряжением, с помощью которых выявляются дефекты в изоляции, вызванные ее естественным старением в результате длительной работы.

Эффективность испытаний, или вероятность правильного выявления дефектной изоляции при контроле, не является сто- процентной. Она зависит от методики испытаний, от выбора норм отбраковки и периодичности их проведения. При уменьшении интервала времени между испытаниями эффективность контроля растет, однако увеличиваются и расходы, связанные с их проведением.

При высокой стоимости испытаний и незначительном ущербе от аварий периодический контроль может стать экономически невыгодным. Однако это не означает, что периодический контроль вообще нецелесообразен, так как в ряде случаев только испытания повышенным напряжением могут выявить дефекты в изоляции. Кроме того, проведения периодических испытаний повышенным напряжением требуют и правила техники безопасности.

Чтобы показать, как влияет периодичность профилактических испытаний на их эффективность, рассмотрим простейшую модель таких испытаний. С начала эксплуатации или после испытаний, не зафиксировавших дефектов, в изоляции с течением времени из-за непредусмотренных внешних воздействий или ошибочных действий персонала возникают дефекты. Полагая, что условия эксплуатации остаются неизменными, можно принять постоянным среднее число дефектов α в единицу времени (рис. 9.16). Например, считать, что за каждый год в изоляции появляется α дефектов. Каждый из

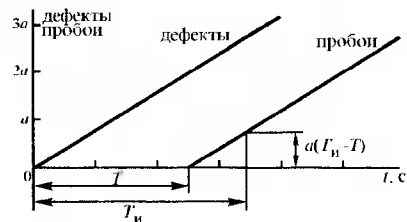


Рис. 9.16. Зависимость дефектов и пробоев изоляции от времени

дефектов через определенное время T , называемое средним сроком службы дефектной изоляции, вызывает пробой изоляции. Будем полагать, что если испытания проводятся через интервалы времени $T_n < T$, то в изоляции не происходит пробоев дефектных мест, а при $T_n > T$, пробой будет. К моменту очередных испытаний

T_n в изоляции будет αT_n дефектов, причем $\alpha (T_n - T)$ из них не «доживут» до очередных испытаний, вызвав аварийные пробой изоляции. Остальные дефекты будут отбракованы во время испытаний.

Если затраты на проведение испытаний повышенным напряжением равны C_n , а средний ущерб от одной аварии при внезапном выходе из строя изоляции равен C_a , то суммарные затраты, отнесенные к единице времени, будут равны:

$$z = \frac{C_n}{T_n} + \frac{\alpha(T_n - T)C_a}{T_n} = C_n^1 + C_a^1. \quad (9.35)$$

где C_n^1 и C_a^1 — удельные затраты на испытания и на ущерб от аварий.

Чтобы найти минимум затрат, приравняем к нулю первую производную выражения (9.35) по T_n :

$$\frac{dz}{dT_n} = -\frac{C_n}{T_n^2} + \frac{\alpha C_a T_n - \alpha(T_n - T)C_a}{T_n^2} = 0. \quad (9.36)$$

Если $C_n = \alpha C_a T$, то условие (9.36) будет соблюдаться при любых $T_n > T$.

Если $C_n > \alpha C_a T$, т. е. при высокой стоимости испытаний и незначительном ущербе от аварий или при очень малом числе дефектов, возникающих в единицу времени, условие (9.36) не может быть выполнено, и минимум затрат соответствует $T_n = \infty$. Следовательно, периодический контроль для обнаружения случайно образовавшихся в изоляционной конструкции дефектов в этом случае экономически невыгоден.

Если $C_n < \alpha C_a T$, то минимум затрат будет при $T_n = T$.

Полная математическая модель периодического контроля изоляции, учитывающая, в частности, и возможность ошибочных выводов по результатам испытаний, пока еще не разработана из-за больших трудностей определения статистической связи между контролируемыми параметрами и остающимся сроком службы. В настоящее время объем, методы и нормы испытаний устанавливаются на основании многолетнего опыта соответствующими стандартами, техническими условиями и Правилами технической эксплуатации электроустановок.

При испытаниях повышенным напряжением проверяется способность изоляции выдерживать грозовые и внутренние (комму-

тационные) перенапряжения, т. е. кратковременная электрическая прочность. В связи с этим форма и величина испытательных напряжений устанавливаются такими, чтобы они были эквивалентны по воздействию соответствующим перенапряжениям.

Испытания внешней изоляции проводятся при переменном напряжении частотой 50 Гц, при постоянном напряжении, а также при полном и срезанном грозовых импульсах и при коммутационных импульсах.

Поскольку в результате испытания изоляция оказывается либо пробитой, если она была дефектной, либо не пробитой, если она была бездефектной, рассмотрим в первом приближении механизм пробоя изоляции.

На разрядное напряжение внешней изоляции — воздушных промежутков и поверхности изоляторов — при постоянных метеорологических условиях оказывают влияние случайные факторы, связанные с возникновением и развитием разряда. Разряд никогда не может повториться в точности, он всегда имеет разные параметры и разные траектории разряда. Поэтому разрядное напряжение является случайной величиной, подчиняющейся статистическим закономерностям.

Эксперименты показывают, что разбросы значений разрядного напряжения внешней изоляции соответствуют нормальному закону распределения Гаусса. Дифференциальная и интегральная функции распределения вероятности разрядных напряжений, соответствующие нормальному закону, приведены на рис. 9.18. Дифференциальная функция распределения, или плотность вероятности, описывается выражением:

$$f(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(U-\bar{U})^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (9.37)$$

Интегральная функция распределения вероятности возникновения разряда при напряжении не больше чем U описывается выражением:

$$P(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U \exp\left[-\frac{(u-\bar{U})^2}{2\sigma^2}\right] du. \quad (9.38)$$

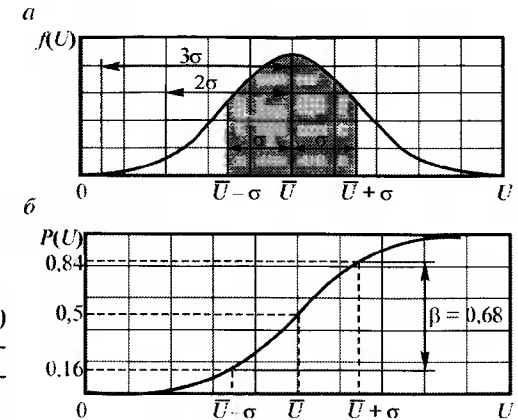


Рис. 9.18. Дифференциальная (а) и интегральная (б) функции распределения вероятности разрядных напряжений

где $\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$ — математическое ожидание разрядного напряжения или значение разрядного напряжения, соответствующего 50%-ной вероятности. Иногда

его обозначают U_{50} ; $\sigma = \sqrt{\frac{\sum(U-\bar{U})^2}{N-1}}$ — «сигма», среднеквадратическое отклонение разрядных напряжений от 50%-ного значения, являющееся мерой крутизны интегральной кривой распределения вероятностей или мерой рассеяния разрядных напряжений относительно математического ожидания; N — количество испытаний.

Статистическая оценка разрядных напряжений производится для внешней самовосстанавливающейся изоляции или для несамовосстанавливающейся изоляции, если разрядное (пробивное) напряжение определяют на основании испытания достаточного числа идентичных образцов, изготовленных по одной технологии.

Зная U и σ , можно рассчитать вероятность реализации заданных соотношений разрядных напряжений. Например, вероятность того, что разрядное напряжение будет находиться в «односигмовом» интервале $[\bar{U} - \sigma, \bar{U} + \sigma]$, составляет 0,6827. Вероятность нахождения разрядного напряжения в «двухсигмовом» интервале $[\bar{U} - 2\sigma, \bar{U} + 2\sigma]$ составляет 0,9545, а в «трехсигмовом» интервале — 0,9973.

Вероятность разряда при напряжении меньше «трехсигмового» интервала составляет:

$$\frac{1 - 0,9973}{2} = \frac{0,0027}{2} = 0,0014,$$

т. е. ничтожно мала. Поэтому для оценки наименьшего разрядного напряжения, т. е. выдерживаемого (фактического) напряжения с вероятностью 0,9986, можно использовать выражение:

$$U_{\min} = \bar{U} - 3\sigma.$$

При других значениях доверительной вероятности выдерживания следует использовать формулу:

$$U_{\min} = \bar{U} - n\sigma = \bar{U}(1 - nv). \quad (9.39)$$

где n — коэффициент заданной вероятности выдерживания испытательного напряжения. Для вероятности выдерживания 90 % он равен $n = 1,3$. $v = \frac{\sigma}{U}$ — коэффициент вариации (стандартное отклонение в относительных единицах).

Эффективность контроля изоляции повышенным напряжением при профилактических испытаниях в сильной степени зависит от величины испытательного напряжения [29].

Чтобы пояснить особенности этой зависимости, рассмотрим функции распределения пробивных напряжений $P_d(U_{пр})$ и $P_n(U_{пр})$ соответственно для дефектной и нормальной изоляции (рис. 9.19). Естественно, пробивные напряжения дефектной изоляции в среднем ниже, чем для нормальной. Важно, однако, обратить внимание на то, что имеется интервал пробивных напряжений $U_1 \ll U_{пр} < U_2$, в котором обе функции распределения отличны от нуля.

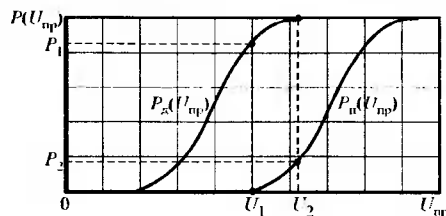


Рис. 9.19. Функции распределения пробивных напряжений дефектной (P_d) и нормальной (P_n) изоляции

При $U_{исп} = U_1$ часть дефектной изоляции выдержит испытания и не будет отбракована. Вероятность этого составит $1 - P_1$. При увеличении испытательного напряжения число невыявленных дефектов будет сокращаться, но вместе с этим начнут ошибочно пробиваться и конструк-

ции с нормальной изоляцией. При $U_{исп} = U_2$ вся дефектная изоляция будет пробита, но с вероятностью P_2 будет пробита часть нормальной изоляции. Очевидно, что наиболее целесообразное значение испытательного напряжения $U_{исп}$ должно находиться в интервале $[U_1 - U_2]$ и выбираться на основании технико-экономических расчетов по условию минимума суммарного ущерба от ошибочно отбракованной нормальной изоляции и от тех аварий, которые может вызвать невыявленная при испытаниях дефектная изоляция. При этом следует учитывать, что качество изоляции проверяется еще и другими методами, и, следовательно, некоторая часть дефектной изоляции может быть дополнительно обнаружена иными способами [26].

Контроль изоляции повышенным напряжением в условиях эксплуатации для электрооборудования с номинальным напряжением не выше 35 кВ, как правило, не вызывает затруднений. Для оборудования более высоких классов напряжения такой контроль затруднителен, так как источники испытательного напряжения становятся громоздкими и нетранспортабельными.

Рассмотрим подробнее испытания переменным и постоянным напряжением и испытание грозowymi импульсами.

При профилактических испытаниях для определения способности изоляции выдерживать внутренние перенапряжения используют как переменное напряжение промышленной частоты, так и постоянное испытательное напряжение. Последнее имеет ряд преимуществ перед переменным напряжением. Во-первых, отсутствует опасность появления мощных ЧР, поэтому испытательное напряжение может быть увеличено для лучшего выявления дефектов. Во-вторых, во время испытания можно измерять ток утечки и тем самым получать дополнительную информацию. В-третьих, для испытания постоянным напряжением могут быть использованы компактные испытательные установки относительно небольшой мощности, рассчитанные лишь на малые токи утечки. В случае же переменного напряжения требуется значительная реактивная мощность из-за больших емкостных токов через испытываемую изоляцию или устройства для компенсации реактивных токов.

Недостаток постоянного испытательного напряжения состоит в том, что оно распределяется по толщине изоляции согласно

удельным сопротивлениям, а не обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям изоляционных материалов, как при рабочем напряжении или при перенапряжениях. Поэтому отношение испытательных напряженностей к рабочим в отдельных диэлектриках получается существенно разным.

Установки высокого напряжения промышленной частоты воспроизводят условия работы электрической изоляции в нормальном режиме и при воздействии внутренних перенапряжений, связанных с переходными процессами при включении и отключении электрических цепей при коротком замыкании на землю и между фазами. Возможные внутренние перенапряжения по величине близки к двойному номинальному значению, в соответствии с чем и определяется величина испытательного напряжения промышленной частоты.

Для определения соответствия изоляции нормированным испытательным напряжениям промышленной частоты применяются следующие методы:

- 1) метод испытания одноминутным напряжением;
- 2) метод определения среднего разрядного напряжения (для самовосстанавливающейся изоляции);
- 3) метод испытания нормированным напряжением при плавном подъеме.

Испытательное одноминутное напряжение прикладывается к изоляции однократно при нормированном значении в течение 1 мин. Критерием успешного испытания является отсутствие полного разряда на испытываемом объекте или недопустимых повреждений изоляции.

Определение среднего разрядного напряжения производится многократным приложением напряжения при плавном подъеме до полного разряда при каждом приложении напряжения. Результаты испытаний представляют серию из N значений разрядных напряжений U_r . Из этих значений разрядных напряжений определяется оценочное среднее значение разрядного напряжения U_{cp} и абсолютное значение среднего квадратичного отклонения (СКО) = δ . Разумеется, таким методом можно испытывать лишь внешнюю изоляцию высоковольтных аппаратов, например изоляторов, вводов и т. д.

Испытательное напряжение при плавном подъеме должно прикладываться к изоляции трехкратно. Интервал между приложениями напряжения должен быть не менее 1 мин. Критерием успешного испытания является отсутствие полных разрядов на испытываемом объекте при всех трех приложениях напряжения.

Величины нормированных испытательных напряжений для электрооборудования, находящегося в эксплуатации, устанавливаются Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей. Электрооборудование в энергосистемах испытывают в соответствии с утвержденными нормами испытания.

Электротяговое оборудование электрифицированных железных дорог имеет номинальное напряжение, в большинстве случаев отличающееся от ряда напряжений для общепромышленного электрооборудования. Это обстоятельство, а также существенные отличия условий работы вынуждают устанавливать для электротягового оборудования испытательные напряжения, отличные от испытательных напряжений для общепромышленного электрооборудования.

Испытание грозowymi импульсами напряжения позволяет проверить способность изоляции противостоять грозвым перенапряжениям. Грозвые разряды вызывают появление кратковременных импульсов тока и напряжения с крутым фронтом. Максимальное значение напряжения составляет несколько мегавольт, максимальный ток достигает значения 200 кА при длительности несколько микросекунд.

Для того чтобы упростить испытания различных аппаратов высокого напряжения и иметь возможность сравнивать полученные результаты, испытательные напряжения и токи нормированы по значению и форме. За нормированные импульсы принимаются:

- 1) стандартный полный грозвой импульс;
- 2) импульс, срезанный на фронте;
- 3) импульс, срезанный на спаде.

Полный грозвой импульс напряжения представляет собой одиночный аperiodический импульс напряжения по возможности без колебательных составляющих. Он характеризуется максимальным значением напряжения U_m , длительностью фронта τ_ϕ и длительностью импульса τ_H .

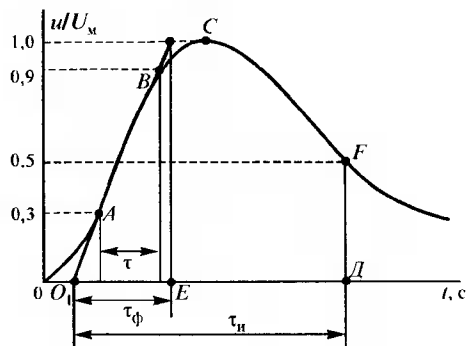


Рис. 9.20. Полный грозовой импульс

Форма полного грозового импульса показана на рис. 9.20. Там же показано, как определяются параметры этого импульса: значение U_m , длительность фронта τ_ϕ и длительность импульса τ_i . За значение испытательного напряжения полного грозового импульса принимают максимальное значение напряжения импульса. Длительность фронта τ_ϕ определяется как отношение времени τ между точками A и B , соответствующими 0,3 и 0,9 от U_m , к относительному изменению напряжения за это время, т. е.

$$\tau_\phi = \frac{\tau}{0,9 - 0,3} = \frac{\tau}{0,6} = 1,67\tau. \quad (9.40)$$

Графически начало полного импульса O_1 и конец фронта импульса E находятся по точкам пересечения прямой, проведенной через точки A и B , с горизонталями, проведенными на уровнях $u = 0$ и $u = 1,0$.

Длительность полного грозового импульса τ_i определяется как интервал времени между условным началом импульса в точке O_1 и моментом, когда напряжение на спаде импульса понизится до половины максимального значения (точка D).

В соответствии с рекомендациями МЭК у стандартного импульса длительность фронта τ_ϕ должна быть равна 1,2 мкс, а длительность импульса τ_i — 50 мкс. Кратко такой импульс обозначается 1,2/50. Для отдельных параметров импульса допускаются сравнительно большие отклонения:

$\pm 3\%$ для U_m , $\pm 5\%$ для наложенных вблизи максимума колебаний;

$\pm 30\%$ для τ_ϕ (т. е. 0,36 мкс) и $\pm 20\%$ для τ_i (т. е. 10 мкс).

В соответствии с этими допусками стандартный импульс 1,5/40, нормированный в США, находится в пределах принятого в евро-

пейских странах импульса 1/50. При испытании объектов, имеющих большую емкость, допускается увеличение длительности фронта импульса до 3 мкс, а иногда и больше.

Испытания грозovým импульсом проводятся только в сухих условиях, поскольку дождь и загрязнения при таких кратковременных воздействиях, как грозовые импульсы, практически не влияют на значение разрядных напряжений. Вероятность разряда при заданном напряжении определяют как отношение числа импульсов, при которых произошел разряд на объекте, к общему числу приложенных импульсов.

В отличие от испытаний переменным напряжением при испытании грозowymi импульсами наблюдается зависимость разрядного напряжения от времени действия импульса, называемая вольт-секундной характеристикой изоляции (см. рис. 5.2). Дело в том, что развитию самостоятельного разряда предшествуют: время ожидания t_c эффективного электрона, называемое статистическим временем запаздывания разряда, время t_ϕ — формирования разряда и холостое время t_x , т. е. время подъема напряжения до значения пробивного напряжения. Полное время разряда t_p определяется

$$t_p = t_c + t_\phi + t_x.$$

Если длительность приложенного к промежутку импульса меньше времени разряда, то пробой не произойдет, хотя значение напряжения, достаточным для этого при длительном воздействии напряжения. Составляющие времени t_c и t_ϕ уменьшаются с увеличением напряжения. Поэтому чем выше напряжение, тем меньше время разряда.

В связи с этим, наряду с испытанием изоляции полным импульсом 1,2/50 мкс, нормировано испытание и короткими импульсами, которые получают из полного импульса с помощью среза на фронте (рис. 9.21) или на спаде (рис. 9.22). Напряжение в момент среза обозначают U_c . Предразрядное время τ_c определяется как интервал времени между условным началом импульса O_1 и моментом среза (точка O_2), т. е. моментом начала резкого изменения формы импульса напряжения вследствие его быстрого снижения. Предразрядное время должно быть не менее 2 мкс.

Длительность среза $\tau_{дс}$ определяется как время, превышающее в 1,67 раза интервал времени τ_1 между точками D и E , соответствующими 0,7 и 0,1 U_c .

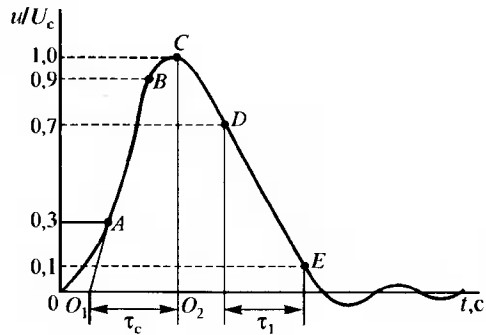


Рис. 9.21. Грозовой импульс, срезанный на фронте

Крутизна среза равна частному от деления напряжения в момент среза U_c на длительность среза $\tau_{дс}$. Испытания срезанными импульсами имитируют возможные в эксплуатации случаи пробоя воздушных промежутков на подстанциях вблизи от трансформаторов или реакторов, при которых наблюдается резкое снижение импульсного напряжения.

Возникающие при этом в обмотках трансформаторов или реакторов переходные процессы сопровождаются опасными для продольной изоляции этого оборудования перенапряжениями. Для определения соответствия изоляции нормированным испытательным значениям грозовых импульсов применяются следующие методы:

- 1) метод приложения трех импульсов испытательного напряжения;
- 2) метод приложения 15-ти импульсов испытательного напряжения;

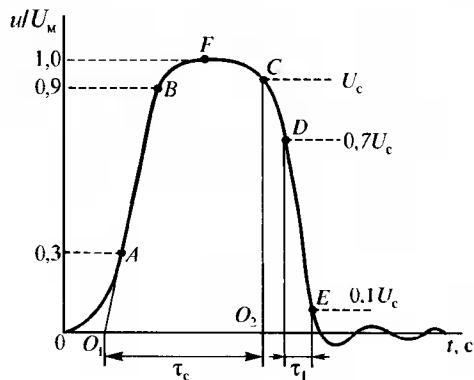


Рис. 9.22. Грозовой импульс, срезанный на спаде импульса

- 3) метод определения 50 %-ного разрядного напряжения.

Испытание несамовосстанавливающейся изоляции производится методом приложения трех импульсов нормированного испытательного напряжения. Критерием успешного испытания является отсутствие полного разряда или недопустимых повреждений.

Испытание самовосстанавливающейся изоля-

ции производится методом приложения 15-ти импульсов нормированного испытательного напряжения или методом определения 50 %-ного разрядного напряжения. Испытание методом приложения 15-ти импульсов считается успешным, если на испытываемом объекте произошло не более двух полных разрядов при каждой полярности напряжения.

Значение 50 %-ного напряжения определяется при испытаниях методом ступенчатого подъема или методом «вверх—вниз». При ступенчатом способе проведения испытаний к испытываемому объекту на каждой ступени прикладывается серия из 10—100 одинаковых по значению и по форме импульсов и определяются относительные числа (частоты) появления разрядов. Полученная опытным путем зависимость частоты появления разрядов от напряжения аппроксимируется функцией нормального закона распределения, и с помощью обычных приемов статистической обработки опытных данных определяется 50 %-ное значение напряжения и его среднеквадратическое отклонение σ . Когда σ заведомо известно и нормировано, испытание проводят по методике «вверх—вниз». В этом случае напряжение каждого последующего импульса напряжения увеличивается или уменьшается на одну ступень по сравнению с предыдущим импульсом, в зависимости от результатов приложения предыдущего импульса. Если наблюдался полный разряд, то напряжение последующего импульса уменьшается на одну ступень; если разряда не было — напряжение увеличивается. Ступень напряжения ΔU принимается равной (0,5—2,0) σ .

Испытание методом определения 50 %-ного разрядного напряжения считается успешным, если полученное значение 50 %-ного разрядного напряжения не менее чем в $1/(1-1,3) \sigma$ раз выше нормированного испытательного напряжения.

При испытаниях оборудования переменного тока на напряжения 330 кВ и более применяют коммутационные импульсы.

Испытания коммутационными импульсами напряжения проводятся при положительной и отрицательной полярности импульсов. Коммутационный импульс представляет собой аperiodический импульс (рис. 9.23). Время подъема импульса $\tau_{п}$ определяется как интервал времени между моментами, когда напряжение равно нулю (начало импульса O_1) и когда оно достигнет своего макси-

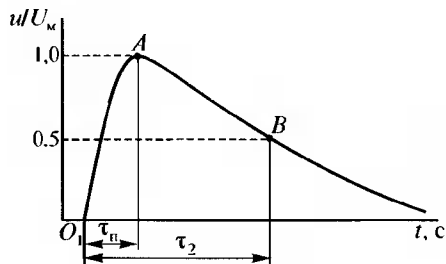


Рис. 9.23. Аперриодический коммутационный импульс

импульс обозначается 250/2500 мкс. Наряду с импульсом аперриодической формы применяют коммутационный импульс колебательной формы (рис. 9.24). За значение разрядного напряжения принимается максимальное значение напряжения импульса. Допуск на максимальное значение импульса равен $\pm 3\%$. За значение разрядного напряжения в случае разряда на объекте принимается максимальное значение напряжения срезаемого импульса, если разряд произошел на максимуме напряжения и за ним, и напряжение в момент разряда (среза), если разряд произошел на подъеме напряжения (фронте). Для определения соответствия изоляции нормированным испытательным напряжениям применяют те же методы, что и при испытании грозвыми импульсами.

Испытания линейной изоляции проводят также затухающими колебательными импульсами 400/7500 мкс. Испытания изоляторов

проводятся в сухом состоянии и под дождем. Допускается замена испытаний коммутационными импульсами испытанием переменным напряжением.

Рис. 9.24. Колебательный коммутационный импульс

мального значения (точка *A*). Длительность импульса τ_2 определяется как интервал времени между началом импульса O_1 и моментом, когда напряжение понизится до половины максимального значения.

Время подъема напряжения до максимума составляет 250 ± 50 мкс. Длительность импульса составляет 2500 ± 500 мкс. Кратко такой

Кроме рассмотренных электрических методов контроля состояния изоляции высоковольтного электрооборудования применяют и неэлектрические методы. Из многих неэлектрических методов контроля акустических, оптических, химических и др. — рассмотрим два метода: акустический и газохроматографический.

9.7. Акустический метод контроля качества фарфоровых опорно-стержневых изоляторов

Акустический метод используется в приборе «МЕТАКОН-ЭКСПРЕСС», предназначенном для контроля высоковольтных фарфоровых опорно-стержневых изоляторов с чугунными фланцами. Прибор позволяет обнаружить скрытые дефекты в фарфоре и дефекты армирования (недостаточную связь фарфора с фланцем). Прибор может использоваться при профилактических осмотрах и ремонтных работах, а также для входного контроля вновь поступающих изоляторов.

Диагностика изоляторов, осуществляемая прибором, основана на подробном анализе спектральных характеристик собственных колебаний изолятора, возникающих при легких (дозированных) ударах специальным ударником по фланцам и фарфору. Обследование производится на четырех уровнях — верхний и нижний фланцы, фарфор под верхним и над нижним фланцами.

Процесс обработки и анализа результатов обследования изолятора осуществляется автоматически непосредственно в приборе по специальной программе. Заключение по результатам обследования выводится на алфавитно-цифровой жидкокристаллический индикатор с указанием сорта изолятора и брака. Кроме того, дается численная оценка качества изолятора: чем выше качество изолятора, тем меньше число (табл. 9.4).

Таблица 9.4

Численные характеристики качества опорно-стержневых фарфоровых изоляторов

Сорт	1	2	3	Брак
Границы сорта	10—46	55—460	505—1900	2000—10000

В приборе могут быть выведены все численные значения основных параметров акустического сигнала, по которым определяется качество изолятора.

Прибор укомплектован ударником и пьезокерамическим датчиком с прижимом. Ударник состоит из стержня с бойком, пружины взвода и стопора, помещенных в тубус из алюминиевого сплава. Перед нанесением удара пружина сжимается до упора и фиксируется в этом положении стопором. Для нанесения удара по изолятору стопор освобождает нажатием на спусковую кнопку.

Обследуемый изолятор устанавливается вертикально на твердом основании. Специального крепления изолятора не требуется. Допускается обследование изоляторов в собранном виде на открытых распределительных устройствах при отключенной ошиновке. Пьезокерамический датчик устанавливается на среднюю юбку изолятора.

Прибор определяет только внутренние дефекты изолятора. Видимые внешние сколы юбок изолятора прибор не диагностирует. Поскольку изоляторы одного и того же типа, выпускаемые разными заводами-изготовителями, отличаются по акустическим характеристикам, то при их диагностике в приборе предусмотрен ввод указания на завод-изготовитель.

Прибор рассчитан на работу от автономного источника питания. Время обследования одного изолятора занимает не более 3 мин. Прибор зарегистрирован в отраслевом Реестре средств измерений, допущенных к применению на железнодорожном транспорте, в разделе «Средства измерений, применяемые в хозяйстве электрификации и электроснабжения».

9.8. Оценка состояния изоляции силовых трансформаторов по результатам газохроматографического анализа проб масла (ГХА)

В настоящее время в мировой энергетике повышается внимание к надежности работы оборудования энергосистем, в том числе силовых трансформаторов. Это связано со стремлением повысить рентабельность производства и распределения электроэнергии и снизить расходы на эксплуатацию парка оборудования. Прямым последствием этого явилось снижение капитальных вложений в об-

новление основного оборудования энергосистем и стремление как можно дольше эксплуатировать уже работающее оборудование. Это привело к тому, что во многих промышленно развитых странах мира, в том числе и в России, к 2000 г. доля оборудования, отработавшего нормативный срок службы, превысила половину.

С другой стороны, сегодня повышаются требования к качеству электроснабжения потребителей и надежности работы оборудования. Естественно, что требования повышения надежности работы противоречат желанию продлить срок службы установленного оборудования.

Одним из главных путей преодоления возникшего противоречия и поддержания эксплуатационной надежности в сложившихся условиях является организация эффективного контроля состояния работающего оборудования и в первую очередь силовых трансформаторов. Это связано с тем, что суммарная установленная мощность силовых трансформаторов в наших энергосистемах на всех уровнях напряжений за счет нескольких ступеней трансформации в 6—6,5 раз превышает установленную мощность генераторов.

Состояние изоляции трансформаторов может быть определено проверкой качества масла. Для этого используются результаты его физико-химического анализа. Анализ масла, выявляя продукты старения бумажной изоляции и разложения самого масла, позволяет установить наличие дефектов различных видов, особенно деградиацию изоляции. Периодический анализ проб масла из трансформаторов позволяет следить за динамикой процесса старения трансформатора и своевременно предпринимать меры по поддержанию его работоспособности.

Основным видом диагностики трансформаторов, выявляющим большинство дефектов, в настоящее время считается хроматографический контроль газов, растворенных в масле (ГХА). Важное достоинство метода состоит в том, что он не требует вывода из работы проверяемого оборудования.

Попытки по выделяемым газам определить вид дефекта в трансформаторе начались еще в 20-х годах прошлого столетия, и первым прибором для обнаружения выделения газа было газовое реле, устанавливаемое между баком и маслорасширителем. В реле имеются два поплавка — верхний и нижний.

Принцип действия газового реле основан на следующем. При всяком чрезмерном перегреве какой-либо части трансформатора на-

чинается разрушение его изоляции. В результате появляется некоторое количество газообразных продуктов распада, выделяющихся с большей или меньшей скоростью в зависимости от интенсивности теплового процесса. Образующийся газ поднимается вверх и частично задерживается в газовом реле. В нормальном состоянии все газовое реле заполнено маслом. При быстром выделении газа в трансформаторе он скапливается в верхней части газового реле и постепенно понижает уровень масла. Верхний поплавок опускается и замыкает цепь сигнализации. В том случае, если процесс выделения газа носит более интенсивный характер, уровень масла понижается быстрее. При этом срабатывает не только верхний, но и нижний поплавок, который дает сигнал на выключение трансформатора. Таким образом, газовое реле не только предупреждает о развитии дефекта и о грозящей аварии, но и выключает трансформатор до повреждения, исключая аварийный выход из строя. По сути, газовое реле было простейшим примером устройства непрерывного контроля состояния трансформатора.

Для более полного анализа состояния изоляции необходимо ответить на вопросы: какие газы каким дефектам соответствуют и можно ли по объему выделяющихся газов определить опасность дефекта? Многочисленные исследования, проведенные во многих лабораториях мира, дали положительные ответы на эти вопросы.

Обычно при ГХА анализируется концентрация следующих растворенных в масле газов: водорода H_2 , метана CH_4 , этана C_2H_6 , этилена C_2H_4 , ацетилена C_2H_2 , окиси углерода CO , диоксида углерода CO_2 . Кроме того, определяется отношение концентраций газов: ацетилен/этан, водород/метан, этилен/этан, диоксид/оксид углерода, ацетилен/водород.

По составу и концентрации газов, растворенных в масле, и их отношениям можно достаточно достоверно судить о характере дефекта, а по динамике изменения концентраций — о степени опасности этого дефекта. Такая многокритериальная диагностика требует компьютерной обработки результатов анализа. Программа обработки обеспечивает:

1. Определение причины и характера повреждения.
2. Определение периода для следующего анализа, составления графика отбора проб масла и оперативный контроль отбора проб.
3. Выдачу рекомендаций по эксплуатации трансформатора (рекомендуется провести полное испытание трансформатора, он ставится на контроль, учащенный контроль или выводится в ремонт).

По результатам ГХА все трансформаторы делятся на бездефектные трансформаторы и с предполагаемым развивающимся дефектом. По методике СИГРЭ процедура определения состояния трансформатора следующая [22].

Если все концентрации ниже нормальных, то результат обозначается кодом К1. Если хотя бы одна концентрация превысила норму, то результату присваивается код К2.

Если все отношения ниже указанных для них пределов, то результат обозначается кодом R1. Если какое-нибудь из отношений превышает пределы, то результат обозначается кодом R2. Далее интерпретация результатов ГХА производится в соответствии с табл. 9.5.

Таблица 9.5

Интерпретация результатов ГХА по кодам концентрации газов и их отношений

Код концентрации газов	Код отношения газов	Интерпретация результатов ГХА масла
К1	R1	Трансформатор, вероятнее всего, не имеет дефекта
К2	R1	Трансформатор, с большой вероятностью, имеет дефект, необходимы дополнительные анализы
К1	R2	Возможно наличие развивающихся дефектов, необходимы дополнительные анализы
К2	R2	Вероятно наличие более одного вида дефекта, необходимы дальнейшие обследования

Граничные концентрации растворенных в масле газов для трансформаторов напряжением 110—500 кВ приведены в табл. 9.6.

Таблица 9.6

Граничные концентрации растворенных в масле газов для трансформаторов напряжением 110—500 кВ, % объема

Газ	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Концентрация, %	0,01	0,01	0,001	0,01	0,005	0,02	$\frac{0,6(0,15)}{0,8(0,3)}$ *

* В числителе указаны данные для трансформаторов со свободным дыханием, находящихся в эксплуатации до 10 лет, а в знаменателе — свыше 10 лет. В скобках указаны данные для трансформаторов с азотной защитой.

Превышение граничной концентрации не является обязательным признаком аварийного состояния трансформатора. Этот критерий служит лишь основанием для постановки трансформатора на учащенный контроль. Дефекты трансформаторов, выявляемые с помощью ГХА, подразделяются на два типа: тепловые и электрические.

Тепловой тип дефекта — это перегревы различных частей трансформатора. При перегреве токоведущих соединений и элементов конструкции остова характерными газами являются: этилен, метан, водород. Сопутствующий газ — этан. При перегреве пропитанной маслом целлюлозной изоляции характерные газы — окись углерода и двуокись углерода. Концентрация этилена, метана, водорода постоянно увеличивается. Сопутствующий газ — этан. Ацетилен отсутствует.

Электрический тип дефекта связан с разрядами в изоляции. При дуговом разряде в масле, не затрагивающем твердую изоляцию, характерными газами являются ацетилен и водород. Сопутствующие газы — метан и этилен. При дуговом разряде, затрагивающем пропитанную маслом твердую изоляцию, характерные газы — ацетилен, водород, окись углерода. Повышается содержание метана. При частичных разрядах в масле характерными газами являются водород и метан. При частичных разрядах, воздействующих на пропитанную маслом твердую изоляцию, характерные газы — водород и метан. Сопутствующие газы — окись и двуокись углерода.

Более детальную информацию о типах развивающихся дефектов получают, используя критерий отношения концентрации газов. Диагностическая схема, составленная на основании рекомендаций МЭК, приведена в табл. 9.7.

Таблица 9.7

Диагностическая схема, составленная на основании рекомендаций МЭК

Вид дефекта	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Изоляция без дефекта, нормальное старение	< 0,1	0,1—1	≤ 1
Электрические дефекты			
Частичные разряды с низкой плотностью энергии (разряды в заполненных газом полостях, образованных вследствие плохой пропитки или большой влажности изоляции)	< 0,1	< 0,1	≤ 1

Вид дефекта	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Частичные разряды с высокой плотностью энергии, оставляющие следы при частичном пробое твердой изоляции	0,1—3	< 0,1	≥ 1
Разряды малой мощности (непрерывное искрение в масле между точками с разными потенциалами)	0,1—1	0,1—1	1—3
Разряды большой мощности (дуговые разряды, пробой масла между обмотками или между обмоткой и землей)	0,1—3	0,1—1	≥ 3
Тепловые дефекты			
Термический дефект низкой температуры 150 °С (перегрев изолированного проводника)	< 0,1	0,1—1	1—3
Термический дефект в диапазоне низких температур 150—300 °С (местный перегрев сердечника из-за концентрации магнитного потока)	< 0,1	≥ 1	< 1
Термический дефект в диапазоне средних температур 300—700 °С (то же, но при дальнейшем возрастании температуры «горячей точки»)	< 0,1	≥ 1	1—3
Термический дефект высокой температуры (перегрев масла из-за вихревых токов, плохих контактов, циркулирующих токов в сердечнике или баке)	< 0,1	≥ 1	≥ 3

Заметим, что развитие методов интерпретации ГХА масла продолжается. Дальнейшие исследования показали, что оценка старения твердой изоляции обмоток трансформатора достаточно уверенно производится по коэффициенту полимеризации DP (Degree of Polymerization). Однако его определение требует отбора твердой изоляции из наиболее нагреваемых частей обмотки и сопряжено со вскрытием бака, что, как правило, нежелательно, а в рабочем состоянии не реально. Поиск приемлемых путей оценки состояния изоляции во время работы трансформатора привел к двум новым методам: определению концентрации CO и CO₂ в масле с помощью газохроматографии, т. е. к выявлению газообразных продуктов разложения целлюлозы в процессе старения изоляции и

определению в масле фуранов — более высокомолекулярных продуктов разложения изоляции.

Фураны не выделяются в воздух из масла, а накапливаются в масле в течение всего срока службы изоляции. Поэтому по их содержанию можно оценивать остаточный срок службы трансформатора. Прямая связь концентрации фуранов в масле со старением изоляции отражает однозначное соответствие этой величины коэффициенту полимеризации DP, зависящему от деструкции целлюлозы при ее старении.

Коэффициент полимеризации DP показывает среднее число оставшихся неразрушенными колец глюкозы в молекулах целлюлозы твердой изоляции. Коэффициент полимеризации образцов изоляции, отобранных из трансформаторов, монотонно снижается с увеличением их срока службы. Коэффициент полимеризации в настоящее время является основным оценивающим параметром при испытании целлюлозной изоляции на старение. Новая изоляция имеет коэффициент полимеризации порядка 1000. При нормальном состоянии изоляции он находится в пределах 600—800. Для непригодной к работе изоляции его значение составляет 200, или 20 % от исходного значения. Зависимость концентрации фуранов от коэффициента полимеризации DP приведена в табл. 9.8.

Таблица 9.8

Зависимость концентрации фуранов от коэффициента полимеризации DP

Коэффициент полимеризации DP	750	520	350	160
Концентрация фуранов, мг/л	0,1	1,0	10	100

Этот метод контроля не требует отключения трансформатора и его вскрытия. Поэтому он широко распространен в нашей стране и за рубежом. Следует отметить, что для разных типов изоляции связь коэффициента полимеризации с концентрацией фуранов различная. Так, обычный электрокартон выделяет фуранов на два порядка меньше, чем термостойкая трансформаторная бумага. Выделение фуранов зависит от режима старения бумаги (температура, технология изготовления бумаги) и от конструкции трансформатора. Исследования в этом направлении продолжаются.

Перспективным является анализ газов из газового реле трансформаторов. Отбор проб производится при срабатывании газового реле на сигнал. Далее с помощью диагностических методов определяют объем, место и характер дефекта. В этих случаях контролируется содержание не успевших раствориться в масле газов, и оперативность реакции системы контроля на возникший дефект по этому показателю выше, чем по содержанию растворенных в масле газов.

В заключение отметим, что газохроматический анализ масла производят не только для трансформаторного оборудования, но и для маслонаполненных кабельных линий.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как поддерживают необходимую степень надежности изоляции в эксплуатации?
2. В чем сущность обслуживания по наработке и по реальному состоянию?
3. Какие существуют методы контроля изоляции с использованием явления абсорбции? Как определяется заряд абсорбции?
4. В чем заключается метод «емкость—температура»?
5. В чем заключается метод «емкость—частота»?
6. Каков принцип действия прибора контроля влажности изоляции?
7. Как формулируется условие равновесия моста переменного тока для измерения $\text{tg}\delta$? Как измеряют $\text{tg}\delta$ с помощью моста переменного тока?
8. Что такое «ионизационная кривая»?
9. Чем отличается «нормальная» и «перевернутая» схемы измерения $\text{tg}\delta$?
10. Как возникают частичные разряды?
11. Как определяют число ЧР в единицу времени при переменном напряжении?
12. Как определяют число ЧР в единицу времени при постоянном напряжении?
13. Как определяют мощность ЧР?
14. Что такое кажущийся заряд? Как измеряют интенсивность ЧР?
15. Как зависят дефекты и пробой изоляции от времени?

16. Как определить оптимальный срок периодических испытаний изоляции повышенным напряжением?
17. Как определяют величину испытательного напряжения?
18. Какими параметрами характеризуется полный и срезанный грозовой импульс?
19. Какими параметрами характеризуется аperiodический и колебательный коммутационный импульс?
20. В чем сущность акустического метода контроля состояния опорно-стержневых фарфоровых изоляторов?
21. Как диагностируется состояние изоляции силовых трансформаторов с помощью ГХА?
22. Что такое коэффициент поляризации и что он характеризует?

10. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

10.1. Назначение испытательных установок

Чтобы электроустановки работали надежно, качество их изоляции периодически испытывают высоким напряжением. Если изоляция нормального качества, она выдерживает испытание, если же дефектная — пробивается.

При профилактических испытаниях для определения способности изоляции выдерживать внутренние перенапряжения используют как переменное напряжение промышленной частоты, так и постоянное испытательное напряжение.

Испытание переменным напряжением является основным способом определения запаса прочности как в заводских, так и в эксплуатационных условиях. Однако испытание объектов с большой емкостью, например кабелей, повышенным напряжением переменного тока потребовало бы источников напряжения большой мощности. При испытании напряжением постоянного тока мощность испытательной установки определяется только током сквозной проводимости, который, как правило, не превышает нескольких миллиампер. Незначительная величина рассеиваемой в диэлектрике мощности не вызывает теплового пробоя. Поэтому испытание постоянным током позволяет проверить запас прочности изоляции с точки зрения чисто электрического пробоя. Пробивное напряжение при постоянном напряжении обычно значительно выше, чем при переменном.

Для проверки способности изоляции выдерживать грозовые и внутренние коммутационные перенапряжения используют генераторы импульсных напряжений и токов.

Параметры испытательных напряжений для отдельных видов электрооборудования устанавливаются такими, чтобы они были эквивалентны по воздействию на них соответствующим перенапряжениям с учетом уровня срабатывания аппаратов защиты — вентильных разрядников и нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН). Методика испытаний и определения величины испытатель-

ных напряжений были рассмотрены в главе 9. Далее приведены схемы испытательных установок, позволяющие получить требуемые испытательные напряжения.

10.2. Установки высокого переменного напряжения промышленной частоты для испытания изоляции

Установки высокого напряжения промышленной частоты предназначены для испытания изоляции электрооборудования с целью координации ее электрической прочности со значениями воздействующих на нее внутренних перенапряжений с учетом уровня срабатывания защитных элементов. Главными элементами испытательных установок высокого напряжения промышленной частоты являются (рис. 10.1): высоковольтный испытательный трансформатор Т, устройство для регулирования первичного напряжения РН, устройство для измерения высокого напряжения ДН, аппаратура для защиты от пробоев и средства техники безопасности (на рис. 10.1 не показаны).

Особенностью испытательных трансформаторов по сравнению с силовыми являются более высокий коэффициент трансформации, малая мощность и ограниченное время включения. Вследствие этого они в большинстве случаев имеют меньший запас электрической прочности. Изоляция испытательных трансформаторов испытывается напряжением $(1,1 - 1,2)U_{ном}$, в то время как для силовых трансформаторов оно выше номинального более чем в 2 раза. Это позволяет выполнить испытательные трансформаторы более компактными. Получили распространение испытательные трансформаторы трех типов:

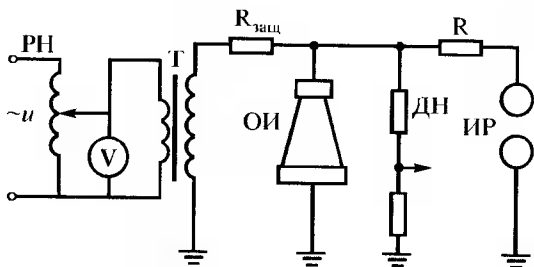
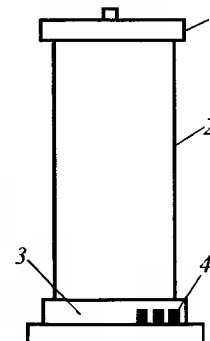


Рис. 10.1. Принципиальная схема испытания изоляции переменным напряжением частотой 50 Гц

Получили распространение испытательные трансформаторы трех типов:

Рис. 10.2. Испытательный трансформатор типа ТВО-140-50 напряжением 140 кВ и мощностью 5 кВА:
1 — верхний фланец — высоковольтный ввод; 2 — бакелитовый корпус; 3 — нижний фланец; 4 — клеммы низкого напряжения



1. В изолирующем бакелитовом корпусе с двумя фланцами-электродами, например ТВО-140-50 (рис. 10.2).

2. В металлическом корпусе с одним вводом, например ИОМ-100 и ИОМ-500 (рис. 10.3, а).

3. В металлическом корпусе с двумя вводами (рис. 10.3, б).

Трансформаторы с одним вводом, как правило, имеют одну многослойную цилиндрическую обмотку высокого напряжения. Изоляционные цилиндры разной длины расположены на магнитопроводе ступенями, и на каждом цилиндре намотан один слой обмотки — однослойный цилиндрический элемент (см. рис. 10.3, а). Элементы обмотки соединены последовательно. Низковольтный конец обмотки соединяют с корпусом и с землей непосредственно или через измерительный прибор (амперметр).

У трансформатора с двумя вводами обмотки высокого напряжения выполняются из двух ступенчатых секций (см. рис. 10.3, б).

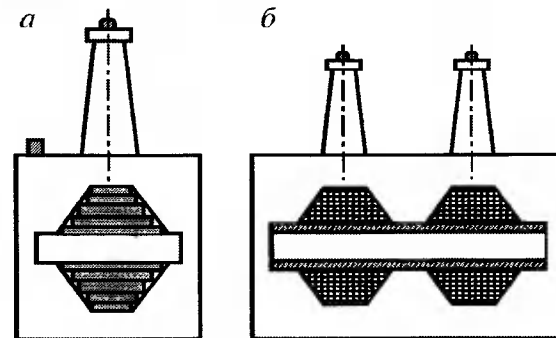


Рис. 10.3. Конструкция испытательного трансформатора в металлическом корпусе с одним вводом (а) и двумя вводами (б)

Средняя точка обмотки высокого напряжения электрически соединена с баком и с сердечником, поэтому вводы рассчитываются по $0,5 U_{\text{ном}}$ и имеют меньшие размеры и массу.

Сами трансформаторы устанавливаются на опорной изоляционной конструкции, также рассчитанной на напряжение $0,5 U_{\text{ном}}$. При испытании фазной изоляции один из выводов трансформатора заземляется, а при испытании междуфазной изоляции оба вывода соединяют с фазами испытываемого электрооборудования.

Рассмотрим подробнее процесс испытания изоляции переменным напряжением. Принципиальная схема испытания изоляции напряжением промышленной частоты приведена на рис. 10.1.

Испытательный трансформатор Т присоединяется к объекту испытания ОИ через защитный резистор $R_{\text{защ}}$, с помощью которого ограничивается до номинального значения ток при разряде на объекте, а также уменьшается крутизна среза напряжения на выводах трансформатора. Последнее важно для выравнивания распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора при срезе, т. е. для уменьшения перенапряжений на его изоляции. Величина защитного резистора выбирается из расчета 1 Ом на 1 В номинального напряжения испытательного трансформатора. У трансформаторов с большим рассеиванием роль защитного резистора играет внутреннее сопротивление трансформатора.

Параллельно объекту испытания подключен измерительный шаровой разрядник ИР, который может использоваться для измерения напряжения на объекте.

Шаровой разрядник ИР может служить и для защиты испытываемого объекта от случайного чрезмерного повышения напряжения. В этом случае пробивное напряжение разрядника настраивается на значение, равное 110—120 % испытательного. С целью демпфирования колебаний при разряде между шарами и уменьшения эрозии рабочих поверхностей шаров последовательно с ними включается балластный резистор R.

Напряжение на объекте испытания плавно изменяется с помощью регулятора напряжения РН. Регулятор напряжения должен обладать достаточной мощностью, обеспечивать необходимую плавность регулирования и стабильность напряжения, так как скачкообразное изменение напряжения может привести к преждевременному

пробоем или разряду. Кроме того, регулятор не должен допускать искажения синусоидальной формы высокого напряжения.

В качестве регулятора напряжения используются автотрансформаторы, жидкостные и проволочные реостаты и индукционные регуляторы. Наиболее простыми и доступными средствами регулирования являются автотрансформаторы (вариаторы) и реостаты. Однако наличие скользящих контактов снижает их надежность при коммутации больших токов. Бесконтактное и более плавное регулирование обеспечивают индукционные регуляторы. Они могут быть выполнены в виде заторможенной асинхронной машины с фазным ротором (потенциал-регуляторы) или в виде трансформатора со взаимно перемещающимися обмотками (схема Норриса).

Форма кривой напряжения на объекте испытания должна быть практически синусоидальной, т. е. суммарное напряжение высших гармоник в испытательном напряжении не должно превышать 5 % основной гармоники. Контроль формы напряжения производится с помощью делителя напряжения и осциллографа, которые могут использоваться также для измерения напряжения на объекте. Оба полупериода переменного напряжения по форме должны быть близки друг к другу. Частота напряжения должна быть от 45 до 65 Гц. Отношение амплитудного значения к действующему должно быть равно $\sqrt{2} \pm 5\%$. За значение испытательного напряжения принимается условное действующее значение напряжения, определенное делением измеренного амплитудного значения на $\sqrt{2}$.

При испытательных напряжениях ниже 150 кВ допускается определять значения испытательного напряжения по его измеренному действующему значению, если отношение амплитудного значения к действующему равно $\sqrt{2} \pm 2\%$. Действующее значение установившегося тока короткого замыкания на стороне высокого напряжения испытательной установки при напряжении испытания должно быть не менее 1 А. Это необходимо для того, чтобы пробой мог быть обнаружен и смогла бы сработать защита (автоматический выключатель на стороне низшего напряжения или реле максимального тока на стороне высшего напряжения).

10.3. Испытательные установки высокого постоянного напряжения

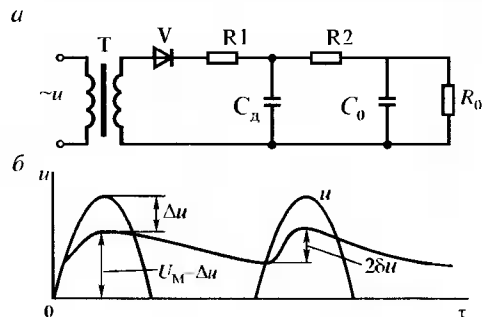
Испытательные установки высокого постоянного напряжения применяют для испытания объектов, имеющих большую емкость, например силовых кабелей. При испытании кабелей высоким постоянным напряжением уменьшается необходимая реактивная мощность. Высокое напряжение получают главным образом путем выпрямления переменного напряжения. Простейшая выпрямительная установка включает в себя высоковольтный трансформатор T и высоковольтный выпрямитель V (рис. 10.4, *a*). Качество выпрямленного напряжения характеризуется величиной пульсаций δU и падением напряжения в элементах цепи Δu (рис. 10.4, *b*). При испытаниях постоянным напряжением коэффициент пульсаций должен быть не более 3 %.

Однополупериодная схема выпрямления является простейшей схемой, недостаток ее — относительно большие пульсации напряжения. Однако за счет емкости объекта C_0 и дополнительной емкости C_d можно значительно снизить пульсации выпрямленного напряжения. Для снижения пульсаций необходимо соблюдение условия:

$$(C_d + C_0)R_0 \gg \frac{1}{f}, \quad (10.1)$$

где R_0 — сопротивление объекта испытания, f — частота питающей сети.

Значительно меньшие пульсации выпрямленного напряжения при тех же условиях в двухполупериодной (мостовой) схеме выпрямления (рис. 10.5).



В однополупериодной схеме выпрямления используют трансформатор с одним выводом. При

Рис. 10.4. Однополупериодная схема выпрямления (*a*) и форма выпрямленного напряжения (*b*)

двухполупериодной схеме выпрямления используют высоковольтные трансформаторы с двумя выводами, причем оба вывода должны быть изолированы на полное напряжение относительно корпуса. Обмотка высокого напряжения выполняется из двух трапециевидных секций. Основания секций имеют относительно стержня изоляцию на половину рабочего напряжения.

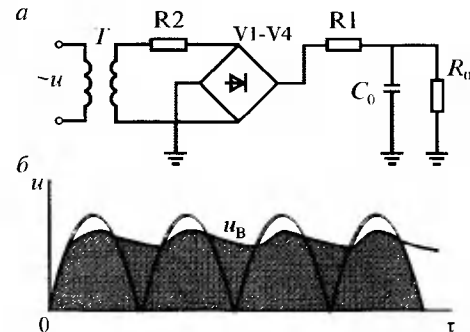


Рис. 10.5. Двухполупериодная схема выпрямления (*a*) и форма выпрямленного напряжения (*b*)

В качестве полупроводниковых выпрямителей используются селеновые и кремниевые выпрямители. При последовательном включении кремниевых выпрямителей параллельно им ставят шунтирующие резисторы и конденсаторы.

Наиболее часто на испытательных стендах используют аппарат для испытания изоляции АИИ-70. Аппарат типа АИИ-70 предназначен для испытания электрической прочности изоляции элементов электроустановок постоянным (выпрямленным) или переменным током высокого напряжения.

Аппарат имеет следующие технические данные.

Максимальное напряжение при испытании выпрямленным током 70 кВ, при испытании переменным током 50 кВ, напряжение питающей сети 127, 220 В, наибольший выпрямленный ток 5 мА, выходная одноминутная мощность высоковольтного трансформатора 2 кВА, время работы под нагрузкой 10 мин, интервал между включениями 3 мин.

Упрощенная принципиальная схема аппарата АИИ-70 приведена на рис. 10.6.

Напряжение через блок-контакты БД и предохранители ПР подается на регулятор напряжения РН. Высокое напряжение включается нажатием кнопки автоматического выключателя ВА, через который напряжение подается на первичную обмотку вы-

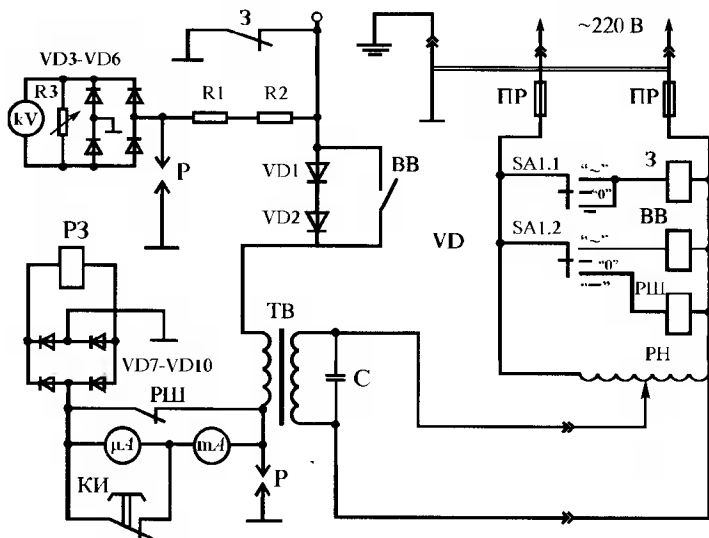


Рис. 10.7. Упрощенная принципиальная схема аппарата АИД-70

Конструктивно аппарат выполнен в виде переносного пульта и источника испытательного напряжения. Упрощенная принципиальная схема прибора приведена на рис. 10.7.

Напряжение питающей сети через предохранители ПР и магнитный пускатель (на схеме не показан) подается на регулятор напряжения РН. Магнитный пускатель включается только в том случае, если регулятор напряжения находится в нулевом положении. При установке переключателя SA1 в положение «~» или «—» срабатывает электромагнит замыкателя З. При этом замыкатель З отсоединяет высоковольтный вывод источника испытательного напряжения от земли. Высоковольтный выключатель BB срабатывает только в том случае, если переключатель SA1 установлен в положение «~». В этом случае высоковольтные выпрямители VD1 и VD2 шунтируются, и на выходе источника испытательного напряжения будет переменное напряжение.

Величина испытательного напряжения устанавливается вручную вращением ручки регулятора напряжения РН и контролируется киловольтметром кV. В качестве киловольтметра использу-

ется микроамперметр, подключенный через выпрямительный мост VD3-VD6 и делитель напряжения к выводу высоковольтного источника питания и проградуированный в киловольтах. Высоковольтное плечо делителя напряжения образовано резисторами R1 и R2, а низковольтное плечо — параллельным соединением резистора R3 и измерительного прибора кV. Резистор переменного сопротивления R3 служит для градуировки киловольтметра. При работе на выпрямленном напряжении, когда включено шунтирующее реле РШ и его контакты разомкнуты, ток нагрузки до 1000 мкА измеряется микроамперметром, а свыше 1000 мкА — миллиамперметром. Для измерения тока микроамперметром следует нажать кнопку КИ, шунтирующую микроамперметр. Подстроечные резисторы для калибровки измерителей тока на схеме не показаны. Для защиты аппарата от токов перегрузки служит реле защиты РЗ. При работе источника на выпрямленном напряжении реле РЗ срабатывает при токах нагрузки 13—14 мА, а при работе на переменном напряжении — при токах нагрузки 46—47 мА. При отключении аппарата замыкатель З соединяет вывод высоковольтного источника питания с «землей». Таким образом, происходит наложение заземления на испытуемый объект и источник испытательного напряжения. В случае испытания кабелей или объектов с большой емкостью после снятия напряжения их следует разряжать с помощью разрядной штанги, внутри которой смонтировано разрядное сопротивление. После этого переключателем SA1 можно отключать замыкатель З, т. е. накладывать заземление. Прежде чем отсоединить испытуемый объект от источника, необходимо визуально убедиться в том, что замыкатель З источника касается высоковольтного вывода. Градуировка киловольтметра аппарата производится один раз в год.

Изготовление трансформаторов на высокое напряжение с последующим выпрямлением затруднительно. Поэтому для получения высокого постоянного напряжения применяют схемы выпрямителей с умножением напряжения или просто умножители напряжения. Умножение напряжения трансформатора (удвоение, утроение и т. д.) осуществляется с помощью конденсаторов и выпрямителей. Принцип работы умножителей напряжения основан на использовании нескольких конденсаторов, каждый из которых заря-

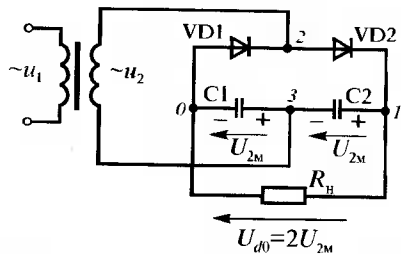


Рис. 10.8. Симметричная схема выпрямления с удвоением напряжения

жается от одной и той же обмотки трансформатора через соответствующий вентиль. По отношению к нагрузке конденсаторы оказываются включенными последовательно и их напряжения суммируются.

На рис. 10.8 представлена симметричная схема выпрямления с удвоением напряжения, в которой конденсаторы заряжаются поочередно в каждый полупериод.

Знаки зарядов емкостей таковы, что напряжения их складываются и между точками 0 и 1 напряжение равно $2U_{2м} = 2\sqrt{2}U_2 = 2,82U_2$. В реальных условиях (при нагрузке) это напряжение несколько меньше за счет разряда конденсаторов C1 и C2 на нагрузку. Пульсации выпрямленного напряжения имеют удвоенную частоту по отношению к частоте питающего напряжения. Обратное напряжение, которое должен выдерживать неработающий диод равно $2U_{2м}$. Следует отметить, что при заземлении одной точки испытуемого объекта, например точки 0, потенциал точки 2 на вводе трансформатора относительно заземленной точки изменяется от нуля до $2U_{2м}$, в то время как изоляция обмотки высокого напряжения трансформатора рассчитана только на напряжение $U_{2м}$. Поэтому такую схему применяют в тех случаях, когда можно заземлить среднюю точку 3. Это возможно, когда обе точки испытуемого объекта изолированы от «земли». В противном случае нужно иметь специальный трансформатор с повышенными изоляционными расстояниями или включать обмотку низшего напряжения через изолирующий трансформатор и изолировать корпус от земли. Поэтому представляют практический интерес те схемы умножения напряжения, в которых обеспечивается на вводах трансформатора изменение потенциала от нуля до U_2 , т. е. до напряжения, на которое рассчитана его обмотка ВН.

На рис. 10.9. изображена несимметричная схема удвоения напряжения, удовлетворяющая выше сформулированному условию. Напряжение на выпрямителе VD1 пульсирует от нуля до $2U_{2м}$. Оно используется для того, чтобы зарядить через выпрями-

тель VD2 конденсатор C2 до значения $2U_{2м}$, если не учитывать разряд конденсатора C2 на нагрузку. Работа выпрямителя в течение периода питающего напряжения делится на три стадии:

1) заряд конденсатора C1 через диод VD1 до напряжения $E_{2м} = U_{2м}$ (полярность ЭДС трансформатора в этот полупериод показана пунктирной стрелкой);

2) заряд конденсатора C2 через диод VD2 до напряжения $2U_{2м} = 2U_{2м}$ (полярность ЭДС на вторичной обмотке трансформатора в этот полупериод показана сплошной стрелкой). Двойное напряжение образуется за счет сложения ЭДС на вторичной обмотке трансформатора $E_{2м}$ и напряжения $E_{2м}$ на конденсаторе C1, так как они имеют одинаковые направления.

3) разряд конденсатора C2 на нагрузку.

Обратные напряжения на вентилях при холостом ходе достигают значения удвоенной амплитуды ЭДС трансформатора на вторичной обмотке, т. е. $2E_{2м}$. Частота пульсаций выпрямленного напряжения равна частоте напряжения питающей сети. В схеме возможно заземление соединенных вместе вывода нагрузки и трансформатора, что является положительным свойством схемы.

Принцип заряда конденсаторов пульсирующим напряжением $0-2U_{2м}$ дает возможность получить схемы многоступенчатого или многокаскадного умножителя напряжения (рис. 10.10). Напряжение на выходе умножителя, имеющего n ступеней, равно $2n U_{2м}$. Диоды в каскадном умножителе выбираются на напряжение $2U_{2м}$. При включении нагрузки в каскадном умножителе пульсация и падение напряжения резко возрастают (внешняя характеристика его крутопадающая). Поэтому умножители напряжения применяют для питания маломощных высоковольтных устройств, потребляющих незначительный ток (несколько миллиампер).

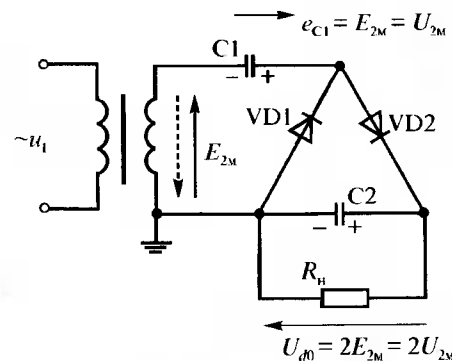


Рис. 10.9. Несимметричная схема удвоения напряжения

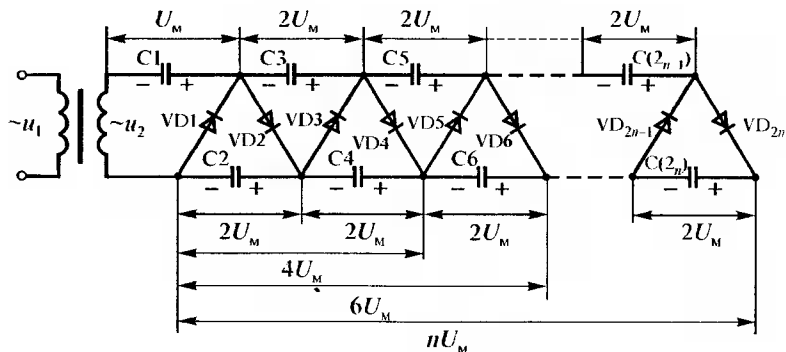


Рис. 10.10. Многокаскадный умножитель напряжения

Чтобы внешняя характеристика получалась более полой, для умножителя, имеющего n ступеней, рекомендуется выполнять неравенство:

$$C_1 > C_2 > C_3 \dots > C_n, \quad (10.2)$$

т.е. выбрать емкость конденсаторов из условия:

$$S^2 C_S = \text{const}, \quad (10.3)$$

где S — порядковый номер конденсатора в схеме; C_S — величина емкости конденсатора с порядковым номером S .

Следовательно, должно выполняться равенство:

$$C_1 = 2^2 C_2 = 3^2 C_3 = 4^2 C_4 \quad (10.4)$$

$$\text{или } C_1 = 4C_2 = 9C_3 = 16C_4 \text{ и т. д.} \quad (10.5)$$

Данное условие обеспечивает одинаковую энергию, накапливаемую во время работы схемы каждым из конденсаторов.

10.4. Генераторы импульсных напряжений

Генераторы импульсных напряжений (ГИН) служат для испытания изоляции электрооборудования грозowymi импульсами с целью координации электрической прочности изоляции с воздействующими на нее грозowymi перенапряжениями с учетом защитного уровня ограничителей перенапряжений. Испытания проводят-

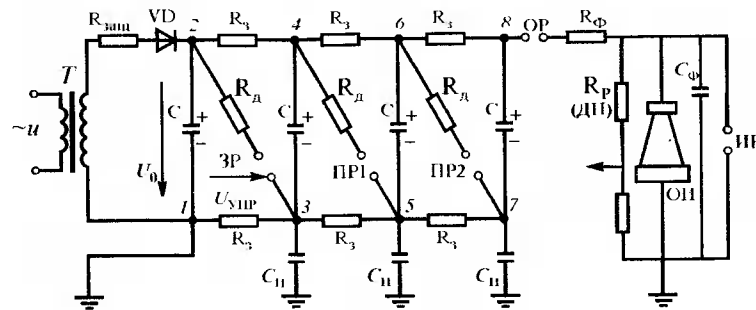


Рис. 10.11. Принципиальная схема многоступенчатого генератора импульсных напряжений

ся полными стандартными импульсами 1,2/50 мкс, а также срезанными импульсами при предразрядном времени 2—3 мкс.

ГИН представляет собой батарею конденсаторов высокого напряжения, работающих в режиме заряд-разряд и обеспечивающих при разряде весьма высокие импульсные напряжения. Конденсаторы в зарядном режиме включены параллельно, а в разрядном — последовательно. Переключение конденсаторов осуществляется с помощью искровых разрядников (обычно шаровых). Кроме того, ГИН включает в себя измерительное устройство и устройство для заземления и снятия остаточных зарядов с конденсаторов после окончания работы.

Рассмотрим схему многоступенчатого или многокаскадного ГИН (рис. 10.11.). Работа ГИН, как уже отмечалось выше, складывается из двух стадий: заряда и разряда. Длительность разряда в несколько миллионов раз меньше длительности заряда, чем и достигается большая мощность испытательного импульса.

Рассмотрим подробнее обе стадии работы ГИН. В стадии заряда конденсаторы C заряжаются от выпрямительной установки через защитный резистор $R_{\text{защ}}$ и зарядные резисторы R_3 . Резистор $R_{\text{защ}}$ предотвращает перегрузку трансформатора T и вентиля VD в первый момент, когда напряжения на конденсаторах равны нулю. Поскольку $R_{\text{защ}} \gg R_3$, то конденсаторы C практически ока-

зываются соединенными параллельно и одновременно заряжаются до одинаковых напряжений $U_0 = 150\text{--}200$ кВ. Полное время заряда ГИН достигает нескольких десятков секунд при сравнительно низких напряжениях и несколько минут — у ГИН на очень высоких напряжениях.

Если после заряда конденсаторов С на запальный разрядник ЗР подать от вспомогательной установки управляющий импульс напряжения пробоя $U_{\text{упр}}$, то произойдет пробой этого разрядника, а вслед за ним и лавинный пробой всех остальных промежуточных разрядников ПР. Этот лавинный пробой происходит следующим образом. После пробоя запального разрядника ЗР точка 3 принимает потенциал точки 2, т. е. U_0 , так как паразитная емкость $C_{\text{п}}$ точки 3 на землю практически мгновенно заряжается через небольшое сопротивление демфирующего (успокоительного) резистора $R_{\text{д}}$. Потенциал точки 5 будет изменяться гораздо медленнее в силу того, что точка 5 отделена от точки 3 сопротивлением резистора R_3 , причем R_3 гораздо больше чем $R_{\text{д}}$. Потенциал точки 4 после пробоя ЗР складывается из потенциала точки 3, равного U_0 , и напряжения на конденсаторе U_0 , т. е. составит $2U_0$. Следовательно, на первом промежуточном разряднике ПР1 после пробоя запального разрядника ЗР создается разность потенциалов, равная $2U_0$, и промежуточный разрядник ПР1 пробивается.

После пробоя ПР1 точка 5 получает потенциал $2U_0$, а в точке 6 потенциал повышается до значения $3U_0$, что приводит к срабатыванию разрядника ПР2. Аналогично срабатывают промежуточные разрядники всех ступеней ГИН. Процесс поочередного автоматического срабатывания искровых разрядников обеспечивает быстрый автоматический переход заряженных конденсаторов с параллельного соединения на последовательное, в результате чего напряжение конденсаторов суммируется и становится близким к значениям nU_0 (где n — число конденсаторов ГИН).

Под действием этого напряжения отсекающий разрядник ОР пробивается, и на объекте испытания ОИ возникает импульс высокого напряжения в несколько сотен тысяч и даже миллионов вольт. Напряжение на объекте испытания будет постепенно возрастать от нуля до максимума, а затем падает до нуля. Форма импульса напряжения была подробно рассмотрена в главе 9.

Величина напряжения импульса регулируется путем изменения зарядного напряжения конденсаторов U_0 . При этом, естественно, подлежит регулированию также и расстояние между электродами искровых промежутков. Регулирование осуществляется дистанционно.

Пуск ГИН может осуществляться и без управляющего импульса, подаваемого на ЗР. Если промежуток ЗР установить на пробивное напряжение, равное заданному значению U_0 , то ГИН будет «самостоятельно» срабатывать каждый раз, как только напряжение на конденсаторах достигнет значения U_0 . Напряжение $U_1 = nU_0$ называется суммарным зарядным напряжением ГИН.

Наибольшее суммарное зарядное напряжение, определяемое номинальным напряжением конденсаторов, является одной из паспортных величин ГИН ($nU_{\text{ном}}$). Другой паспортной величиной является наибольшее значение запасенной в ГИН энергии ($nCU_{\text{ном}}^2/2$).

Амплитуда импульса напряжения, создаваемого ГИН, определяется соотношением

$$U_{\text{м}} = \eta nU_0, \quad (10.6)$$

где η — коэффициент использования ГИН, который лежит в пределах 0,75—0,85.

Мощность зарядного трансформатора T (см. рис. 10.11) в первом приближении определяется средним значением удвоенной величины энергии, запасаемой в конденсаторах в единицу времени.

Анализ работы ГИН можно произвести с помощью упрощенной схемы замещения его при разряде без учета паразитных емкостей (рис. 10.12). В этой схеме

$$C_{\text{Г}} = \frac{C}{n} \text{ — емкость ГИН в разряде;}$$

$C_{\text{х}} = C_0 + C_{\text{п}} + C_{\text{ф}}$ — суммарная емкость, равная сумме емкостей объекта C_0 , соединительных проводов $C_{\text{п}}$ (паразитная емкость) и оборудования, подключенного параллельно объекту $C_{\text{ф}}$.

$R_{\text{ф}}$ — так называемое «фронтное» сопротивление, включаемое для увеличения длительности фронта импульса;

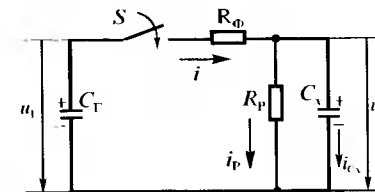


Рис. 10.12. Упрощенная схема замещения ГИН

R_p — разрядное сопротивление (им может быть делитель напряжения).

После замыкания ключа S , соответствующего пробоем искровых промежутков, в схеме возникает переходный процесс, в результате которого на выходе схемы появляется аperiodический импульс напряжения u_2 .

Система уравнений, составленных по законам Кирхгофа для послеконмутационной схемы имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} i &= i_p + i_{cx} \\ R_\phi i + u_2 &= u_1 \\ R_p i_p &= u_2 \\ i_{cx} &= C_x \frac{du_2}{dt} \\ u_1 &= -\frac{1}{C_r} \int i dt \end{aligned} \right\} \quad (10.7)$$

Выразим токи i_p и i через u_2 :

$$i_p = \frac{u_2}{R_p}; \quad i = \frac{u_2}{R_p} + C_x \frac{du_2}{dt};$$

подставим эти значения во второе уравнение системы (10.7):

$$R_\phi \left(\frac{u_2}{R_p} + C_x \frac{du_2}{dt} \right) + u_2 = -\frac{1}{C_r} \int \left(\frac{u_2}{R_p} + C_x \frac{du_2}{dt} \right) dt. \quad (10.8)$$

Продифференцируем уравнение (10.8):

$$\frac{R_\phi}{R_p} \frac{du_2}{dt} + R_\phi C_x \frac{d^2 u_2}{dt^2} + \frac{du_2}{dt} = -\frac{u_2}{C_r R_p} - \frac{C_x}{C_r} \frac{du_2}{dt} \quad (10.9)$$

и приведем подобные члены:

$$R_\phi C_x \frac{d^2 u_2}{dt^2} + \left(\frac{R_\phi}{R_p} + 1 + \frac{C_x}{C_r} \right) \frac{du_2}{dt} + \frac{u_2}{C_r R_p} = 0. \quad (10.10)$$

Разделим все члены уравнения (10.10) на $R_\phi C_x$ и получим приведенное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 u_2}{dt^2} + \left(\frac{1}{C_x R_p} + \frac{1}{R_\phi C_x} + \frac{1}{R_\phi C_r} \right) \frac{du_2}{dt} + \frac{u_2}{R_\phi C_x R_p C_r} = 0. \quad (10.11)$$

Решение дифференциального уравнения (10.11) будем искать, используя классический метод, в виде суммы установившейся и свободной составляющих:

$$u_2 = u_{2y} + u_{2св}. \quad (10.12)$$

Установившаяся составляющая, определяемая видом правой части уравнения (10.11), равна нулю, а свободная составляющая ищется в виде:

$$u_{2св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (10.13)$$

где A_1 и A_2 — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий (НУ); p_1 и p_2 — корни характеристического уравнения, соответствующего дифференциальному уравнению (10.11).

Корни характеристического уравнения можно приближенно определить, как:

$$p_1 = -\frac{1}{R_p C_r} = -\frac{1}{\tau_1}, \quad (10.14)$$

$$p_2 = -\frac{1}{R_\phi C_x} = -\frac{1}{\tau_2}. \quad (10.15)$$

Следовательно, напряжение u_2 на выходе ГИН будет изменяться по закону:

$$u_2 = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (10.16)$$

Постоянные интегрирования определим из НУ:

$$t = 0, \quad u_1 = nU_0, \quad u_2 = 0, \quad i_p = 0, \quad i = i_{cx} = u_1 / R_\phi.$$

Подставив НУ в уравнение (10.16), получим:

$$0 = A_1 + A_2. \quad (10.17)$$

Продифференцируем уравнение (10.16):

$$\frac{du_2}{dt} = -\frac{1}{\tau_1} A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{1}{\tau_2} A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} = \frac{i_{cx}}{C_x} \quad (10.18)$$

и подставим в него нуль:

$$-\frac{1}{\tau_1} A_1 - \frac{1}{\tau_2} A_2 = \frac{i_{cx(0)}}{C_x} = \frac{nU_0}{C_x R_\phi} = \frac{nU_0}{\tau_2} \quad (10.19)$$

Решая уравнения (10.17) и (10.19), определим A_1 и A_2 :

$$A_1 = \frac{nU_0 \tau_1}{(\tau_1 - \tau_2)}, \quad A_2 = -\frac{nU_0 \tau_1}{(\tau_1 - \tau_2)} \quad (10.20)$$

Следовательно, выходное напряжение ГИН будет изменяться по закону:

$$u_2 = \frac{nU_0 \tau_1}{(\tau_1 - \tau_2)} \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (10.21)$$

Кривая, построенная по уравнению (10.21), приведена на рис. 10.13. На основании проведенного анализа можно заключить, что скорость заряда емкости C_x через резистор R_ϕ (или постоянная времени $\tau_2 = R_\phi C_x$) определяет время нарастания напряжения u_2 ,

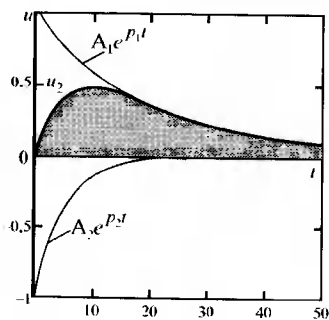


Рис. 10.13. Выходное напряжение ГИН

т. е. длительность фронта импульса t_ϕ . Скорость же разряда емкости C_x на сопротивление R_p (или постоянная времени $\tau_1 = R_p C_x$) определяет в основном длительность импульса t_u . Таким образом, длительность фронта и длительность импульса регулируют подбором фронтного резистора R_ϕ , разрядного резистора R_p и фронтной емкости C_ϕ .

Длительность импульса и длительность фронта импульса связаны с

параметрами схемы ГИН (при импульсах с крутым фронтом) соотношениями:

$$\tau_u \approx 0,7\tau_1 = 0,7R_p C_x; \quad (10.22)$$

$$\tau_\phi \approx 2,3\tau_2 = 2,3R_\phi C_x. \quad (10.23)$$

Отсюда следует, что стандартные грозовые импульсы генерируются при $\tau_1 = 71,5$ мкс и $\tau_2 = 0,5$ мкс.

Перед испытанием полным импульсом при напряжении, составляющем 50—60 % испытательного, с помощью делителя напряжения и осциллографа проверяется форма импульса, а также производится градуировка измерительного устройства. Затем напряжение импульса доводят до нормированного значения с точностью ± 3 %. Испытательное напряжение устанавливают с учетом атмосферных условий во время испытаний. Нормальными условиями считаются: температура $t_0 = 20$ °С; давление $P_0 = 101300$ Па (760 мм рт. ст.); абсолютная влажность $h_0 = 11$ г/м³.

10.5. Измерения при высоких напряжениях

Действующие значения установившихся постоянных или периодически изменяющихся напряжений, приложенных к испытываемому объекту, можно измерить с помощью электростатических вольтметров. Принцип действия электростатических вольтметров основан на использовании силы взаимодействия между двумя электродами в электрическом поле измеряемого напряжения. Для измерения широко используются вольтметр С-96 (для напряжений до 30 кВ) и С-100 (для напряжений до 75 кВ), имеющие погрешность не более 1,5 %.

Величину амплитудного напряжения можно измерить с помощью шарового разрядника. Сущность измерения высокого напряжения с помощью шарового разрядника заключается в том, что разряд в однородном или слабонеоднородном поле между двумя шаровыми электродами в воздухе возникает при определенном напряжении с малым разбросом и малым запаздыванием.

Разрядное напряжение при заданном диаметре шаров и способе их включения линейно зависит от расстояния между шарами.

Таким образом, с помощью шарового разрядника можно измерить амплитудное значение высокого напряжения.

Величины разрядных напряжений приведены в специальных таблицах, составленных на основании результатов обработки экспериментальных данных многих лабораторий мира. В табл. 10.1 приведены значения пробивных напряжений для шаровых разрядников при разных значениях диаметра шаров и расстояниях между ними.

В табл. 10.1 даны математические ожидания амплитудных значений пробивных напряжений переменного тока полных стандартных волн отрицательной полярности и для напряжений постоянного тока обоих полярностей.

Таблица 10.1

Пробивные напряжения $U_{пр}$ шаровых разрядников при заземлении одного из шаров

Расстояние между шарами d см	Пробивное напряжение в кВ при диаметре шаров D , см		
	2	5	15
0,05	2,8		
0,10	4,7		
0,20	8,0	8,0	
0,40	11,2	11,2	
0,50	14,4	14,3	16,8
0,60	17,4	17,4	19,9
0,80	20,4	20,4	26,0
1,0	25,8	26,3	31,7
1,2	30,7	32,0	37,4
1,5	(35,1)	37,6	45,5
1,6	(40,0)	45,5	48,1
2,0		48,1	59,0
2,4		57,5	70,0
2,8		65,5	80,5
3,0		(72,5)	85,5
4,0		(75,5)	110
5,0		(88,5)	133

Разрядное напряжение зависит от давления, температуры и влажности. В стандартных таблицах приводятся пробивные напря-

жения $U_{пр0}$, соответствующие нормальному давлению и нормальной температуре. Если давление p и температура t отличаются от нормальных, то величина пробивного напряжения $U_{пр}$ определяется по формуле:

$$U_{пр} = U_{пр0} \delta,$$

где $\delta = \frac{(273+t_0)p}{(273+t)p_0}$ — поправка на давление и температуру.

Формулой можно пользоваться, если величина δ колеблется в пределах 0,95—1,05. Влияние влажности в обычных условиях незначительно, поэтому ее часто не учитывают. Если влажность изменяется значительно, то вводят поправку и на влажность.

Для расстояний d между шарами до $0,5D$ (где D — диаметр шара) таблица дает значение разрядного напряжения с погрешностью, не превышающей $\pm 3\%$, а для расстояний от $0,5$ до $0,75D$ — с большей погрешностью. При расстояниях больших $0,75D$ измерения шарами производить не рекомендуется. Таким образом, при измерениях должно выполняться неравенство:

$$\frac{d}{D} \leq 0,75.$$

Для предохранения поверхности шаров от оплавления и эрозии, а также для подавления высокочастотных колебаний при пробоях, последовательно с шаровым разрядником необходимо включать добавочное сопротивление величиной $0,1$ — $1,0$ МОм (см. рис. 10.1).

Широкое применение шаровых разрядников для измерения высоких напряжений объясняется простотой их устройства и приемлемой для практики точностью. Однако точность измерения $\pm 3\%$ возможна только при строго сферической поверхности электродов. Диаметр шаров не должен отличаться от стандартного более чем на $\pm 0,1\%$. Поверхности шаров должны быть полированные, сухие и чистые.

При измерении импульсных напряжений следует учитывать влияние на точность измерения длительности импульса воздействующего напряжения, крутизны его фронта и полярности.

На практике бывают случаи, когда для измерения высокого напряжения переменного или постоянного тока используют вольтметр

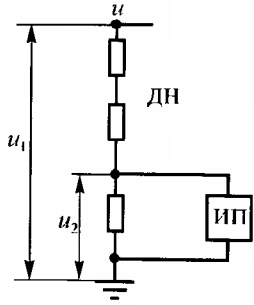


Рис. 10.14. Схема включения измерительного прибора ИП с делителем напряжения ДН

на стороне низшего напряжения высоковольтного трансформатора. Высокое напряжение определяют, умножая показания вольтметра на коэффициент трансформации, как это сделано в аппаратах АИИ-70. При этом могут возникнуть достаточно большие погрешности из-за влияния индуктивности трансформатора и потерь в стали, а также из-за наличия потока намагничивания. Чтобы исключить влияние этих факторов на точность измерения, испытательное напряжение следует измерять на стороне высокого напряжения непосредственно на объекте. Для таких измерений, особенно для испытания импульсным напряжением, служат делители напряжения с

подключенными к ним измерительными приборами. В качестве измерительных приборов используют цифровые или аналоговые вольтметры низкого напряжения. Для возможности оценки измеряемых величин с помощью осциллографирования также используют делители напряжения. Делители напряжения позволяют с помощью низковольтных измерительных устройств (вольтметров, осциллографов и др.) фиксировать практически неограниченные по амплитуде постоянные, переменные и импульсные напряжения (рис. 10.14). Ту часть делителя, параллельно которой включается измерительный прибор ИП, принято считать низковольтным плечом делителя. Остальную часть называют высоковольтным плечом делителя. Отношение напряжения на входе делителя U_1 к напряжению на измерительном приборе U_2 называется коэффициентом деления делителя: $K_d = \frac{U_1}{U_2}$.

Для обеспечения фиксации исследуемого процесса в высоковольтных установках без искажения делители напряжения должны удовлетворять следующим условиям:

- 1) при подключении к исследуемой схеме не оказывать влияния на амплитуду и форму измеряемого напряжения;
- 2) иметь коэффициент деления K_d , не зависящий от частоты и амплитуды измеряемого напряжения в рабочем интервале изменения этих величин, а также от изменения внешних атмосферных условий;

- 3) на элементах делителя не должна возникать корона, а токи утечки через изоляцию должны быть значительно меньше рабочего тока в цепи самого делителя.

Делители напряжения выполняют активными, емкостными и комбинированными. Для измерения выпрямленного или переменного напряжения промышленной частоты с успехом можно применять активные делители, изготовленные из проволочных или непроволочных резисторов. Для проволочных резисторов используют нихром, константан, марганец. Обязательным условием изготовления проволочных активных делителей напряжения является бифилярная намотка проволоки с целью уменьшения индуктивности делителя.

Для снижения погрешности в коэффициенте деления K_d , вызываемой утечками по изоляции и короной, сопротивление активного делителя принимается таким, чтобы протекающий через него ток был в пределах 1—10 мА. В тех случаях, когда не требуется большая точность измерения, для изготовления активных делителей напряжения применяются непроволочные резисторы композиционного типа. На переменном токе погрешность измерения в случае применения активных делителей резко возрастает из-за влияния паразитных емкостей.

Для измерения высоких напряжений промышленной частоты более часто используют емкостные делители, которые по сравнению с активными имеют меньшие размеры и стоимость. Важным достоинством емкостных делителей является незначительное влияние на их коэффициент деления k_d паразитных емкостей и ничтожное потребление активной энергии. В емкостных делителях напряжения наиболее часто используются конденсаторы с керамическими диэлектриками.

При использовании комбинированных делителей напряжения с целью неизменного коэффициента деления на разных частотах должно соблюдаться равенство постоянных времени для каждого из последовательно включенных элементов $\tau_1 = R_1 C_1 = \tau_2 = R_2 C_2 = \tau_3 = R_3 C_3$ и т. д. Чтобы уменьшение диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсаторов на высоких частотах не вызывало погрешности в измерении, делители следует комплектовать конденсаторами с одинаковым типом изоляции.

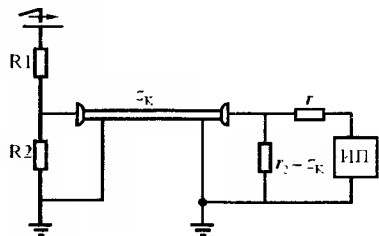


Рис. 10.15. Схема подключения измерительного прибора ИП к делителю напряжения через экранированный кабель

При испытаниях часто по условиям работы измерительный прибор ИП приходится располагать вдали от высоковольтного делителя напряжения. В этих случаях напряжение от низковольтного плеча делителя подводится к ИП экранированным кабелем. Подключение к делителю кабеля, обладающего заметной емкостью, и появление отражений импульса в конце кабеля вызывают неизбежное искажение регистрируемого

явления. В этом случае для сведения искажений к минимуму рекомендуется схема, показанная на рис. 10.15.

Для того чтобы отраженные сигналы отсутствовали, кабель на приемном конце нагружается на сопротивление r_2 , равное волновому сопротивлению кабеля: $r_2 = z_k$.

В этом случае создается режим согласованной нагрузки. Сопротивление r служит для успокоения колебаний в цепи измерительного прибора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие преимущества имеет постоянное испытательное напряжение перед переменным?
2. В чем заключается недостаток постоянного испытательного напряжения?
3. Каковы конструктивные особенности испытательных трансформаторов?
4. Из каких элементов состоит испытательная установка?
5. Какими параметрами характеризуется качество выпрямленного напряжения?
6. Как можно снизить пульсацию выпрямленного напряжения?
7. Как происходит удвоение напряжения?
8. Как выполняется многокаскадный умножитель напряжения? Для каких целей он предназначается?

9. Из каких стадий складывается работа генератора импульсных напряжений (ГИН)?

10. Как соединяются конденсаторы ГИН при заряде и при разряде?

11. Как записываются уравнения для схемы ГИН? Как они решаются?

12. Какими элементами схемы определяются длительность фронта импульса и длительность импульса?

13. Как производится запуск ГИН?

14. Как измеряется высокое напряжение шаровыми разрядниками?

15. Как вводится поправка пробивного напряжения при отклонениях давления и температуры от стандартных значений?

16. Какие делители напряжения применяют при измерениях высоких напряжений?

17. Какие мероприятия снижают искажения при измерении импульсных высоких напряжений?

11. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

11.1. Введение

Дисциплина «Электроизоляционные материалы» — это наука об электрических характеристиках электроизоляционных материалов и процессах в изделиях из этих материалов при воздействии на них сильных электрических и магнитных полей. Она включает в себя разделы из таких дисциплин, как «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), «Электрические измерения», «Математическая статистика» и др.

Главная цель дисциплины — обеспечение надежной работы высоковольтного электрооборудования. Надежность работы обеспечивается на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации.

Большое значение для обеспечения надежности на стадии проектирования и изготовления имеют экспериментальные исследования. Надежность в эксплуатации обеспечивается профилактическими испытаниями изоляции электрооборудования. Вот почему будущие инженеры электроэнергетических и электромеханических специальностей должны хорошо знать оборудование высоковольтных лабораторий, измерения на высоком напряжении, методы высоковольтных испытаний, а также методы математической обработки результатов испытаний и их оценку [19].

Практическое изучение этих вопросов происходит в лаборатории. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы студенты должны усвоить необходимый теоретический материал, ознакомиться с установкой для проведения опыта и подготовить таблицы для записи результатов опытов. Готовность к выполнению лабораторной работы проверяется преподавателем, который дает разрешение начать работу. Приступать к выполнению лабораторной работы без разрешения преподавателя категорически запрещается.

Лабораторные работы выполняются бригадой в количестве 2—3 человек.

Полученные в процессе работы данные необходимо тут же обрабатывать и строить графики, для того чтобы по ним контролировать правильность произведенных отсчетов и в случае необходимости повторить измерения. В присутствии преподавателя следует проанализировать полученные результаты и сделать выводы по работе.

Общие требования к отчету. Отчет по выполненным работам каждый студент бригады представляет индивидуально. Отчет должен быть оформлен в соответствии с Международной системой единиц СИ и ЕСКД.

Графическая часть выполняется на миллиметровой бумаге с помощью чертежных инструментов в формате А4 (210 × 297) или А5 (148 × 210). Диаграммы (графики) должны иметь наименование, поясняющее изображенную функциональную зависимость. Значения величин, связанных функциональной зависимостью, следует откладывать на осях координат в виде шкал. В качестве шкал используют координатные оси или линейки координатной сетки.

В прямоугольной системе координат независимую переменную (аргумент) следует откладывать по горизонтальной оси (оси абсцисс), а функцию этого аргумента — по вертикальной оси (оси ординат). Положительные значения величин откладывают на осях вправо и вверх от точки начала отсчета.

В диаграммах, изображающих несколько функций одной переменной, в качестве шкал используют прямые, расположенные параллельно оси ординат, на которые наносят делительные штрихи. Нуль следует указывать один раз у точки пересечения шкал.

Частоту нанесения числовых значений и промежуточных делений шкал выбирают с учетом удобства пользования диаграммой. Шкалы должны быть равномерными. Делительные штрихи, соответствующие кратным графическим интервалам, допускается удлинять. В конце шкалы вместо числа наносится единица измерения. Единицы измерения могут также указываться в виде дроби под символом, через запятую после символа или непосредственно на числовой оси между последним и предпоследним значением переменной.

Отчет по лабораторной работе должен включать в себя:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Перечень электроизмерительных приборов и их технические данные в соответствии с таблицей:

Наименование прибора	Тип	Система	Технические данные	Класс точности

4. Схемы соединений.
5. Порядок работы.
6. Таблицы измерений.
7. Расчетные формулы.
8. Пример расчета параметров для указанных преподавателем значений.
9. Графики.
10. Выводы по работе.

Техника безопасности при проведении лабораторных работ

Особенностью лабораторных работ является то, что они выполняются на установках высокого напряжения. Это обстоятельство обуславливает дополнительные требования к проведению лабораторных работ. В частности, необходимо выполнить организационные и технические мероприятия, обеспечивающие безопасность проведения работы.

К организационным мероприятиям относятся: вводный инструктаж по технике безопасности перед началом лабораторных работ с записью в журнале и инструктаж на рабочем месте перед началом каждой работы, а также допуск к работе и контроль во время работы.

По правилам техники безопасности в установках с напряжением выше 1000 В для возможного контроля за работой студентов на одного преподавателя должно быть не более восьми практикантов.

К техническим мероприятиям относятся: защитные ограждения, стационарные и переносные заземления, накладываемые на токоведущие части отключенных частей электроустановок, а также блокировка и сигнализация включения высокого напряжения.

При работе следует пользоваться исправными защитными средствами, прошедшими испытания в соответствии с ПТЭ.

Работы в высоковольтной ячейке производятся только после отключения напряжения и наложения переносного заземления на токоведущие части. Снимать переносное заземление можно только после окончания работы в ячейке.

Напряжение на испытательную установку следует подавать при установке регулятора напряжения в нулевое положение. Повышение напряжения должно производиться плавно поворотом ручки регулятора напряжения по часовой стрелке.

Студенты, нарушающие правила техники безопасности отстраняются от выполнения лабораторных работ.

11.2. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь различных диэлектриков при частоте 50 Гц с помощью моста переменного тока

11.2.1. Общие теоретические сведения

Основным электрическим свойством диэлектриков является их способность поляризоваться в электрическом поле. При поляризации происходит ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул.

В зависимости от свойств диэлектрика различают два основных вида поляризации:

1. Поляризация, совершающаяся в диэлектрике под воздействием электрического поля практически мгновенно, упруго, без рассеяния энергии, т. е. без выделения тепла.

2. Поляризация, совершающаяся в диэлектрике замедленно и сопровождающаяся рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. его нагреванием. Такой вид поляризации называют релаксационной.

Без рассеяния энергии протекают процессы при электронной и ионной поляризации. При всех остальных видах поляризации происходит нагревание диэлектрика.

Мерой поляризации является относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика ϵ_r , которую можно определить как отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком C к емкости того же конденсатора при замене диэлектрика вакуумом C_0 :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}.$$

Увеличение емкости конденсатора с диэлектриком можно объяснить увеличением заряда на пластинах конденсатора за счет зарядов на поверхности диэлектрика, обусловленных поляризацией.

Если поляризация связана с потерями, и диэлектрик поляризуется периодически, то для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле пользуются тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Значения $\text{tg}\delta$ нормируются правилами устройства электроустановок.

В идеальной диэлектрике без потерь вектор тока опережает вектор напряжения на угол $\varphi = 90^\circ$. В реальной диэлектрике с потерями вектор тока опережает вектор напряжения на угол φ меньший 90° , поэтому при рассмотрении вопросов, связанных с диэлектрическими потерями, конденсатор с реальным диэлектриком заменяют идеальным конденсатором с последовательно или параллельно включенным резистором (см. рис. 4.1). Углом диэлектрических потерь δ называется угол, дополняющий до 90° угол сдвига φ фаз между током и напряжением в активно-емкостной цепи.

В том случае если углы сдвига тока относительно напряжения и значения активной мощности обеих схем равны, то схемы при данной частоте эквивалентны друг другу.

Из векторных диаграмм можно определить выражения для $\operatorname{tg}\delta$. В параллельной схеме (см. рис. 4.1, а):

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_C} = \frac{x_p}{R} = \frac{1}{\omega C_p R}.$$

В последовательной схеме (рис. 4.1, б):

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_a}{U_C} = \frac{r}{x_s} = \omega C_s r.$$

Активная мощность в параллельной схеме:

$$P_p = UI \cos \varphi = UI_a = U \frac{U}{R} = U^2 \omega C_p \operatorname{tg}\delta.$$

Активная мощность в последовательной схеме:

$$P_s = UI \cos \varphi = U \frac{U}{Z} \frac{r}{Z} = \frac{U^2 r}{Z^2} = \frac{U^2 r}{x_s^2 + r^2} = \frac{U^2 r}{x_s^2 \left(1 + \frac{r^2}{x_s^2}\right)} = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}.$$

Для диэлектриков с хорошими электрическими свойствами $\operatorname{tg}\delta \ll 1$, и в этом случае рассеиваемая в диэлектрике мощность при последовательной схеме замещения будет равна:

$$P_s = U^2 \omega C_s \operatorname{tg}\delta.$$

Таким образом, выражение для рассеиваемой мощности будет одинаково для обеих схем $P = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta$. В обоих случаях в фор-

мулу для определения диэлектрических потерь мощности, затрачиваемой на нагрев диэлектрика в электрическом поле, входит тангенс угла диэлектрических потерь.

Определение ϵ_r и $\operatorname{tg}\delta$ может быть произведено с помощью моста переменного тока (моста Шеринга), принципиальная схема которого приведена на рис. 9.10. Для исследуемого диэлектрика принята параллельная схема замещения.

Изменяя значения R_3 и C_4 , добиваются равновесия моста, о чем судят по нулевому показанию гальванометра Г. После этого определяют значения C_x и $\operatorname{tg}\delta_x$.

$$\operatorname{tg}\delta_x = \omega R_4 C_4. \quad (11.1)$$

Если взять $R_4 = N \frac{10^6}{\omega}$ Ом, то тангенс угла диэлектрических потерь будет определяться:

$$\operatorname{tg}\delta_x = N \cdot 10^6 C_4. \quad (11.2)$$

Если емкость C_4 выразить в микрофарадах ($C_4 \cdot 10^{-6}$), то формула (11.2) упростится:

$$\operatorname{tg}\delta_x = N \cdot 10^6 C_4 \cdot 10^{-6} = N \cdot C_4, \quad (11.3)$$

где N — значение переключателя плеча R_4 , равное 0,1 или 1.

При угловой частоте $\omega = 314 \cdot 1/c$ значение сопротивления R_4 будет равно:

$$R_4 = N \frac{10^6}{\omega} = N \frac{10^6}{314} = N \cdot 3183 \text{ Ом.}$$

Значение емкости C_x :

$$C_x = C_N N \frac{R_4}{R_3} = C_N N \frac{3183}{R_3}. \quad (11.4)$$

Зная величину C_x конденсатора, можно определить ϵ_{rx} диэлектрика. Если измерена емкость плоского конденсатора, то ϵ_{rx} рассчитывается на основании формулы:

$$\epsilon_{rx} = \frac{C_x}{C_0}, \quad (11.5)$$

где $C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{h}$ — емкость плоского конденсатора с заданными размерами в вакууме; S — площадь пластины конденсатора в m^2 ; h — толщина испыты-

ваемого диэлектрика 4 в м (см. рис. 11.3); $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Если испытывается диэлектрик в цилиндрическом конденсаторе, то емкость цилиндрического конденсатора в вакууме рассчитывают по формуле:

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}},$$

где l — длина, r_1 и r_2 — радиусы внутреннего и внешнего электродов.

Диэлектрические потери могут быть рассчитаны на основании измеренных значений U , C_x и $\text{tg}\delta_x$.

Схема, представленная на рис. 9.10, называется «нормальной» схемой. Измерения по этой схеме производятся в том случае, когда оба электрода испытуемого объекта изолированы от «земли». Значения ϵ_{rx} и $\text{tg}\delta_x$ определяются как свойствами самого диэлектрика, так и влиянием внешних факторов температуры окружающей среды, влажности, величины приложенного напряжения и т. д.

Для оценки качества изоляции большое значение имеет характер зависимости $\text{tg}\delta_x$ от величины приложенного напряжения U . Зависимость $\text{tg}\delta_x = f(U)$ называется ионизационной характеристикой изоляции (см. рис. 9.9).

В диэлектриках, содержащих газовые включения, зависимость $\text{tg}\delta_x = f(U)$ имеет характерный излом, свидетельствующий о начале ионизации газа. Ионизация вызывает резкий рост $\text{tg}\delta_x$, разогревание диэлектрика, образование озона и окислов азота. Наличие воздушных включений создает неоднородность поля и уменьшает пробивное напряжение.

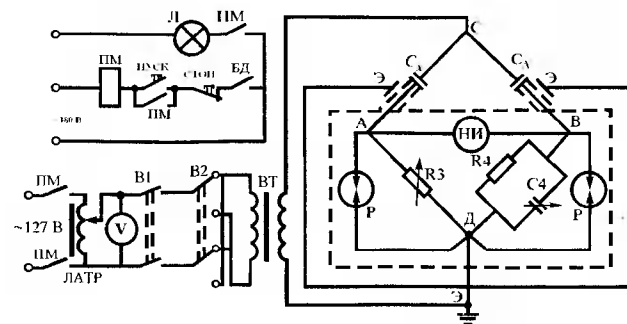
11.2.2. Краткие сведения о высоковольтном мосте переменного тока P5026

Мост предназначен для измерения C_x и $\text{tg}\delta_x$ при напряжениях до 10 кВ и содержит (рис. 11.1 и 11.2):

1) магазин сопротивлений R3 с тремя декадами (20×100 ; 9×10 ; 9×1 Ом) и плавнопеременным потенциометром с ценой деления 0,02 Ом;

2) магазин емкостей C4 с тремя декадами ($9 \times 0,1$; $9 \times 0,01$; $9 \times 0,001$ мкФ) и воздушным конденсатором переменной емкости с ценой деления 0,00005 мкФ;

Рис. 11.1. Принципиальная схема моста P5026



3) нуль—индикатор НИ, представляющий собой чувствительный транзисторный усилитель, на выходе которого включен стрелочный прибор — микроамперметр. Чувствительность нуль—индикатора меняется ступенями через 30 дБ ручкой «Чувствительность»;

4) переключатель «N» плеча R4, имеющий два положения: 1 и 0.1;

5) переключатель «A» пределов измерения и блокировочную кнопку «K» переключателя;

6) переключатель «B» полярности нуль—индикатора и знака, имеющий четыре положения $+\text{tg}\delta$ (1 и 2) и $-\text{tg}\delta$ (1 и 2);

7) образцовый конденсатор C_N емкостью 48,73 пФ;

8) электроды для испытания твердых диэлектриков, включающие в себя (рис. 11.3) измерительный электрод 3 с диаметром $D = 50$ мм, высоковольтный электрод 2, охранный электрод 7, груз 5 и подставку 1.

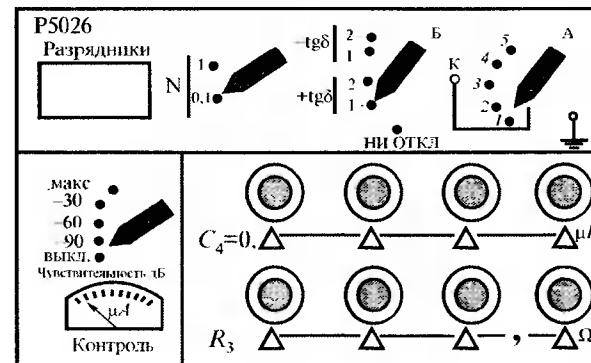


Рис. 11.2. Органы управления моста P5026

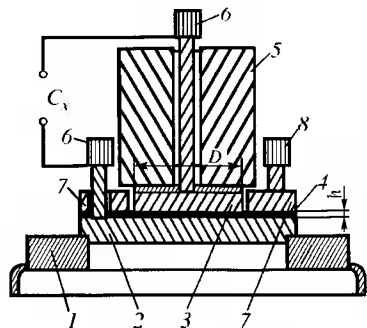


Рис. 11.3. Электроды для испытания твердых диэлектриков

Испытываемый диэлектрик 4 находится между двумя электродами 2 и 3. Зажимы 6 и 8 служат для подключения электродов к мосту;

9) для защиты работающих от высокого напряжения служат разрядники Р (см. рис. 11.1);

10) для контроля состояния элементов питания нуль-индикатора моста служит кнопка «Контроль». При ее нажатии стрелка микроамперметра должна отклоняться не менее чем на 30 мкА.

11.2.3. Задание на лабораторную работу

По указанию преподавателя выполнить 1-й или 2-й пункт задания.

1. Измерить с помощью моста переменного тока $\text{tg}\delta_x$ и C_x изоляции указанного преподавателем объекта при частоте 50 Гц и различных напряжениях. Сравнить измеренное значение $\text{tg}\delta_x$ с допустимым.

2. Определить ϵ_{rx} и $\text{tg}\delta_x$ для указанного преподавателем диэлектрика при различных напряжениях. Построить ионизационную характеристику $\text{tg}\delta_x = f(U)$ для диэлектрика с воздушными включениями и зависимость $\epsilon_{rx} = f(U)$.

11.2.4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой установки (см. рис. 11.1) и ее монтажным выполнением. Подключить указанный преподавателем объект измерения.

2. После проверки схемы и получения разрешения начать работу, установить на мосте:

- ручку «Чувствительность» в положение «выкл.»;
- ручку ряда R_3 в положение 50 Ом;
- ручку ряда C_4 в положение 0,001 мкФ;

г) ручку переключателя «А» в положение «1»;

д) ручку переключателя «N» в положение «1» (или 0,1 по указанию преподавателя);

е) ручку переключателя «Б» в положение + $\text{tg}\delta$ (1).

3. Плавно повышая напряжение с помощью автотрансформатора до указанного преподавателем значения, убедиться в том, что все элементы схемы выдерживают это напряжение без появления тресков, шипений, разрядов и других ненормальных явлений. При обнаружении пробоя немедленно отключить напряжение. Измерение напряжения производится с первичной стороны с учетом коэффициента трансформации.

4. Включить тумблер «Сеть» моста. При этом должна загореться лампа освещения шкалы микроамперметра.

5. Установить ручку «Чувствительность» в такое положение, при котором стрелка микроамперметра отклоняется на 30—35 мкА.

6. Поочередно регулируя сопротивления ряда R_3 и емкости ряда C_4 , добиваться положения, при котором стрелка микроамперметра наиболее близко подойдет к нулевой отметке шкалы, увеличивая при этом чувствительность указателя равновесия.

7. Записать в табл. 11.1 значения отсчета R_3 и C_4 , а также положение переключателя полярности «Б» на мосте и переключателя В2 на регулирующем устройстве.

Таблица 11.1

Зависимость емкости и $\text{tg}\delta_x$ от величины приложенного напряжения

Наименование материала или объекта	Положение переключателя		Измерено				Вычислено			Среднее значение	
	Б	В2	U	R_3	C_4	C_N	C_x	$\text{tg}\delta_x$	ϵ_{rx}	C_x	$\text{tg}\delta_x$
			кВ	Ом	мкФ	пФ	пФ	%	—	пФ	%

Пункты 8—10 выполняются только по указанию преподавателя.

8. Уменьшить чувствительность указателя равновесия и перевести переключатель полярности «Б» в положение – $\text{tg}\delta$ (2). Произвести дополнительную регулировку R_3 и C_4 и записать полученные результаты.

9. Установить переключатель чувствительности в положение «выкл.», снять напряжение на регулирующем устройстве. С целью исключения токов влияния переключатель полярности сети В2 перевести во второе положение, изменив на 180° фазу испытательного напряжения, и снова повысить напряжение до требуемого значения. Полное устранение ошибки от внешнего влияния достигается подбором фазы испытательного напряжения с помощью специального фазорегулятора.

10. Произвести уравнивание моста согласно п. 5—8.

11. Переключатель «Чувствительность» установить в положение «выкл.», установить следующее требуемое значение напряжения и повторить измерения по п. 5—10.

12. После измерений переключатель «Чувствительность» установить в положение «выкл.», на регулировочном устройстве снизить напряжение до нуля и отключить установку.

13. Вычислить значения $\text{tg}\delta_x$, C_x , C_0 и ϵ_{rx} по формулам (11.3) — (11.4). Если были проведены замеры по п. 8—10, то действительное значение емкости C_x и $\text{tg}\delta_x$ определить как среднее арифметическое отдельных измерений при каждом напряжении.

14. Построить график $\text{tg}\delta_x = f(U)$ и $\epsilon_{rx} = f(U)$.

Вопросы для самопроверки

1. Какой физический процесс оценивает величина ϵ_r ?
2. Какой вид поляризации не связан с потерями энергии?
3. Из каких выражений определяется емкость исследуемого конденсатора (объекта измерений) и диэлектрика?
4. Каково условие равновесия моста переменного тока?
5. Для каких диэлектриков характерна ионизационная характеристика?
6. Какие значения $\text{tg}\delta_x$ допускаются правилами устройств электроустановок (ПУЭ) для высоковольтной промышленной изоляции?

7. Каково назначение экрана при измерениях?

8. Когда применяются «нормальная» и «перевернутая» схемы измерения?

9. Какие дополнительные меры безопасности следует принять при измерениях по «перевернутой» схеме измерения?

10. На какое напряжение рассчитан мост P5026?

11. Как устраняются ошибки измерений, обусловленные влиянием внешних факторов?

11.3. Определение пробивного напряжения воздушных промежутков при частоте 50 Гц и различной форме электродов

11.3.1. Общие теоретические сведения

Характеристики газового разряда имеют очень большое значение для оценки надежности работы высоковольтных установок, так как воздух является элементом почти всех изоляционных конструкций. Основной характеристикой воздуха как изоляционной среды является его электрическая прочность или пробивная напряженность электрического поля $E_{пр}$.

Электрическая прочность воздуха в обычных условиях меньше, чем у большинства жидких и твердых диэлектриков. Поэтому электрическая прочность многих изоляционных конструкций определяется именно электрической прочностью воздуха. Как изолятор воздух отличается очень малой проводимостью и малыми диэлектрическими потерями. Он не изменяет своих свойств в процессе эксплуатации и не пожароопасен. В противоположность пробой твердого диэлектрика, пробой воздуха обычно не приводит к необходимости замены оборудования. В то же время электрическая прочность воздуха зависит от ряда факторов — температуры, давления, расстояния между электродами и др.

Процесс пробоя воздуха или газового разряда объясняется переходом несамостоятельной проводимости газового промежутка в самостоятельную. Несамостоятельная проводимость обусловлена наличием небольшого количества свободных зарядов, создан-

ных внешними ионизаторами (космическим, радиоактивным, рентгеновским или тепловым излучением).

При достижении приложенным к воздушному промежутку напряжением величины, создающей скорость движения свободных электронов выше 1000 км/с, электроны приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральной молекулы:

$$q\lambda E \geq W_{и}, \quad (11.6)$$

где q — заряд электрона; λ — длина свободного пробега электрона; E — напряженность электрического поля; $W_{и}$ — энергия ионизации.

Сталкиваясь с нейтральными частицами воздуха, электроны ионизируют их. Возникает процесс ударной ионизации. Такой разряд называют самостоятельным. Самостоятельный разряд сопровождается переходом всего пространства между электродами или его части в плазменное состояние, причем в зависимости от давления, мощности источника питания и формы электрического поля разряд может носить разный характер. Различают следующие основные виды газового разряда.

Тлеющий разряд. Возникает при низких давлениях (несколько десятков миллиметров ртутного столба). Тлеющий разряд носит многолавиновый характер. Промежуток между электродами заполнен плазмой. Основную роль в создании самостоятельного разряда играет поверхностная фотоионизация. Тлеющий разряд используется в запаянных лампах.

Искровой разряд. Возникает при относительной плотности газов, близкой к единице, если мощность источника напряжения невелика или напряжение приложено кратковременно. Например, если в качестве источника напряжения использовать заряженный конденсатор, то он не может долго поддерживать разряд и канал разряда быстро затухает. Искровой разряд развивается в виде узкого канала. Основную роль в создании самостоятельного разряда играет объемная фотоионизация.

Дуговой разряд. Возникает при большой мощности источника напряжения. Искровой разряд переходит в дуговой, если время приложения напряжения достаточно для разогревания канала разряда и возникновения термоионизации. Основную роль в создании самостоятельного разряда играет термоэлектронная и автоэлектронная эмиссия с катода и термоионизация.

Коронный разряд. Возникает в резконеоднородном поле. Ионизация развивается только в небольшой области вблизи электрода с малым радиусом кривизны. При повышении приложенного к газовому промежутку напряжения коронный разряд переходит в искровой, а при большой мощности — в дуговой разряд. Коронный разряд возникает на проводах линий электропередачи.

Величина электрической прочности газового промежутка в большой мере зависит от условий газового разряда, в частности от формы электрического поля.

При разряде в однородном поле в нормальных условиях пробивная напряженность воздуха составляет около 32 кВ/см при расстоянии между электродами, равном 1 см. В промежутках малой толщины условия формирования разряда затрудняются из-за малых значений λ , и электрическая прочность значительно увеличивается. В однородном поле значения пробивной напряженности $E_{пр}$ и пробивного напряжения $U_{пр}$ газового промежутка связаны простым соотношением:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (11.7)$$

где h — длина газового промежутка.

К однородным электрическим полям относятся, например, поле в средней части плоского конденсатора, поле между дисками с закругленными краями, поле между шарами при расстоянии между ними меньше половины диаметра и др. При пробое в неоднородном поле пробивное напряжение газового промежутка той же длины меньше, чем в однородном. Газовый разряд в резконеоднородном поле начинается с коронного разряда, который при дальнейшем повышении напряжения переходит в искровой или дуговой разряд. К резконеоднородным полям относятся поля между иглами, иголкой и плоскостью и др.

Пробой воздуха в однородном поле при известном расстоянии между электродами используют на практике для измерения высокого напряжения с помощью шаровых разрядников. Погрешность измерения напряжения шаровыми разрядниками составляет 3%. На основании обработки экспериментальных данных многих лабора-

торий мира Международная электротехническая комиссия (МЭК) составила таблицы пробивных напряжений шаровых разрядников различного диаметра. В табл. 11.2 приведены амплитудные значения пробивных напряжений $U_{\text{пр}0}$ для шарового разрядника с диаметром шаров 12,5 см при частоте питающего напряжения 50 Гц и нормальных условиях, т. е. при атмосферном давлении $p_0 = 760$ мм рт. ст. и температуре $t_0 = 20$ °С (ГОСТ 17512—72).

Таблица 11.2

Разрядные напряжения шаровых промежутков по данным МЭК

Расстояния между шарами h , см	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
Пробивные напряжения $U_{\text{пр}}$, кВ	16,8	31,7	45,5	59	73,1	85	108

Если давление p и температура t отличаются от нормальных значений p_0 и t_0 , то величина пробивного напряжения, взятая из табл. 11.2, должна быть умножена на поправку, относительную плотность воздуха, определяемую по формуле:

$$\delta = \frac{(273 + t_0)p}{(273 + t)p_0} \quad (11.8)$$

Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ в этом случае будет равно:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0}\delta, \quad (11.9)$$

где $U_{\text{пр}0}$ — величина пробивного напряжения при $p_0 = 760$ мм рт. ст. и $t_0 = 20$ °С.

Возрастание пробивного напряжения с увеличением относительной плотности воздуха δ объясняется уменьшением длины свободного пробега λ электронов. Чтобы в этом случае произошел пробой, необходимо в соответствии с формулой (5.3) при постоянном значении $W_{\text{и}}$ увеличить напряженность E электрического поля, а следовательно, и пробивное напряжение.

Для исследования пробоя газовых промежутков используют высоковольтный трансформатор ВТ, к первичной обмотке которого подключен вольтметр VI (рис. 11.4).

Напряжение на первичной обмотке трансформатора регулируется с помощью регулятора напряжения РН. Для ограничения тока при пробое шарового разрядника ШР служит балластный резистор БР.

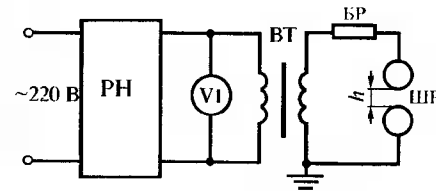


Рис. 11.4. Схема для исследования пробоя газовых промежутков

Величину пробивного напряжения, равную напряжению на выходе вторичной обмотки трансформатора, определяют для разных форм электродов по формуле:

$$U_{\text{пр}} = k_{\text{тр}}U_{1\text{м}} = k_{\text{тр}}\sqrt{2}U_1 = kU_1, \quad (11.10)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора, ВТ; $U_{1\text{м}}$ — амплитудное значение первичного напряжения; U_1 — действующее значение первичного напряжения; k — коэффициент пропорциональности между действующим значением первичного напряжения U_1 и амплитудным значением пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$, т. е. амплитудным значением вторичного напряжения $U_{2\text{м}}$.

Таким образом, $k_{\text{тр}} = \frac{k}{\sqrt{2}}$. Коэффициент пропорциональности k определяется опытным путем. Рассмотрим методику его определения с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Пусть были измерены в момент пробоя действующие значения напряжения U_1 на первичной стороне трансформатора для различных заданных расстояний между шарами h . Количество различных расстояний было равно n . По табл. 11.2 найдем для каждого расстояния h пробивные напряжения $U_{\text{пр}0}$ для нормальных условий. Умножив эти значения на относительную плотность воздуха δ , найдем максимальные напряжения на вторичной стороне трансформатора:

$$U_{2\text{м}} = U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0}\delta. \quad (11.11)$$

Полученные данные сведем в табл. 11.3.

По данным опыта (табл. 11.3) определим значение коэффициента пропорциональности k таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений опытных значений $U_{\text{пр}i}$ от расчетных значений, равных kU_{1i} , была бы минимальной:

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (U_{\text{пр}i} - kU_{1i})^2 = \min. \quad (11.12)$$

Таблица 11.3

Данные для методики определения коэффициента пропорциональности с помощью МНК

Номер опыта i	Расстояние между шарами h_i , см	Первичное напряжение U_{1i} , В	Пробивное напряжение $U_{прi}$, В	Вторичное напряжение $U_{2M i} = U_{прi}$, В
1	h_1	U_{11}	$U_{пр1}$	$U_{пр1}$
2	h_2	U_{12}	$U_{пр2}$	$U_{пр2}$
...
n	h_n	U_{1n}	$U_{прn}$	$U_{прn}$

Продифференцируем уравнение (11.12) по k и приравняем производную к нулю, чтобы найти значение k , при котором функция (11.12) минимальна (в точке экстремума производная равна нулю):

$$\frac{d \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{dk} = 0 \quad \text{или}$$

$$\sum_{i=1}^n 2(U_{прi} - kU_{1i})U_{1i} = 0.$$

После сокращения на 2 и преобразования получим:

$$\sum_{i=1}^n U_{прi}U_{1i} - k \sum_{i=1}^n U_{1i}^2 = 0.$$

Отсюда

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n U_{прi}U_{1i}}{\sum_{i=1}^n U_{1i}^2}. \quad (11.13)$$

11.3.2. Задание на лабораторную работу

Определить опытным путем коэффициент пропорциональности k высоковольтного трансформатора, производя пробой воздушных промежутков при частоте 50 Гц и меняя толщину промежутков h .

Произвести пробой воздушных промежутков при других формах электродов. Построить графики зависимости $U_{пр} = f(h)$ для различных форм электродов.

11.3.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой установки и ее монтажным выполнением.

2. Собрать схему, изображенную на рис. 11.4. В этой схеме измерение пробивного напряжения производится вольтметром V_1 , включенным на стороне низкого напряжения.

Нужное расстояние между электродами устанавливается с помощью шаблонов. Повышение напряжения производится рукояткой регулятора напряжения РН (автотрансформатора).

3. После проверки схемы и разрешения начать работу произвести опытным путем градуировку трансформатора, т. е. определить коэффициент пропорциональности k .

Для измерения коэффициента пропорциональности k нужно установить шаровые электроды с диаметром 12,5 см, и для расстояний между шарами $h = 0,5; 1; 1,5; 2,0; 2,5$ см измерить пробивные напряжения вольтметром V_1 . Зная диаметр шаров разрядника, из таблицы Международной электротехнической комиссии (см. табл. 11.2) записать в табл. 11.4 для каждого расстояния h пробивные напряжения $U_{пр0}$ для нормальных условий.

Если условия отличаются от нормальных, то необходимо умножить эти значения на относительную плотность воздуха δ и найти по формуле (11.9) напряжения на вторичной стороне трансформатора $U_{пр} = \delta U_{пр0}$.

Результаты измерений и вычислений следует записать в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Измерение пробивных напряжений шаровых разрядников для различных расстояний

Измерено			Вычислено			
h , см	U_1 , В	t , °С	P , мм рт. ст.	δ	$U_{пр}$, кВ	$U_{пр}$, кВ

4. По данным табл. 11.4 определить коэффициент пропорциональности k по формуле (11.13). Построить график $U_{пр} = kU_1$. На этом же графике нанести опытные точки $U_{пр} = f(U_1)$, не соединяя их друг с другом. Определить коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора ВТ.

5. Установить по очереди: 1) плоские диски с закругленными краями; 2) плоские диски с острыми краями; 3) иглы; 4) иглу и плоскость. Прodelать опыты для расстояний $h = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ см и определить пробивные напряжения $U_{пр}$ по формуле $U_{пр} = kU_1$ для различных расстояний и форм электродов.

Полученные результаты записать в табл. 11.5.

Таблица 11.5

Измерение пробивных напряжений для различных расстояний при разной форме электродов

Наименование электродов	Измерено		Вычислено
	h , см	U_1 , В	$U_{пр}$, кВ

6. По данным табл. 11.5 построить в одних осях координат графики $U_{пр} = f(h)$ для каждой формы электродов. На этом же графике построить зависимость $U_{пр} = f(h)$ для шаров (по табл. 11.4).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое $U_{пр}$ и $E_{пр}$ и в каких единицах они измеряются?
2. Какое значение напряжения при пробое газа принимают за пробивное: амплитудное или действующее?
3. Как определяются опытным путем $U_{пр}$ и $E_{пр}$ воздуха?
4. Что представляет собой установка для испытания воздуха на пробой при частоте 50 Гц?

5. Как зависит электрическая прочность воздуха от формы электродов, давления и других факторов?

6. Почему пробой в неоднородном поле происходит при меньшем напряжении по сравнению с пробоем в однородном поле?

7. Как связаны между собой коэффициент пропорциональности k и коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора ВТ?

11.4. Определение коронного и пробивного напряжения воздуха в резконеоднородном поле при различной полярности электродов

11.4.1. Общие теоретические сведения

Условия работы изоляции существенно зависят от формы электрического поля, в котором работают диэлектрики. В неоднородном поле условия работы изоляции значительно тяжелее, чем в однородном.

Напряженность поля вдоль силовых линий в однородных полях постоянная, в слабонеоднородных изменяется не более чем в 2—3 раза, а в резконеоднородных может изменяться на несколько порядков.

В практических случаях электрические поля редко бывают однородными. Примером однородного поля может служить поле в средней части плоского конденсатора. Примером слабонеоднородного поля является поле между коаксиальными цилиндрами при отношении их радиусов не более трех.

С увеличением отношения расстояния между электродами к наименьшему радиусу их кривизны неоднородность поля возрастает. Характерным примером резконеоднородного поля является поле, созданное между иглой и плоскостью.

Развитие газового разряда в резконеоднородных полях существенно отличается от протекания этого процесса в однородных или слабонеоднородных полях. Когда напряжение, приложенное к газовому промежутку с неоднородным полем достигнет определенной величины, вблизи электрода с наименьшей кривизной поверхности (в месте наибольшей напряженности поля) начи-

нается процесс ионизации. Однако процесс ионизации в неоднородном поле носит локальный характер. Самостоятельный разряд охватывает лишь часть промежутка, где напряженность поля достаточна для поддержания процесса ударной ионизации. В остальной части промежутка напряженность поля недостаточна для ионизации.

Устойчивый самостоятельный разряд части промежутка, вызывающий свечение газа, шипение и потрескивание, носит название коронного разряда или короны. При дальнейшем повышении приложенного к газовому промежутку напряжения коронный разряд переходит в искровой или дуговой, и промежуток пробивается. Таким образом, в неоднородном поле пробоем газового промежутка предшествует коронный разряд.

В резконеоднородном поле значения коронного и пробивного напряжения зависят от полярности электродов. Рассмотрим эту зависимость.

При подаче постоянного напряжения на электроды игла—плоскость, независимо от полярности иглы, вблизи нее начинается ионизация и возникает коронный разряд. Образующиеся при этом электроны быстро уходят из зоны возникновения коронного разряда, а положительные ионы, подвижность которых значительно меньше, образуют положительный объемный заряд.

Последний сильно искажает электрическое поле между электродами, что по-разному влияет на развитие разряда в зависимости от полярности приложенного напряжения.

На рис. 11.5, *a* схематически показано распределение объемного заряда, а на рис. 11.5, *b* — распределение потенциала в воздушном промежутке между иглой и плоскостью при различной полярности электродов. Кривые 1 показывают распределение потенциала до появления объемного заряда, а кривые 2 — после его появления.

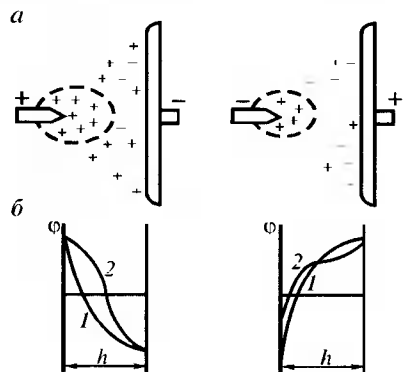


Рис. 11.5. Распределение объемного заряда и потенциала в воздушном промежутке

Как показывают приведенные кривые распределения потенциала, в случае положительной иглы объемный заряд усиливает поле у своей внешней границы, направленной к диску, и ослабляет поле вблизи иглы.

Усиление поля в пространстве между объемным зарядом и плоскостью способствует ионизации газа электронами, движущимися к игле. Острие иглы как бы приближается по направлению к плоскости благодаря ионизированной части газового промежутка.

Таким образом, возникновение положительного объемного заряда вблизи иглы при положительной полярности иглы облегчает пробой промежутка. С другой стороны, ослабление поля у иглы затрудняет возникновение коронного разряда.

Иная картина имеет место у отрицательной иглы, где возникающий положительный объемный заряд ослабляет поле у своей наружной границы и усиливает его вблизи иглы. Ослабление поля в пространстве между объемным зарядом и плоскостью затрудняет пробой газового промежутка, делая его более прочным.

Усиление напряженности поля вблизи иглы облегчает возникновение коронного разряда. Таким образом, при одинаковой длине газового промежутка величина пробивного напряжения в случае отрицательной полярности иглы оказывается большей, а напряжение, при котором возникает коронный разряд, — меньшим, чем при положительной полярности иглы, что часто используют на практике.

Для повышения электрической прочности газового промежутка в неоднородном поле применяются барьеры. Барьеры представляют собой тонкую пластинку изоляционного материала, имеющего плоскую или цилиндрическую форму, и широко используются в изоляционных конструкциях с газовой или масляной изоляцией.

Влияние барьера на процессы разряда в газовом промежутке между иглой и плоскостью зависит от полярности электродов и расположения барьера.

При положительной полярности иглы положительные ионы, стремящиеся под действием сил электрического поля к отрицательно заряженной плоскости, оседают на барьере и растекаются по его поверхности, выравнивая поле. Если барьер установлен не слишком близко и не слишком далеко от иглы, разрядное напряжение значительно повышается и при оптимальном расстоянии между иглой и барьером достигает максимума.

Напряжения возникновения короны и пробивные напряжения для системы электродов игла—плоскость при различных расстояниях

Полярность иглы	Измерено				
	h , см	$U_{1к}$, В	$U_{1пр}$, В	U_k , кВ	$U_{пр}$, кВ

4. По данным табл. 11.6 построить в одних осях координат для разных полярностей иглы графики: $U_k = f(h)$; $U_{пр} = f(h)$.

Вопросы для самопроверки

1. Какие поля считаются однородными, слабееоднородными и резконеоднородными?
2. Что такое несамостоятельная и самостоятельная проводимость газов?
3. Что такое коронный разряд и в каких условиях он возникает?
4. Каковы внешние признаки короны?
5. Что такое напряжение пробоя?
6. При каких условиях коронный разряд переходит в искровой или дуговой пробой?
7. Как влияет полярность иглы на величины U_k и $U_{пр}$?
8. Как определяются опытным путем U_k и $U_{пр}$ воздушных промежутков?

11.5. Определение электрической прочности трансформаторного масла

11.5.1. Общие теоретические сведения

Трансформаторное масло находит широкое применение в электротехнических устройствах. Оно служит для повышения электрической прочности изоляции и улучшения охлаждения обмоток

При расстояниях меньших, чем оптимальное, за барьером возникает корона, а при расстояниях больших, чем оптимальное, уменьшается длина промежутка с выровненным полем, и в обоих случаях роль барьера снижается.

При отрицательно заряженной игле электроны, отталкиваемые от иглы, задерживаются барьером и образуют на нем отрицательные ионы. Сконцентрированный барьером отрицательный заряд повышает напряженность поля между барьером и плоскостью и снижает разрядное напряжение. При установке барьера вблизи отрицательно заряженной иглы возможно повышение разрядного напряжения, так как доля однородного электрического поля между барьером и диском достаточно велика.

11.4.2. Задание на лабораторную работу

Произвести пробой воздушных промежутков между иглой и плоскостью, меняя толщину промежутков и полярность электродов. Построить графики зависимости $U_k = f(h)$, $U_{пр} = f(h)$ для различных полярностей электродов.

11.4.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой установки ВС 50-50 и ее монтажным выполнением (рис. 11.6).

2. Взяв в качестве электродов в испытательной установке иглу и плоский диск, произвести измерение напряжения возникновения короны U_k (появление светящейся точки на острие иглы), а затем и пробивного напряжения $U_{пр}$.

В момент пробоя установка отключается автоматическим выключателем АВ. После отключения АВ необходимо вывести рукоятку регулятора напряжения РН в нулевое положение.

Для каждой полярности устанавливать следующие расстояния между электродами: 1; 1,5; 2; 2,5; 3 см. Результаты измерений и вычислений записать в табл. 11.6.

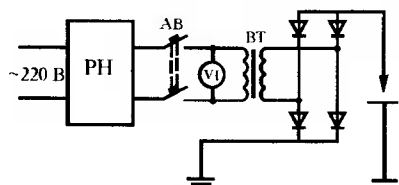


Рис. 11.6. Схема высоковольтной установки ВС 50-50

силовых трансформаторов. В масляных выключателях высокого напряжения оно способствует быстрому гашению дуги. Трансформаторное масло применяется также для заливки маслonaполненных вводов, реостатов и других электрических аппаратов.

Важной характеристикой трансформаторного масла является его электрическая прочность $E_{пр}$. Электрическая прочность масла определяется не только свойствами самого масла, но и количеством и видом содержащихся в нем примесей. Наибольшее влияние на электрическую прочность масла оказывает влага. Поэтому ГОСТ 6581—75 не устанавливает нормы электрической прочности масла. Эти нормы устанавливаются Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ) [23, 30].

В процессе эксплуатации под воздействием электрического поля, нагрева и кислорода воздуха в масле образуются загрязняющие его продукты — кислоты и смолы. Масло стареет, снижается его электрическая прочность. При снижении электрической прочности масла оно резко теряет свои изоляционные качества, снижая тем самым надежность электрического аппарата, в который оно залито. Чтобы избежать аварии, масло, подготовленное для заливки в трансформатор или другой аппарат, а также масло, находящееся в эксплуатации, необходимо испытывать. Одним из важных испытаний трансформаторного масла является определение его основного электрического параметра — электрической прочности $E_{пр}$. Рассмотрим методику определения электрической прочности масла.

Электрической прочностью $E_{пр}$ трансформаторного масла называют напряженность электрического поля, при которой происходит пробой масла. В соответствии с ПТЭ пробой образца масла производят в специальном разряднике — сосуде (рис. 11.7) емкостью 300—500 см², в стенки 1 которого вмонтированы латунные электроды 2. Электроды выполнены в виде двух дисков диаметром 25 мм с закругленными краями при расстоянии между ними $h = 2,5$ мм. Для соединения электродов с высоковольтным трансформатором 5 в стенки 1 вмонтированы герметичные вводы 3.

Первичная обмотка высоковольтного трансформатора 5 подключена к выходу регулятора напряжения 6 с моторным приводом 7

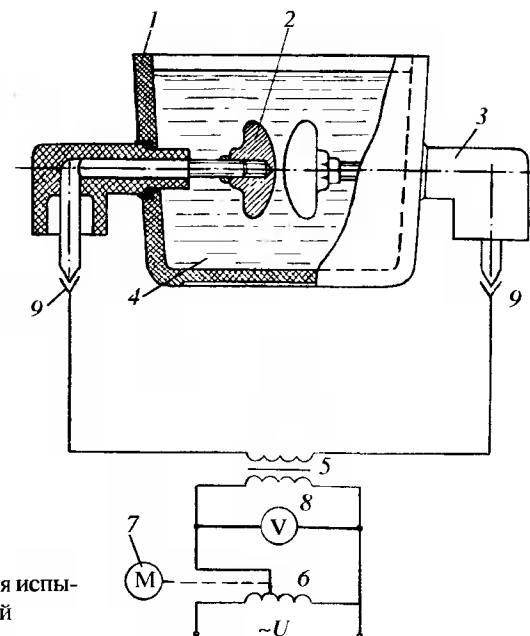


Рис. 11.7. Схема аппарата для испытания масла на пробой

скользящей щетки. Пробивное напряжение измеряется вольтметром V. Уровень масла 4 в разряднике должен быть выше верхнего края электродов не менее чем на 15 мм. Поскольку расстояние между электродами всегда постоянное, то для удобства измерения в ПТЭ указывают не пробивную напряженность трансформаторного масла, а непосредственно пробивное напряжение (табл. 11.7).

Таблица 11.7

Нормы на пробивное напряжение трансформаторного масла в стандартном разряднике

Для аппаратов с рабочим напряжением, кВ	Пробивное напряжение трансформаторного масла в стандартном разряднике, кВ, не менее	
	Свежее масло	Масло в эксплуатации
6 и ниже	25	20
35	30	25
110 и 120	40	35
330 и выше	50	45

На величину пробивного напряжения оказывают влияние случайные факторы, связанные с возникновением и развитием разряда. К ним относятся, например, возникающие при пробоях различные траектории разряда. Поэтому напряжение пробоя является случайной величиной, подчиняющейся статистическим закономерностям. В связи с этим для одной пробы трансформаторного масла должно быть проведено несколько пробоев, в результате которых получают выборку пробивных напряжений $U_{пр}$. Для оценки математического ожидания по полученной выборке определяют среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$ по формуле:

$$\bar{U}_{пр} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{пр i}, \quad (11.14)$$

где $U_{пр i}$ — значение i -го пробивного напряжения, кВ; n — число пробоев.

Для оценки дисперсии пробивных напряжений определяют эмпирическую дисперсию σ^2 или среднее квадратическое отклонение (СКО) σ отдельных пробивных напряжений от среднего арифметического значения пробивного напряжения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{пр i} - \bar{U}_{пр})^2}{n-1}}. \quad (11.15)$$

Эксперименты показывают, что разбросы значений пробивного напряжения соответствуют нормальному закону распределения. Интегральная функция распределения вероятности возникновения разряда при напряжении меньше $U_{пр}$ (рис. 11.8) определяется двумя параметрами $\bar{U}_{пр}$ и σ и описывается аналитическим выражением:

$$P(U_{пр}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U_{пр}} e^{-\frac{(U_{пр} - \bar{U}_{пр})^2}{2\sigma^2}} dU_{пр}. \quad (11.16)$$

Подчеркнем, что в формуле (11.16) $U_{пр}$ и σ — это точечные оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения.

Из формулы (11.16) следует, что среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$ соответствует 50 %-ной вероятности, а среднее квадратическое отклонение σ является мерой крутизны интегральной кривой распределения вероятностей (см. рис. 11.8). В табл. 11.8 приведены полученные с помощью специальных функций Лапласа значения вероятностей $P(U_{пр} < \bar{U}_{пр} \pm t\sigma)$ того, что пробив-

ное напряжение не превысит значения $\bar{U}_{пр} \pm t\sigma$, где $t = \frac{|U_{пр} - \bar{U}_{пр}|}{\sigma}$ — величина отклонения, отнесенная к среднему квадратическому отклонению σ .

Отсюда $U_{пр} = \bar{U}_{пр} \pm t\sigma$. В функциях Лапласа в качестве аргумента используется величина t .

Относительное значение среднего квадратического отклонения

$$v = \frac{\sigma}{\bar{U}_{пр}} \cdot 100 \quad (11.17)$$

называется стандартом распределения или коэффициентом вариации. С помощью коэффициента вариации оценивается относительное рассеяние результатов измерений.

Для определения электрической прочности трансформаторного масла и других жидких диэлектриков применяют аппарат АИМ-80 (аппарат для испытания масла с наибольшим напряжением 80 кВ) или АИМ-90.

Конструкция аппарата (рис. 11.9) выполнена в виде переносного пульта. Аппарат включает в себя следующие основные элементы (см. рис. 11.7): высоковольтный испытательный трансформатор 5; регулятор напряжения (вариатор) 6 с моторным приводом 7 скользящей щетки; измерительную ячейку — разрядник (1); измерительный прибор 8.

Высокое напряжение от трансформатора выводится посредством специальных вводов 9, которые слу-

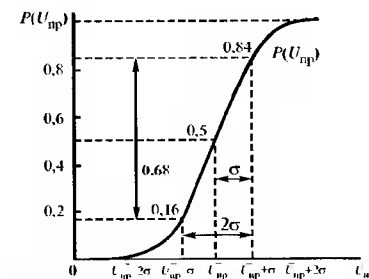


Рис. 11.8. Интегральная кривая распределения вероятностей

жат одновременно опорой для установки на них измерительной ячейки. Зона аппарата, где устанавливается измерительная ячейка, имеет крышку 12 (рис. 11.9), которая в закрытом положении замыкает блок-контакты цепи включения высокого напряжения. При открывании крышки указанная цепь размыкается.

Во избежание электрического пробоя с высоковольтных изоляторов на заземленные части аппарата устанавливается изоляционный барьер, который одновременно служит маслосборником случайно пролитого диэлектрика из измерительной ячейки. Подъем высокого напряжения на электродах измерительной ячейки производится регулятором напряжения с постоянной скоростью.

На лицевой панели аппарата (см. рис. 11.9.) расположены:

- выключатель цепи 1 со специальным ключом, измерительный прибор 3;
- световая сигнализация (зеленая 2 — включение сети, желтая 4 — готовность схемы аппарата к включению высокого напряжения, красная 5 — включено высокое напряжение);
- кнопка 8 включения высокого напряжения ($\frac{1}{2}$);
- кнопка 6 разового возврата стрелки прибора и щетки регулятора напряжения в нулевое положение после пробоя масла ($0 \leftarrow$);
- кнопка 7 автоматического возврата стрелки прибора и щетки регулятора напряжения в нулевое положение после пробоя диэлектрика ($0 \rightarrow$);
- кнопка 9 прерывания подъема высокого напряжения.

На задней стороне аппарата расположены: дверца, обеспечивающая доступ к предохранителям, газовому разряднику, и клемма для подсоединения контрольного вольтметра; штепсельный

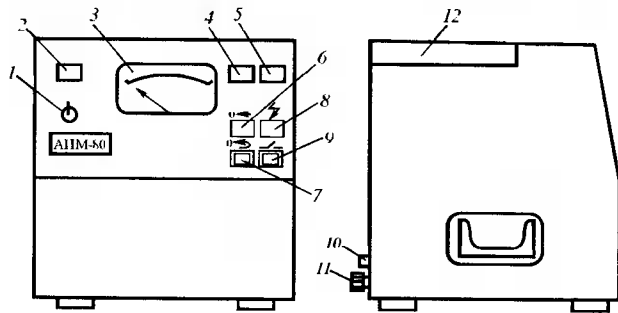


Рис. 11.9. Конструкция аппарата АИМ-80 для испытания масла

разъем 10 для присоединения кабеля питания аппарата к сети; клемма заземления 11 для присоединения провода заземления к контуру заземления.

11.5.2. Задание на лабораторную работу

Произвести пробы масла в стандартном разряднике. Установить соответствие полученных данных нормам ПТЭ.

11.5.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией и схемой аппарата АИМ-80.
2. После разрешения начать работу включить вилку шнура питания в сеть.
3. Включить выключатель сети специальным ключом. При этом загорается подсветка зеленого сигнала.
4. Включить кнопку 8 высокого напряжения (см. рис. 11.9). При этом должна загореться подсветка красного сигнала, а подсветка желтого — погаснуть. Напряжение будет плавно повышаться до пробоя масла. После пробоя масла в разряднике записать величину пробивного напряжения $U_{пр}$ в табл. 11.8.
5. Нажать кнопку 6 разового возврата регулятора напряжения в нулевое положение.
6. Дождаться возврата стрелки измерительного прибора в нулевое положение. При нулевом положении регулятора загорается желтый сигнал. После отключения сетевого выключателя открыть крышку и помешать масло сухой стеклянной палочкой, чтобы удалить из разрядного промежутка частицы сажи.
7. После отстаивания масла в течение 5 мин испытание повторить. В соответствии с правилами испытаний провести шесть пробоев масла ($n = 6$), записывая данные в табл. 11.8.
8. Вычислить по формуле (11.15) среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$ и среднее квадратическое отклонение σ по формуле (11.16). Вычислить среднее значение напряженности $E_{пр}$ по формуле:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h} = \frac{U_{пр}}{2,5}$$

Вычислить коэффициент вариации v по формуле (11.17). Результаты вычислений записать в табл. 11.8.

Таблица 11.8

Пробивное напряжение и электрическая прочность трансформаторного масла

№ пробы i	1	2	3	4	5	6
Пробивное напряжение $U_{прi}$, кВ						
Среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$, кВ						
Среднее значение пробивной напряженности $E_{пр}$, кВ/мм						
Среднеквадратическое отклонение σ , кВ						
Коэффициент вариации v , %						

По данным табл. 11.8 построить график зависимости пробивного напряжения $U_{прi}$ от номера пробы i (рис. 11.10). Отложить на графике среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$, а также значения $\bar{U}_{пр} + \sigma$ и $\bar{U}_{пр} - \sigma$, проведя через эти значения горизонтальные прямые.

Определить количество попаданий пробивных напряжений в интервал $U_{пр} - \sigma < U_{пр} < U_{пр} + \sigma$ и сравнить его с табличной вероятностью $P\{U_{пр} - \sigma < U_{пр} < U_{пр} + \sigma\} = 0,68$. Проверить по нормам ПТЭ, для каких рабочих напряжений возможно применить исследованное масло.

По известным значениям $\bar{U}_{пр}$ и σ определить величины $U_{пр} = \bar{U}_{пр} \pm t\sigma$ при различных значениях t , приведенных в табл. 11.9, 11.10. По данным табл. 11.9 и 11.10 построить в одних осях координат график интегральной функции распределения вероятности $P\{U_{пр} < \bar{U}_{пр} \pm t\sigma\}$.

Произвести операцию ранжирования выборки пробивных напряжений, т. е. расположить значения пробивных напряжений $U_{прk}$

в порядке их возрастания, записывая данные в табл. 11.11. В этой же таблице приведены опытные значения накопленных частот W_k пробивных напряжений. Накопленные частоты определены по формуле:

$$W_k = \frac{k-1}{5}.$$

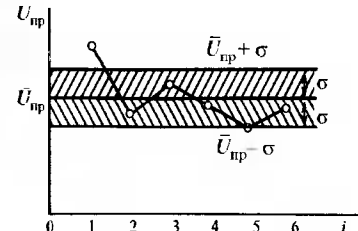


Рис. 11.10. Зависимость пробивного напряжения от номера пробы

Таблица 11.9

Данные для построения интегральной функции пробивного напряжения для $U_{пр} > \bar{U}_{пр}$

t	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$t\sigma$							
$\bar{U}_{пр} + t\sigma$	-	-	-	-	-	-	-
$P\{U_{пр} < \bar{U}_{пр} + t\sigma\}$	0,5	0,69	0,84	0,93	0,98	0,99	1

Таблица 11.10

Данные для построения интегральной функции пробивного напряжения для $U_{пр} < \bar{U}_{пр}$

t	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$t\sigma$							
$\bar{U}_{пр} - t\sigma$	-	-	-	-	-	-	-
$P\{U_{пр} < \bar{U}_{пр} - t\sigma\}$	0,5	0,31	0,16	0,07	0,02	0,01	0

На графике интегральной функции $P\{U_{пр} < \bar{U}_{пр} \pm t\sigma\}$ нанести опытные данные (табл. 11.11) и построить так называемую кумулятивную кривую $W_k = f(U_{прk})$, т. е. зависимость накопленных частот от номера пробы. Отдельные точки на кумулятивной кривой соединяются отрезками прямых. Сравнить кумулятивную кривую с интегральной кривой.

Таблица 11.11

Данные для построения кумулятивной кривой

Номер пробоя в ранжированном ряде, k	1	2	3	4	5	6
Пробивные напряжения $U_{прк}$, кВ						
Накопленная частота, W_k	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0

Вопросы для самопроверки

1. Где применяется трансформаторное масло и с какой целью?
2. Для чего производят испытания трансформаторного масла на пробой?
3. Как испытывается трансформаторное масло на пробой?
4. Какие размеры имеют электроды разрядника для пробоя трансформаторного масла?
5. Что такое математическое ожидание пробивного напряжения и как оно оценивается?
6. Как оценивается рассеяние результатов испытаний?
7. Что такое среднеквадратическое отклонение?
8. Что такое нормальный закон распределения вероятностей? Какими параметрами он характеризуется?
9. Что называют коэффициентом вариации и что он оценивает?
10. Каким нормам должна удовлетворять электрическая прочность трансформаторного масла?
11. Что такое кумулятивная кривая?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы кратко рассмотрели основные характеристики изоляционных материалов и их применение в электрических машинах, аппаратах и различных изоляционных конструкциях. Ограниченный объем пособия не позволяет подробно остановиться на таких важных вопросах, как расчет размеров изоляционных конструкций, регулирование в них электрических полей, тепловой расчет изоляции. Ответ на эти и другие вопросы, связанные с расчетом параметров электрической изоляции и методами их измерения, можно найти в книгах, которые указаны в приводимом ниже далеко не полном списке литературы.

СЛОВАРЬ ИНОСТРАННЫХ СЛОВ, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В ПОСОБИИ

Абсорбция — объемное поглощение заряда или влаги.

Адгезия — слипание поверхностей двух разнородных твердых или жидких тел.

Адсорбция — поверхностное поглощение заряда или влаги.

Адсорбент — тело, на поверхности которого происходит адсорбция.

Анизотропия — неодинаковость физических свойств тела, например электропроводности, по различным направлениям внутри этого тела.

Антисептик — вещество, вызывающее гибель микробов при соприкосновении с ними; употребляется для защиты от гниения деревянных частей строения, шпал.

Аэрозоль — дисперсная система, состоящая из твердых или жидких частиц, взвешенных в газообразной среде.

Гидрофильность — свойство веществ или материалов интенсивно взаимодействовать с водой (смачиваться).

Гидрофобность — свойство веществ или материалов слабо взаимодействовать с водой (не смачиваться).

Деградация изоляции — постепенное ухудшение свойств изоляции, ее старение и разрушение структуры.

Десорбция — процесс, обратный сорбции.

Деструкция — разрушение, нарушение нормальной структуры чего-либо.

Диагностирование (техническое) — проведение технического обследования и определение состояния технических систем для предсказания возможных отклонений и предотвращения нарушений нормального режима их работы.

Диполь — совокупность двух равных по величине равноименных электрических зарядов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

Дисперсная система — вещество в виде малых частиц вместе с той средой, в которой они распределены, например, аэрозоли, суспензии, эмульсии.

Диссоциация молекул — разложение молекул на несколько более простых частиц: атомов, радикалов или ионов, а также разложение сложных молекул на более простые. Различают диссоциацию термическую, электролитическую и фотохимическую.

Домены — области однородной среды, отличающиеся электрическими или магнитными свойствами, либо упорядоченностью в расположении ориентации частиц.

Изотропия, изотропность — одинаковость свойств вещества по всем направлениям.

Ингибитор — вещество, замедляющее химические реакции или прекращающее их.

Ингредиент — составная часть какого-либо сложного соединения или смеси.

Индукция электрическая — векторная величина, характеризующая электрическое поле в веществе (с учетом электрической поляризации диэлектрика).

Инжекция — введение носителей заряда в область, где они не являются основными.

Ионизация — превращение нейтральных атомов или молекул в ионы.

Каверна — пустота, полое пространство, образовавшееся в массиве твердого тела.

Капилляр — трубка с узким (волосным) внутренним каналом.

Коллоиды или коллоидные системы — дисперсные системы, промежуточные между истинными растворами и грубодисперсными системами — суспензиями и эмульсиями; жидкие коллоидные системы — золи, студнеобразные — гели.

Конвекция — перемещение частиц воздуха, приводящее к перемещению тепла.

Координация — согласование, приведение к норме или приведение в соответствие.

Координация изоляции — согласование электрической прочности изоляции с воздействующим на нее напряжением с целью обеспечения требуемой надежности работы.

Кумулятивный эффект — эффект накопления необратимых изменений или разрушений в изоляции.

Макроструктура — структура твердого тела, видимая невооруженным глазом или при небольшом увеличении с помощью лупы.

Микроструктура — структура твердого тела, видимая в микроскоп при большом увеличении.

Осмоз — явление медленной диффузии (проникновения) частиц влаги через тонкую перегородку (мембрану), непроницаемую для других жидкостей.

Плазма — ионизированный газ, в котором объемные плотности положительных и отрицательных электрических зарядов практически одинаковы. Плазма образуется при электрических разрядах в газах.

Полиамиды — класс синтетических полимеров, содержащих амидные группы. Применяются для производства волокон: капрона, нейлона, перлона, силона и др. В технике применяются в машиностроении.

Полиимиды — класс синтетических полимеров, содержащих имидную группу. Это твердые продукты, отличаются высокой термостойкостью и хорошим электроизоляционными свойствами.

Поляризация — смещение противоположно заряженных частиц молекул или атомов диэлектрика под действием электрического поля.

Регенерация — восстановление первоначальных свойств вещества, превращение отработанного вещества в исходное для повторного использования.

Рекомбинация — процесс, обратный ионизации, когда ионы противоположных знаков, соединяясь, образуют нейтральную молекулу, а электрон и ионизированный атом — нейтральный атом.

Релаксация — процесс постепенного возвращения в состояние равновесия какой-либо системы, выведенной из такого состояния после прекращения действия факторов, выведших ее из состояния равновесия.

Сорбенты — твердые тела или жидкости, применяемые для поглощения каких-либо веществ из растворов или газов с целью их очистки.

Сорбция — поглощение твердыми телами или жидкостями каких-либо веществ из окружающей среды (*абсорбция*).

Стримеры — узкие светящиеся разветвленные каналы, образующиеся в предпробойных стадиях искровых, дуговых и коронных разрядов.

Суспензия — взвесь, дисперсная система, состоящая из двух фаз — жидкой и твердой, где мелкие твердые частицы взвешены в жидкости.

Трек — проводящий след или проводящий канал на поверхности диэлектрика.

Трекинг диэлектрика — образование проводящих следов (каналов) на поверхности диэлектрика.

Тринг — канал неполного пробоя.

Фотоионизация — процесс ионизации газа, происходящий под действием электромагнитного излучения, т. е. в результате поглощения фотонов.

Фуран — органическое соединение гетероциклического ряда, в состав цикла которого входят атомы не только углерода, но и других элементов. Фураны образуются как продукты разложения изоляции, содержащей целлюлозу.

Экструзия — метод изготовления профилированных изделий из пластмасс и резин, состоящий в непрерывном выдавливании размягченного материала поршнем или шнеком через профилирующее отверстие на специальной машине — *экструдере*.

Электрофорез — перемещение заряженных коллоидных частиц, вызываемое действием внешнего электрического поля.

Эмульсия — жидкость, в которой находятся во взвешенном состоянии макроскопические капельки другой жидкости (оба компонента жидкости).

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электротехнические материалы: Учеб. для вузов. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 384 с.

2. *Вайда Д.* Исследование повреждений изоляции. — М.: Энергия, 1968. — 400 с.

3. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Т. 1. — М., 1974. — 584 с.; Т. 2. — М., 1974. — 616 с.; Т. 3. — Л., 1976. — 806 с.

4. *Казарновский Д.М., Тареев Б.М.* Испытание электроизоляционных материалов и изделий. — Л.: Энергия, 1980. — 212 с.

5. *Тареев Б.М.* Физика диэлектрических материалов. — М.: Энергоиздат, 1982. — 320 с.

6. *Кулаковский В.Б.* Работа изоляции в генераторах. Возникновение и методы обнаружения дефектов. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 256 с.

7. *Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь С.Ю.* Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учеб. для вузов / Под общ. ред. В.П. Ларионова. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 464 с.

8. *Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.* Изоляция установок высокого напряжения: Учеб. для вузов / Под общ. ред. Г.С. Кучинского. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 368 с.

9. *Луцкейкин Г.А.* Методы исследования электрических свойств полимеров. — М.: Химия, 1988.

10. *Ушаков В.Я.* Электрическое старение и ресурс монолитной изоляции. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

11. *Сви П.М.* Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 240 с.

12. *Гатальский Г.И., Серебряков А.С.* Техника высоких напряжений: Изоляция электроустановок высокого напряжения. Учеб. пособие. — М.: РГОТУПС, 1998. — 1438 с.

13. *Серебряков А.С.* Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции // *Электричество*. 1999. № 5. С. 40—43.

14. Электрические аппараты высокого напряжения: Учеб. для вузов / Под ред. Г.Н. Александрова. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. — 503 с.

15. *Серебряков А.С.* Техника высоких напряжений: Профилактический контроль и испытания изоляции / Учеб. пособие. — М.: РГОТУПС, 1997. — 86 с.

16. *Пак В.М., Степанович А.П., Шамрай В.Н., Федоров Л.Н.* Новая слюдопластовая лента для изоляции статорных обмоток электрических машин и трансформаторов // *Электротехника*. 1997. № 5. С. 9—13.

17. *Ярошеня Е.И., Пак В.М., Окнин Н.С., Погодина Ж.П.* Разработка и исследование терморезистивной системы изоляции высоковольтных электрических машин // *Электротехника*. 1997. № 12. С. 40—45.

18. *Глинка Т.* Диагностика изоляции обмоток электрических машин постоянного напряжения // *Электричество*. 1998. № 1.

19. *Бородулин В.Н., Воробьев А.С., Серебрянников С.В., Чепарин В.П.* Электротехническое материаловедение. Лабораторные работы / Под ред. А.С. Воробьева. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 80 с.

20. *Яманов С.А., Яманова Л.В.* Старение, стойкость и надежность электрической изоляции. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 176 с.

21. Электротехнические и конструкционные материалы: Учеб. пособие для студ. сред. проф. образования / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин и др.; Под ред. В.А. Филикова. — М.: Мастерство; Высшая школа, 2001. — 280 с.

22. *Алексеев Б.А.* Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. — М.: НЦ ЭНАС, 2002. — 216 с.

23. Правила устройства электроустановок. Разделы 1—7. — М., 2002.

24. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М., НЦ ЭНАС, 2001.

25. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: НЦ ЭНАС, 2002.

26. Объем и нормы испытания электрооборудования. РД 34.45—51.300—97. — 6-е изд. с измен. (по сост. 01.03.2001). — М.: НЦ ЭНАС, 2001.

27. Полимерные материалы в устройствах контактной сети / В.Д. Потапов и др. — М.: Транспорт, 1988. — 224 с.

28. ГОСТ 27744—88. Изоляторы. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 20 с.

29. ГОСТ 1516.2—97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. — М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. — 31 с.

30. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. — М.; Ростов н/Д: «МарТ», 2003. — 272 с.

31. Каталог изоляторов для контактной сети и ВЛ электрифицированных железных дорог. Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. — М.: Трансиздат, 2000. — 112 с.

32. *Дмитриевский В.С.* Расчет и конструирование электрической изоляции. Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоиздат, 1981. — 392 с.
33. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования / Под ред. Ф.Л. Когана. — М., 1998.
34. Техника высоких напряжений: Учеб. для вузов / Под ред. Д.В. Разевига. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976. — 480 с.
35. *Бажанов С.А., Воскресенский В.Ф.* Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения. — М.: Энергия, 1977. — 288 с.
36. *Гольдберг О.Д.* Испытания электрических машин. Учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 2000. — 225 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Александр Сергеевич Серебряков — доктор технических наук профессор кафедры «Электротехника» Российского государственного открытого технического университета путей сообщения (РГОТУПС), «Лучший изобретатель железнодорожного транспорта», «Почетный железнодорожник».

Опубликовал свыше 200 печатных работ, получил 33 авторских свидетельства СССР и патента РФ на изобретения.

Специалист в области электронно-ионной технологии и технической диагностики изоляции высоковольтного электрооборудования электроподвижного состава.

Работы по диагностике электрической изоляции за последние три года докладывались на:

4-й международной конференции по физико-технологическим проблемам электротехнических материалов и компонентов, Россия, г. Клязьма, 2001;

3-й международной конференции «Электрическая изоляция—2002», г. Санкт-Петербург, 2002;

4-м международном симпозиуме «Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования для энергетики, транспорта, нефтяной и газовой промышленности», ЭЛМАШ—2002, г. Москва, 2002;

5-й международной конференции «Электромеханика, электро-технологии и электроматериаловедение», Крым, г. Алушта, 2003;

4-й международной научно-практической конференции «Перспективные электроизоляционные материалы и системы изоляции вращающихся электрических машин», Элинар, г. Наро-Фоминск, 2003;

4-й международной конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава», г. Новочеркасск, 2003.

Материалы этих конференций, представляющие интерес для специалистов по электроизоляционным материалам, отражены в данном учебном пособии.

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ПОСОБИИ	5
ВВЕДЕНИЕ	8
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА	10
1.1. <i>Строение атомов и молекул</i>	10
1.2. <i>Зонная теория твердых тел. Классификация веществ по электрическим свойствам</i>	11
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	13
2. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ	14
2.1. <i>Диэлектрики в электрическом поле</i>	14
2.2. <i>Поляризация диэлектрика и относительная диэлектрическая проницаемость</i>	14
2.3. <i>Основные виды поляризации диэлектриков</i>	19
2.4. <i>Диэлектрическая проницаемость газообразных, жидких и твердых диэлектриков</i>	25
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	28
3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ	29
3.1. <i>Основные понятия</i>	29
3.2. <i>Электропроводность газов</i>	36
3.3. <i>Электропроводность жидкостей</i>	37
3.4. <i>Электропроводность твердых тел</i>	39
3.5. <i>Процесс саморазряда изоляции</i>	41
3.6. <i>Нормы сопротивления изоляции</i>	43
3.7. <i>Методы измерения сопротивления изоляции</i>	45
3.8. <i>Сушка изоляции</i>	50
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	51
4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ	52
4.1. <i>Основные понятия</i>	52
4.2. <i>Виды диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах</i>	58
4.3. <i>Диэлектрические потери в газообразных, жидких и твердых диэлектриках</i>	62
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	67
5. ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ	68
5.1. <i>Общая характеристика явления пробоя</i>	68
5.2. <i>Пробой газов</i>	70
5.3. <i>Пробой газов в неоднородном поле</i>	77
5.4. <i>Пробой жидких диэлектриков</i>	80
5.5. <i>Пробой твердых диэлектриков</i>	83
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	88

6. ДВУХСЛОЙНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ	89
6.1. <i>Общие замечания</i>	89
6.2. <i>Заряд двухслойной изоляции</i>	90
6.3. <i>Схема замещения с параллельными ветвями</i>	98
6.4. <i>Возвратное напряжение в двухслойной изоляции</i>	104
6.5. <i>Напряжение саморазряда в двухслойной изоляции</i>	106
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	109
7. СТАРЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ	110
7.1. <i>Основные понятия о старении изоляции</i>	110
7.2. <i>Электрическое старение изоляции</i>	110
7.3. <i>Тепловое старение изоляции</i>	112
7.4. <i>Механическое старение изоляции</i>	116
7.5. <i>Влияние увлажнения изоляции на процесс ее старения</i>	117
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	118
8. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	119
8.1. <i>Общие сведения</i>	119
8.2. <i>Материалы для изоляторов</i>	120
8.3. <i>Линейные изоляторы</i>	123
8.4. <i>Аппаратные изоляторы</i>	126
8.5. <i>Изоляция конденсаторов</i>	128
8.6. <i>Изоляция силовых кабелей</i>	132
8.7. <i>Изоляция силовых трансформаторов</i>	138
8.8. <i>Изоляция масляных, вакуумных и воздушных выключателей</i>	140
8.9. <i>Изоляция вращающихся электрических машин</i>	142
8.10. <i>Оксидная изоляция</i>	148
8.11. <i>Расчет электроизоляционных конструкций. Координация изоляции</i>	149
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	152
9. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ	153
9.1. <i>Система эксплуатационного контроля изоляции</i>	153
9.2. <i>Методы контроля изоляции с использованием явления абсорбции</i>	154
9.3. <i>Контроль изоляции по емкостным характеристикам</i>	164
9.4. <i>Контроль изоляции по величине тангенса угла диэлектрических потерь</i>	167
9.5. <i>Контроль изоляции по интенсивности частичных разрядов</i>	172
9.6. <i>Испытание изоляции повышенным напряжением</i>	182
9.7. <i>Акустический метод контроля качества фарфоровых опорно-стержневых изоляторов</i>	197
9.8. <i>Оценка состояния изоляции силовых трансформаторов по результатам газохроматографического анализа проб масла (ГХА)</i>	198
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	205

10. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ	207
10.1. Назначение испытательных установок	207
10.2. Установки высокого переменного напряжения промышленной частоты для испытания изоляции	208
10.3. Испытательные установки высокого постоянного напряжения	212
10.4. Генераторы импульсных напряжений	220
10.5. Измерения при высоких напряжениях	227
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	232
11. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	234
11.1. Введение	234
11.2. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь различных диэлектриков при частоте 50 Гц с помощью моста переменного тока	237
11.2.1. Общие теоретические сведения	237
11.2.2. Краткие сведения о высоковольтном мосте переменного тока P5026	240
11.2.3. Задание на лабораторную работу	242
11.2.4. Порядок выполнения работы	242
Вопросы для самопроверки	244
11.3. Определение пробивного напряжения воздушных промежутков при частоте 50 Гц и различной форме электродов	245
11.3.1. Общие теоретические сведения	245
11.3.2. Задание на лабораторную работу	251
11.3.3. Порядок выполнения работы	251
Вопросы для самопроверки	252
11.4. Определение коронного и пробивного напряжения воздуха в резко- неоднородном поле при различной полярности электродов	253
11.4.1. Общие теоретические сведения	253
11.4.2. Задание на лабораторную работу	256
11.4.3. Порядок выполнения работы	256
Вопросы для самопроверки	257
11.5. Определение электрической прочности трансформаторного масла	257
11.5.1. Общие теоретические сведения	257
11.5.2. Задание на лабораторную работу	263
11.5.3. Порядок выполнения работы	263
Вопросы для самопроверки	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	267
СЛОВАРЬ ИНОСТРАННЫХ СЛОВ, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В ПОСОБИИ	268
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	271
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ	275

Учебное издание

Александр Сергеевич Серебряков
д-р техн. наук профессор

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта

Редактор *Е.Г. Зарембо*
Корректор *О.А. Рогачева*
Компьютерная верстка *Е.П. Филимонова*

Изд. лиц. ИД № 04598 от 24.04.2001 г.

Подписано в печать 16.02.05 г. Формат 60×88 1/16. Печ. л. 17,5. Усл. печ. л. 16,97.

Тираж 3000 экз. Заказ № 3999.

Издательство «Маршрут»

УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте
107078, Москва, Басманный пер., д. 6

Отпечатано с готовых диапозитивов издательства
на ОАО «Тверской полиграфический комбинат»

170024, г. Тверь, пр-т Ленина, 5. Телефон: (0822) 44-42-15

Интернет/Home page - www.tverpk.ru Электронная почта (E-mail) - sales@tverpk.ru

